

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.04.007

山区气溶胶多角度偏振遥感地气解耦方法评估

翟颖超¹, 王涵^{2*}, 赵梅如³, 陈科¹, 李林森¹

(1 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000;

2 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

3 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 山区复杂的地形特征会导致地表反射率估算误差增加, 降低地气解耦精度, 进而影响气溶胶反演精度。当前应用较广泛的反演方法有基于波段关系估算地表反射的暗目标算法 (DT)、基于区域地表反射率库的深蓝算法 (DB) 和基于双向反射分布函数 (BRDF)、双向偏振分布函数 (BPDF) 模型估算地表反射率的 GRASP (Generalized retrieval of atmosphere and surface properties) 算法。为探究适合山区气溶胶遥感的地气解耦方法, 利用地面气溶胶自动观测网 (AERONET) 气溶胶产品 (AOD_A) 对比分析了 2005 年至 2013 年间 POLDER-3 (Polarization and directionality of the earth's reflectances) 的 GRASP 气溶胶产品 (AOD_G)、中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的 DT 气溶胶产品 (AOD_DT) 和 DB 气溶胶产品 (AOD_DB) 在中国区域的精度。结果显示, 非山区站点处 AOD_G 与 AOD_A 整体相关性最高 ($R = 0.921$), AOD_DT 和 AOD_DB 总体精度差异不大, 但山区 AOD_G 高于期望误差的比例达 79.87%, AOD_DT 和 AOD_DB 高估程度分别增加了近 30% 和 20%。在河北兴隆和兰州大学半干旱气候与环境观测站 (SACOL) 两个山区站点分季节验证显示, 植被覆盖度低的秋冬季节三种卫星产品精度均存在下降趋势, 表明除去地表植被对反射率的影响后, 山区地形影响了地气解耦精度。进一步分析显示, 山区起伏地形对基于 BRDF、BPDF 模型的地气解耦方法影响较大; 在山区等起伏地表上空, 多角度观测的地表波段关系更有利于精确估算地表反射, 而在城区 BRDF、BPDF 模型与波段关系估算地表反射的误差水平接近。研究结果为进一步优化多角度观测 (如高分五号 DPC) 的山区气溶胶反演算法提供了新的方向。

关键词: 山区; 多角度偏振; 气溶胶光学厚度; 地气解耦

中图分类号: P422

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)04-339-018

Evaluation of land-atmospheric decoupling methods for mountainous aerosol multi-angle polarization remote sensing

ZHAI Yingchao¹, WANG Han^{2*}, ZHAO Meiru³, CHEN Ke¹, LI Linsen¹

(1 College of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2 School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: The complex terrain characteristics of mountainous areas can increase the estimation error of

基金项目: 国家自然科学基金 (42075132)

作者简介: 翟颖超 (1998-), 女, 河南鹿邑人, 硕士研究生, 主要从事大气遥感方面的研究。E-mail: 212004010025@home.hpu.edu.cn

导师简介: 王涵 (1986-), 河南平舆人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事定量大气遥感方面的研究。E-mail: ms.h.wang@cumt.edu.cn

收稿日期: 2022-10-13; 修改日期: 2022-12-16

*通信作者。

surface reflectance, reduce the accuracy of land-atmospheric decoupling, and then affect the accuracy of aerosol retrieval. Currently, the widely used retrieval methods include the dark target algorithm (DT) based on the band relationship to estimate the surface reflectance, the deep blue algorithm (DB) based on the regional surface reflectance library, and the generalized retrieval of atmosphere and surface properties (GRASP) algorithm based on the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and bidirectional polarization distribution function (BPDF) model to estimate the surface reflectance. To explore the land-atmospheric decoupling methods suitable for aerosol remote sensing in mountainous areas of China, the accuracy and applicability of GRASP aerosol optical depth (AOD_G) of polarization and directionality of the earth's reflectances (POLDER-3), DT aerosol optical depth (AOD_DT) and DB aerosol optical depth (AOD_DB) of moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) in China from 2005 to 2013 were compared and analyzed using AEROSOL ROBOTIC NETWORK (AERONET) aerosol optical depth (AOD_A). The results show that the overall correlation between AOD_G and AOD_A at non-mountainous sites is the highest (with correlation coefficient $R = 0.921$), and the overall accuracy of AOD_DT and AOD_DB is not much different. However, the proportion of AOD_G higher than the expected error in mountainous areas is 79.87%, and the overestimation proportion of AOD_DT and AOD_DB increases by nearly 30% and 20%, respectively. Seasonal validation at two mountain sites, Xinglong in Hebei Province and Semi-Arid Climate and Environment Observatory of Lanzhou University (SACOL), shows that the accuracy of all three satellite products tend to decrease in the autumn and winter seasons when the vegetation cover is low, indicating that the mountain topography can affect the accuracy of land-atmosphere decoupling after removing the influence of surface vegetation on reflectance. Further analysis shows that the mountainous terrain has a great influence on the land-atmosphere decoupling method based on BRDF and BPDF model. The multi-angle observation of surface band relationship is more conducive to accurate estimation of surface reflection over undulating surface such as mountainous areas, while there is no significant difference of estimating surface reflection between BRDF/BPDF models and band relationships in urban areas. The results provide a new direction for further optimizing the multi-angle observation (such as Gaofen-5 DPC) aerosol retrieval algorithm in mountainous areas.

Key words: mountainous areas; multi-angle polarization; aerosol optical depth; land-atmospheric decoupling

0 引言

大气气溶胶是悬浮在大气中固体和液体微粒的总称,其时空变化对区域气溶胶的分析研究具有重要意义^[1]。气溶胶光学厚度 (AOD) 表征介质消光系数在垂直方向的积分,用于描述气溶胶对光的消减作用,探测方式主要有地面观测和卫星观测。地面观测可提供高精度气溶胶参数,而卫星通过大范围、长时间的动态观测,可弥补地面观测站点的不足。卫星观测信息是大气散射和地表反射的综合结果,对气溶胶的反演首先要将气溶胶散射信息和地表反射从观测数据中分离,因此,卫星气溶胶遥感本质上是利用卫星辐射信

息进行地气解耦的过程。地气解耦的精度对AOD反演有着至关重要的影响,0.01的地表反射率误差会造成约0.1的气溶胶反演误差^[2]。由于陆地下垫面地表类型复杂多样,导致下垫面的地表反射率确定较为困难。山区地形起伏较大,地表方向性反射特性更加复杂,地气解耦误差增大,进而影响气溶胶反演精度。作为世界上最大的山地国家,探究适合山区地气解耦方法,准确获取山区地表反射率信息对提高山区气溶胶反演精度具有重要意义。

国内外学者针对气溶胶卫星遥感反演做了大量研究,利用光学遥感卫星反演AOD最常用的算法是暗目标(DT)算法^[3]和深蓝(DB)算法^[4]。由于大气散射辐射和地表反射辐射的偏振性差异较大,借助偏振信息更易区分两者的贡献^[5]。法国国家太空研究中心研制的多角度偏振系列传感器POLDER(Polarization and directionality of the earth's reflectances)受到了国内外学者的广泛关注。基于POLDER多角度偏振数据已提出了许多反演算法^[6-8],探索如何利用偏振数据优势提高反演精度。Dubovik等^[9-11]基于多源数据统计优化提出GRASP(Generalized retrieval of atmosphere and surface properties)算法,它可以像地基观测一样,从多角度偏振观测中反演出非常完整的气溶胶产品集^[12],是目前唯一一种完整反演POLDER气溶胶产品的算法^[13]。

近年来,我国也研制出了类似POLDER的多角度偏振成像仪(DPC),并于2018年5月搭载在高分五号01星上发射升空,成为继POLDER-3后全球多角度、多波段、偏振观测数据的重要来源^[14]。DPC共8个波段,包括3个偏振波段(490、670、865 nm)和5个非偏振波段(443、565、763、765、910 nm)。它可对同一目标多次成像,实现9~12个角度的观测。2021年9月,由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC-II)、高精度偏振扫描仪(POSP)、大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI-II)和大气主要温室气体监测仪(GMI-II)搭载在高分五号02星上成功发射^[15]。DPC-II在高分五号01卫星载荷DPC基础上进行了优化,增加了多角度观测角度数,提高了空间分辨率,并实现了与POSP的协同观测。POSP具备多光谱的全偏振探测能力,与DPC-II联合探测,可获取大气气溶胶的高精度偏振数据。研究表明,多角度和偏振信息可以提高陆地气溶胶反演精度^[16],利用地表二向性偏振分布函数(BPDF)模型,结合偏振传感器观测数据估计地表偏振贡献,可提高地气解耦的精度^[17]。

在已有研究基础上,本文从不同AOD反演算法中的地气解耦方法出发,利用AERONET AOD(AOD_A)数据,对比分析中分辨率成像光谱仪(MODIS)中数据集Collection 061(C6.1)DT算法(AOD_DT)、DB算法(AOD_DB)和POLDER-3 GRASP算法(AOD_G)在山区及非山区的反演精度,探究地形对山区地气解耦方法的影响,得出适合山区的多角度偏振遥感地气解耦方法,以便为提高山区DPC气溶胶及地表参数反演精度提供参考。

1 数据与方法介绍

1.1 MODIS DT、DB数据

MODIS是搭载在Terra和Aqua(过境时间分别为地方时10:30、13:30)卫星上的传感器,1~2天对地观测一次,可获取陆地和海洋温度、云、气溶胶等数据。MOD04(Terra卫星)和MYD04(Aqua卫星)为大气2、3级标准数据产品,其中每日气溶胶数据为2级产品,每月气溶胶数据为3级产品。

DT算法最早由Kaufman^[18]提出,其原理是将绿色植被、湿土壤和水体等地表反射率较低的区域作为暗

像元,在这些暗像元中,气溶胶对中红外波段(2.13 μm)的干扰很小,地表反射率和表观反射率基本一致,且2.13 μm 反射率与蓝(0.47 μm)、红(0.66 μm)波段反射率存在固定线性关系,因此根据2.13 μm 表观反射率计算0.47 μm 和0.66 μm 的地表反射率;再利用表观反射率的大气贡献项和大气辐射传输模型建立查找表,进而反演AOD。从MODIS Collection 005版本开始,DT算法反演AOD时采用新的思想:蓝、红波段与中红外波段的地表反射率比值不是常量,它与归一化植被指数(NDVI)、太阳天顶角、传感器方位角和散射角有关,具体关系为^[19]

$$\rho_{0.66} = (k + 0.002\theta - 0.27)\rho_{2.12} - 0.00025\theta + 0.033, \quad (1)$$

$$\rho_{0.47} = 0.49\rho_{0.66} + 0.005, \quad (2)$$

$$I_{\text{NDV,SWIR}} = \frac{(\rho_{1.24}^* - \rho_{2.12}^*)}{(\rho_{1.24}^* + \rho_{2.12}^*)}, \quad (3)$$

其中

$$\theta = \cos^{-1}(-\cos\theta_0\cos\theta + \sin\theta_0\sin\theta\cos\varphi), \quad (4)$$

$$\begin{cases} k = 0.48, & I_{\text{NDV,SWIR}} < 0.25 \\ k = 0.58, & I_{\text{NDV,SWIR}} > 0.75 \\ k = 0.48 + 0.2(I_{\text{NDV,SWIR}} - 0.25), & 0.25 \leq I_{\text{NDV,SWIR}} < 0.75 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $\rho_{0.47}$ 、 $\rho_{0.66}$ 、 $\rho_{2.12}$ 分别为0.47、0.66、2.12 μm 波段的地表反照率, $I_{\text{NDV,SWIR}}$ 为短波红外的NDVI值, $\rho_{1.24}^*$ 、 $\rho_{2.12}^*$ 分别为1.24 μm 和2.12 μm 波段的表观反照率, θ_0 为太阳天顶角, θ 为观测天顶角, φ 为相对方位角。

由于DT算法在地表反射率高的地区,上述线性关系并不成立,会导致较大的反演误差。为解决高反射率地区气溶胶反演的问题,Hsu等^[4]提出了DB算法。该算法假设亮目标地区蓝波段地表反射率较低、红光和近红外波段相对较高,利用气溶胶的吸收特性,使暗目标的总反射率变亮,亮目标的总反射率变暗,基于这种差异建立查找表来反演AOD及其特性。算法根据历史的地表反射率产品建立蓝波段地表反射率库,进而反演亮地表地区AOD。MODIS C6.1中DB算法中地表反射率的确定有三种方法:动态地表反射率、提前计算好的地表反射率库、前两者方法结合^[20],方法的选择取决于2.1 μm 处的表观反射率和NDVI。

将与GRASP/POLDER数据时空分辨率相对应,研究选取MYD04 DT、DB的气溶胶日数据集进行对比分析,时间自2005年1月1日至2013年12月31日,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。其中AOD_DT数据集为“Optical_Depth_Land_And_Ocean”,AOD_DB数据集为“Deep_Blue_Aerosol_Optical_Depth_550_Land_Best_Estimate”。

1.2 POLDER-3/GRASP数据

2004年,POLDER-3传感器搭载于PARASOL卫星发射升空,每2天覆盖地球一次,分辨率为 $5.3 \text{ km} \times 6.2 \text{ km}$ 。运行期间提供超过9年的观测数据,覆盖 $0.443 \sim 1.020 \mu\text{m}$ 范围内共9个波段,其中490、670、865 nm为偏振通道。它最多可从16个角度观测地面目标,得到多角度偏振辐射信息。Dubovik等^[21]提出了GRASP算法,算法基于不确定性的正态分布假设,结合最大似然原理,对多组观测数据和先验约束进行最小二乘最优拟合,实现气溶胶和地表特性的联合反演。GRASP/POLDER-3算法采用线性半经验核驱动模型Ross-Li^[22,23]、Maignan^[24]模型作为二向性反射分布函数(BRDF)模型和二向性偏振分布函数(BPDF)模型表征地表反射率的方向特性。其中BRDF表达式为各项同性散射核、水平方向均一叶冠的辐射传输体散射核、

具有投影阴影的三维目标场景的几何光学表面散射核的线性组合形式,即

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda)K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}}(\lambda)K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi), \quad (6)$$

式中 $R(\theta_i, \theta_v, \varphi, \lambda)$ 为波段 λ 的 BRDF 值, θ_i 与 θ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角, φ 为相对方位角, λ 为观测波段; $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 为各向同性散射系数, 等于太阳天顶照射、传感器天顶观测时的地表反射率, $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 与 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 分别为体散射与几何光学散射对应的权重系数, 三个参数均和波长相关; $K_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 与 $K_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$ 分别为体散射核与几何光学校核, 是太阳天顶角、观测天顶角及相对方位角的函数。当观测数据多于三个时, 可利用最小二乘法拟合确定最优权重系数 $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 、 $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 与 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 。然而, 最初提出的 Ross-Li 核驱动模型并未明确考虑地形效应。在地形复杂地区求解地表反射率时, 还需将具体的影响因素 (如坡度、坡向、太阳高度角等) 引入到核驱动 BRDF 模型中, 采用最具有代表性的地表散射类型作为其核^[25]。

BPDF 模型用来模拟来自地表的偏振反射量, Maignan 等^[24]基于物体表面的偏振光是由单次镜面反射产生的假设, 假设反射面 (植被和裸土) 各项同性分布, 提出了只含有一个自由参数的植被 BPDF 模型, 其表达式为

$$R_p(\theta_s, \theta_v) = \frac{A \exp(-\tan \alpha_\gamma) \exp(-I_{\text{NDV}}) F_p(\alpha_\gamma, n)}{4(\mu_s + \mu_v)}, \quad (7)$$

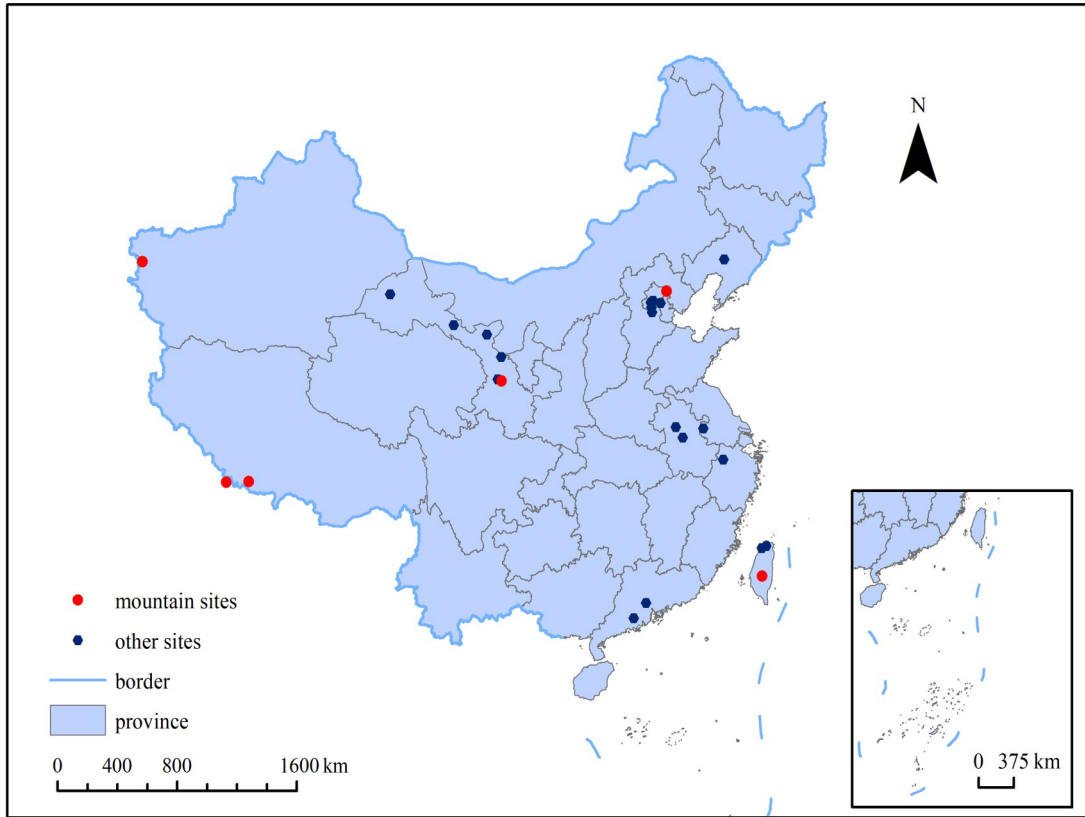
式中 R_p 为偏振反射率, θ_s 为太阳天顶角, θ_v 为观测天顶角, A 为自由参数, α_γ 为入射角, I_{NDV} 为归一化植被指数, F_p 为菲涅耳矩阵, n 为折射率, μ_s 、 μ_v 为太阳天顶角和观测天顶角的余弦。Maignan BPDF 模型适用于植被覆盖的地表类型, 而地面的偏振反射量除依赖地表植被覆盖情况、观测几何情况因素外, 还与地表起伏、阴影以及表面粗糙度等因素相关。当观测角度较大时, Maignan BPDF 模型会出现模型值远大于实际观测值的情况^[26]; 对地形起伏和观测几何关系中存在的阴影问题, 后续也有学者引入阴影方程^[27], 对 BPDF 模型进行改进。

POLDER-3 采用 GRASP 算法可得到四种产品: GRASP/optimized、GRASP/high-precision、GRASP/models 和 GRASP/components。由于 GRASP/high-precision 产品采用精确的辐射传输模型, 且各气溶胶参数总体反演结果更准确, 因此, 选择 GRASP/high-precision 产品作为卫星多角度偏振数据进行研究分析。GRASP/high-precision 数据经处理分为 lev1 (每日数据)、lev2 (经过滤和聚合的全分辨率数据) 和 lev3 (在 lev2 基础上以 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 为分辨率创建的网格化产品)。本研究使用的是 lev3 GRASP AOD 日产品, 时间自 2005 年 3 月 22 日至 2013 年 10 月 11 日。

1.3 AERONET 数据

美国航空航天局 (NASA) 和法国国家太空研究中心联合建立的 AERONET 观测网, 可对全球气溶胶的光学特性进行实时、高精度探测。AERONET 提供 $0.34 \sim 1.06 \mu\text{m}$ 范围的气溶胶数据, 数据经处理分为三个等级: lev1.0 (初级数据)、lev1.5 (经过滤云处理未经过验证数据) 和 lev2.0 (经过滤云处理且经过验证数据), 获取的 AOD 观测误差为 $0.01 \sim 0.02$ ^[28], 常用作检测卫星 AOD 反演精度的标准。中国气象局于 2002 年采用和 AERONET 相同的 CE318 型太阳光度计布设了中国气溶胶监测网 (CARSNET)^[29,30]。2010 年, 中科院遥感与数字地球研究所联合国内多所高等院校和科研院所建立了太阳-天空辐射计观测网 (SONET)^[31]。CARSNET 和 SONET 累积了多年观测数据, 在研究气溶胶时空变化、光学特性、卫星数据真实性验证、气候效应评估等方面作出了重要贡献。因数据获取、站点数据匹配量等问题, 本研究采用数据匹配较多的 AERONET AOD

lev2.0数据作为地面真实值,验证卫星气溶胶产品精度。25个AERONET站点分布如图1所示,各站点处三种卫星产品与地面观测数据匹配时间及条数参见表1。



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)4632号]绘制,底图无修改

图1 25个AERONET站点分布

Fig. 1 Distribution of 25 AERONET sites

1.4 SRTM数据

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)是由NASA和美国国家地理空间情报局联合生产的DEM产品^[32]。该数据集包括56°S~61°N间,全球80%以上的陆地地形数据。采样间隔有1"和3",对应分辨率为30 m (SRTM1)和90 m (SRTM3),研究采用的是SRTM1 DEM数据。在ArcGIS中提取以站点为中心、与卫星数据相同邻域范围的SRTM1 DEM数据,在空间分析模块计算海拔及坡度数据。若统计得到的海拔均值与AERONET站点海拔相差较大,则不考虑该站点。根据GB/T13977-92《1:5000 1:10000地形图航空摄影测量外业规范》中地形类别划分标准(表2),将坡度大于6°且海拔大于200m的站点划分为山地站点。

1.5 精度验证方法

卫星数据与地面数据对应的中心波长和时空尺度不同,为使对比更准确,对二者进行时空和波段匹配。以AERONET站点经纬度所在像元为中心,取5×5临近像元的GRASP/POLDER数据(0.5°×0.5°)和MODIS数据(50 km×50 km);同时取卫星过境前后30 min内AOD_A数据,分别求均值作为卫星与地面数据。由于GRASP产品侧重于可见光范围(550 nm)的AOD比较和分析^[33,34],因此,利用AOD自然对数与波长自然对数间的多项式拟合关系^[35]可得到550 nm处的AOD,即

式中 $\tau_a(\lambda)$ 为波长为 λ 的 AOD, a, b, c 为多项式拟合参数。此方法得到的拟合误差为 0.01~0.02。用同样插值方法得到 550 nm AOD_A 数据。

表 1 25 个 AERONET 站点有效数据时间范围

Table 1 Effective data time range of 25 AERONET sites

Site	Valid data time range with AOD_ DT (number of data)	Valid data time range with AOD_ DB (number of data)	Valid data time range with AOD_ G (number of data)
Beijing*	2005.01.18—2013.11.22 (658)	2005.01.02—2013.12.31 (1229)	2005.03.27—2013.08.18 (341)
Beijing-CAMS*	2012.08.04—2013.06.27 (83)	2012.08.04—2013.06.27 (108)	2012.08.21—2013.06.26 (13)
Dunhuang_LZU	—	2012.04.04—2012.04.26 (10)	2012.04.07—2012.04.27 (5)
Hangzhou-ZFU	2007.08.13—2007.11.11 (24)	2007.09.07—2007.11.14 (17)	2007.10.16—2007.11.08 (2)
Hefei*	2005.11.17—2008.11.20 (43)	2005.11.17—2008.11.20 (53)	2005.11.28—2008.03.10 (14)
Jingtai	2008.04.28 (1)	2008.02.28—2008.04.30 (21)	2008.03.01—2008.04.28 (9)
Kaiping	2008.10.22—2008.11.15 (7)	2008.11.10—2008.11.15 (5)	2008.11.15 (1)
Langtang#	2009.04.24—2009.04.28 (3)	2009.04.24—2009.04.28 (3)	2009.04.24 (1)
Lanzhou_City*	2009.10.02—2009.11.07 (9)	2009.10.02—2010.03.13 (42)	2009.10.13—2010.01.16 (11)
Liangning	2005.04.07—2005.07.03 (20)	2005.04.07—2005.06.24 (26)	2005.05.02—2005.05.26 (3)
Lulin#	2006.09.29—2013.12.02 (95)	2006.11.10—2013.12.01 (46)	2006.10.06—2013.01.18 (8)
Minqin	—	2010.05.26—2010.06.17 (4)	2010.05.19 (1)
Muztagh_Atah#	2011.08.04 (1)	2011.06.20—2011.10.13 (5)	2011.07.21—2011.09.07 (4)
NCU_Taiwan*	2005.03.06—2013.07.11 (156)	2005.03.06—2011.11.28 (78)	2006.09.25—2013.03.06 (12)
NUIST*	2010.03.11—2010.04.05 (8)	2010.03.07—2010.04.05 (14)	2010.03.11—2010.03.13 (2)
PKU_PEK	2006.08.15—2008.08.27 (16)	2006.08.15—2008.08.27 (16)	2006.08.15—2008.08.24 (5)
QOMS_CAS#	2010.10.13—2013.12.04 (61)	2010.11.05—2013.12.31 (71)	2010.10.10—2012.11.06 (54)
SACOL#	2006.07.28—2012.08.10 (335)	2006.07.28—2012.08.10 (681)	2006.08.05—2012.04.26 (189)
Shouxian	2008.05.16—2008.12.24 (36)	2008.05.16—2008.12.25 (46)	2008.11.03—2008.12.14 (5)
Taipei_CWB*	2005.01.17—2013.12.08 (206)	2005.02.15—2013.12.03 (58)	2007.01.29—2012.10.19 (9)
XiangHe	2005.01.13—2013.12.31 (766)	2005.01.03—2013.12.31 (1298)	2005.03.27—2013.08.30 (337)
Xinglong#	2006.03.14—2012.05.01 (278)	2006.02.19—2012.05.01 (615)	2006.02.19—2012.04.16 (201)
Yufa_PEK	2006.08.16—2006.09.09 (11)	2006.08.16—2006.09.09 (11)	2006.08.19—2006.09.09 (3)
Zhangye	2008.04.29—2008.06.16 (8)	2008.04.12—2008.06.16 (20)	2008.04.24—2008.05.19 (6)
Zhongshan_Univ*	2011.11.02—2012.04.26 (26)	2011.11.02—2012.04.26 (28)	2011.11.28—2011.12.25 (3)

注: *代表城区; #代表山区; -表示无数据

表 2 1:10000 地形图地形类别划分标准

Table 2 1:10000 topographical map topographic classification standard

Terrain category	Slope/(°)	Elevation difference/m
Flatland	< 2	< 20
Hilly land	2~6	20~150
Mountain	6~25	150~500
Alpine	> 25	> 500

$$\ln\tau_a(\lambda) = a + b\ln\lambda + c(\ln\lambda)^2, \tag{8}$$

为量化匹配结果, 采用相关系数 R 、均方根误差 E_{RMS} 、偏差 S_{Bia} 、期望误差 (EE, E_E) 等指标进行定量评价

和分析。相关系数 R 越接近 1 或 -1, 变量相关程度越强。均方根误差 E_{RMS} 可以表明样本的离散程度。偏差 S_{Bia} 正值代表高估, 负值代表低估。落入期望误差内的样本数量越多, 表明卫星数据质量越好。其表达式分别为

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (9)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}}, \quad (10)$$

$$S_{\text{Bia}} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{n}, \quad (11)$$

$$E_{\text{E}} = \pm(0.05 \mp 0.15X_i), \quad (12)$$

式中 n 为卫星与地面互相匹配数据条数, X_i 为地面数据, \bar{X} 为地面数据均值, Y_i 代表卫星数据, \bar{Y} 为卫星数据均值。

2 山区 AOD 产品分析

2.1 山区及非山区反演精度对比分析

图 2 (a)–(c) 为非山区站点三种产品卫星数据与地面数据线性拟合结果, 其中 mean 为 AOD_A 均值, $\% = E_{\text{E}}$ 、 $\% > E_{\text{E}}$ 、 $\% < E_{\text{E}}$ 分别为落在期望误差范围内、范围之上和范围之下的比例。总的来看, AOD_DT 与 AOD_DB 精度差异不大, AOD_G 与 AOD_A 一致性最好, 但落入期望误差的百分比明显低于 AOD_DT 和 AOD_DB。AOD_DT 落入期望误差内的百分比 (60.59%)、偏差 (-0.072) 和均方根误差 (0.286) 稍优于 AOD_DB (EE 内: 58.01%, $S_{\text{Bia}} = -0.088$, $E_{\text{RMS}} = 0.293$), 两种产品与地面数据的相关性较为接近。三种产品中, AOD_G 与 AOD_A 相关系数和线性拟合直线斜率均为最高 (分别为 0.921、0.830), 但落入期望误差内百分比仅为 39.90%, 高估和低估比例分别为 53.58%、6.52%, 这一结果与 Tan 等^[36] 利用中国地区 15 个 AERONET 站点数据验证结果 ($R = 0.953$, EE 内: 39.20%) 具有一致性, 表明 AOD_G 在中国地区存在一定高估。

图 2 (d)–(f) 为山区站点三种产品卫星数据与地面数据线性拟合结果。山区三种气溶胶产品精度有下降趋势, 与地面数据一致性明显降低, 且存在高估现象。AOD_DT 与 AOD_A 相关系数为 0.723, 偏差值相比非山区站点有所增加, 高估程度增加了近 4 倍, 表明 DT 算法中地表反射率估算方法在山区不均匀地形的影响下适用性降低, 导致山区 AOD_DT 产品精度降低。AOD_DB 相比非山区站点精度也有所下降, 但落入期望误差内百分比 (48.52%) 和偏差 (0.110) 为三种产品中最优, 这也表明 DB 算法在 C6.1 版本中的改进 (减少异质地形中的伪影、改进高地地形的地表反射率建模) 对山区气溶胶反演具有很大帮助。AOD_G 与 AOD_A 的相关系数仍为最高 ($R = 0.857$), 但落入期望误差内的百分比仅为 18.82%, 近 80% 的 AOD_G 值都在误差

范围之上, 高估现象最为严重。综上所述, AOD_DT 和 AOD_DB 产品在非山区精度差异不大, AOD_G 产品具有较高的稳定性, 但存在高估现象, 山区三种产品精度均存在显著下降趋势, 高估程度明显增大。

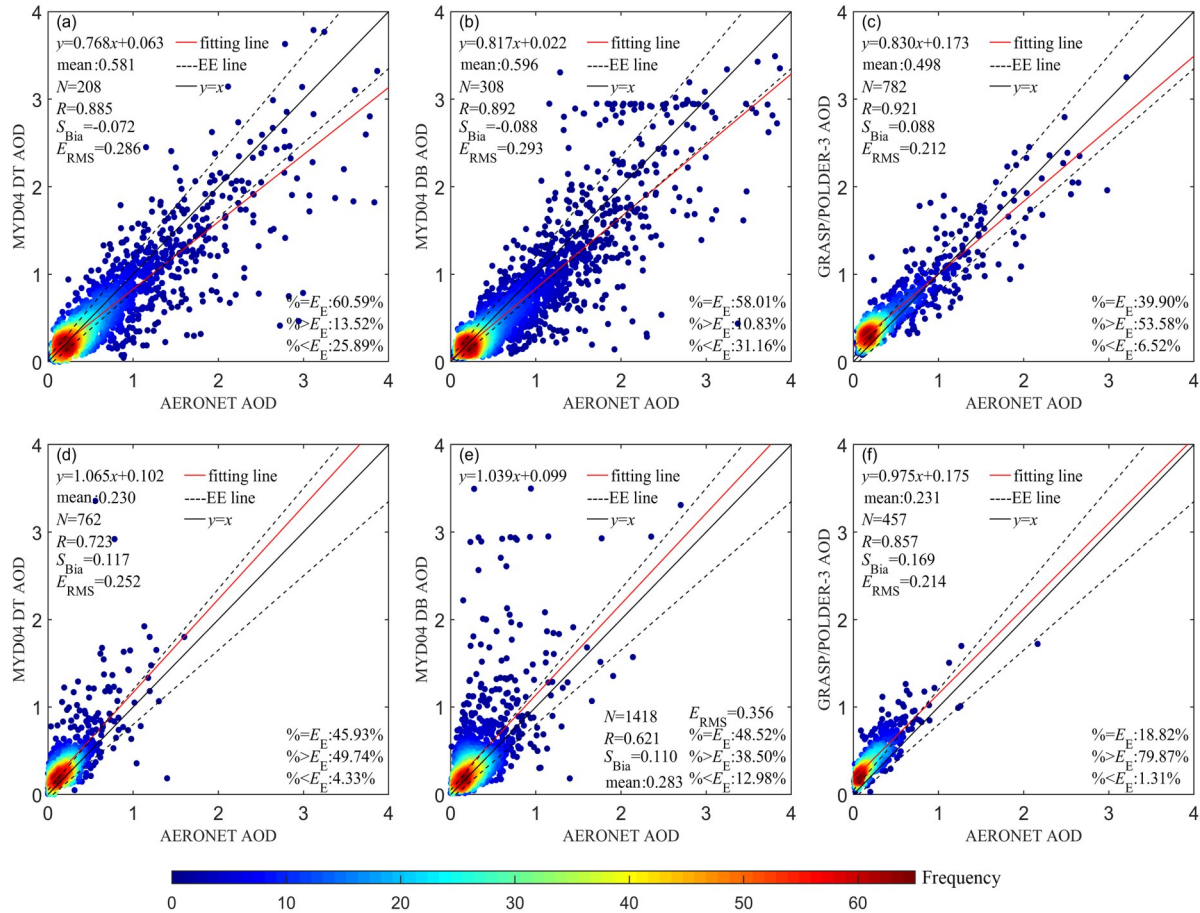


图 2 非山区及山区气溶胶产品验证。(a)–(c) 非山区站点 AOD_DT、AOD_DB、AOD_G 结果;
(d)–(f) 山区站点 AOD_DT、AOD_DB、AOD_G 结果

Fig. 2 Validation of aerosol products in non-mountainous and mountainous area. (a)–(c) Results of AOD_DT, AOD_DB and AOD_G for non mountainous sites; (d)–(f) results of AOD_DT, AOD_DB and AOD_G for mountainous sites

2.2 不同山区站点反演精度对比

由于气溶胶反演误差主要为地表反射率估计误差和气溶胶类型假设误差, 而山区同一站点气溶胶类型变化不大, 对山区站点具体分析有助于探究山区复杂地形对地气解耦精度的影响, 为山区气溶胶反演提供参考。因此选取数据量较多的代表性山区站点兴隆和 SACOL, 对 3 种不同地气解耦方法得到的气溶胶产品在山区的精度差异及影响因素进行详细分析。其中, 兴隆 (40.396° N, 117.578° E) 站点距北京市区东北约 120 km, 地处燕山山脉东段, 山地面积大, 坡度陡, 海拔 970 m, 平均坡度 17.98°。兰州大学半干旱气候与环境观测站 SACOL (35.946° N, 104.137° E), 位于海拔 1961 m 的萃英山顶, 区域平均坡度 11.51°, 属典型的黄土高原地貌, 植被覆盖率低, 地表反照率大。

兴隆站点 [图 3 (a)–(c)] 验证结果显示: AOD_DT 与 AOD_A 相关性 ($R = 0.739$)、 E_{RMS} (0.369)、 S_{Bia} (0.185) 均优于 AOD_DB ($R = 0.697$, $E_{RMS} = 0.515$, $S_{Bia} = 0.275$), 同时落入期望误差内的百分比为 39.57%, 为 3

种产品中最高；AOD_DB高估比例约为70%，较该产品山区总体高估百分比增加近30%；AOD_G与AOD_A一致性($R = 0.900$)较高，均方根误差(0.212)和偏差(0.181)也低于另外两种算法，表明AOD_G在此站点误差较小，然而其高估程度达92.54%，为三种产品中高估最严重的算法。SACOL站点[图3(d)–(f)]验证结果显示，三种卫星数据与地面数据的相关性较为接近。AOD_DT、AOD_DB与AOD_A拟合直线的斜率分别为0.840、0.697，偏差和均方根误差也较小，落在期望误差内的百分比分别为62.88%、62.11%，较山区总体AOD_DT、AOD_DB精度有较明显提高。AOD_G与AOD_A拟合直线斜率和相关系数高于另外两种产品，但落入期望误差之上的百分比仍为三者最高。

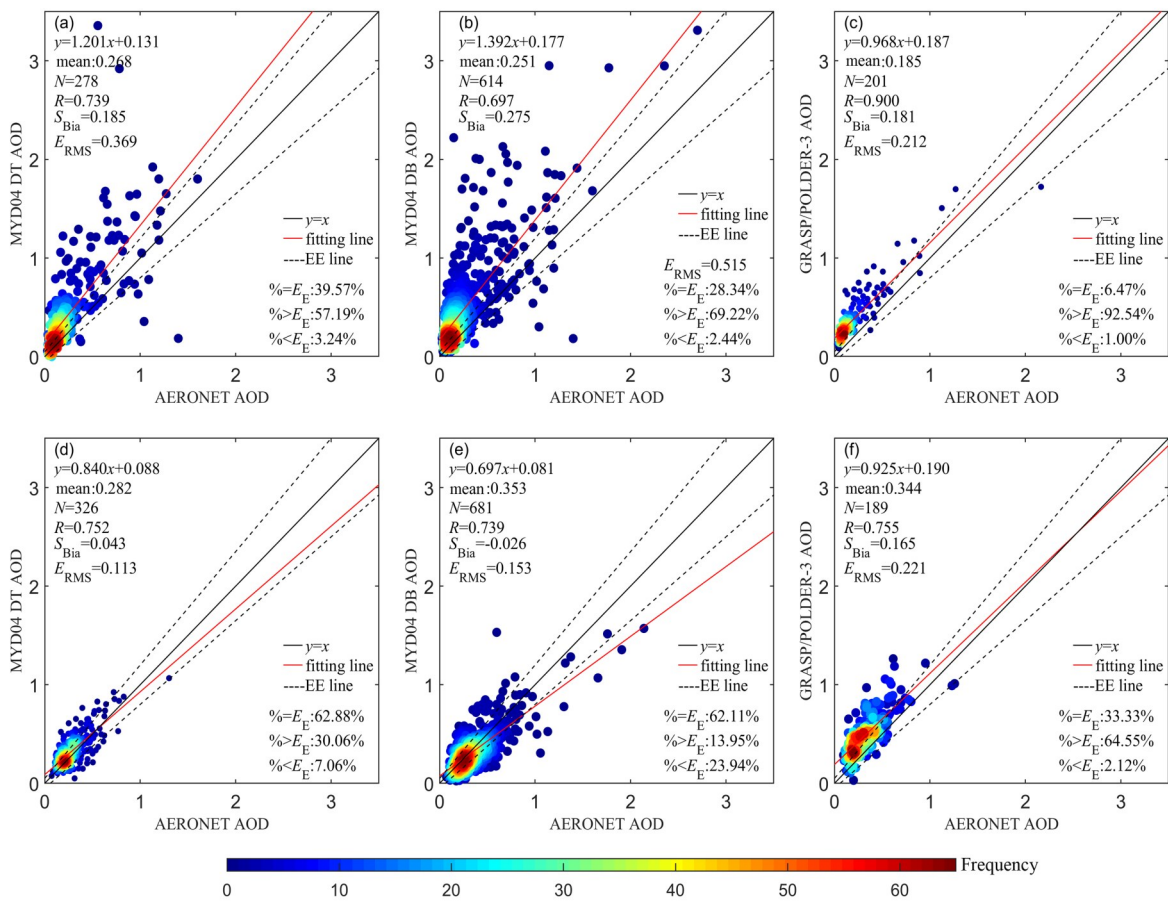


图3 不同站点三种气溶胶产品验证结果。(a)–(c) 兴隆 AOD_DT、AOD_DB、AOD_G 结果；

(d)–(f) SACOL AOD_DT、AOD_DB、AOD_G 结果

Fig. 3 Validation results of three aerosol products at different sites. (a)–(c) AOD_DT, AOD_DB, AOD_G results in Xinglong;

(d)–(f) AOD_DT, AOD_DB, AOD_G results in SACOL

除山区地形复杂多样给地表反射率的确立带来较大的困难外，山区地表植被的季节性变化也会直接影响地表反射率，进而影响AOD反演精度。因此按时间把数据分为春季(3–5月)、夏季(6–8月)、秋季(9–11月)和冬季(12月–次年2月)，分析三种气溶胶产品在不同季节下的准确性和适用性。

图4为兴隆站点不同季度下三种气溶胶产品验证对比图。其中，AOD_DT春秋季与AOD_A相关性为0.757，落在期望误差内的比例为43.08%；夏季相关系数(0.568)和期望误差内的比例(22.81%)为四季最低，

均方根误差、偏差值为四季最高; 冬季数据误差较小, 期望误差内的比例也较高, 但受暗目标选择准则的限制, 有效数据量较少。AOD_DB 春季时与 AOD_A 相关性最高 ($R = 0.883$), 均方根误差和偏差也优于其他三季; 夏季落入期望误差内的比例 (35.29%) 稍高于春季 (31.01%), 但相关系数、均方根误差及偏差结果不如春季; 秋冬两季线性拟合直线斜率较高 (2.183 和 1.968), 且期望误差之上的百分比均高于 70%, 表明 AOD_DB 秋冬季高估程度较大。AOD_G 与 AOD_A 的相关系数春夏季在 0.910 之上, 秋冬虽有所下降但仍高于 0.870; 春夏季均方根误差和偏差高于秋冬季; 春季的高估程度稍低于秋冬季, 但高估百分比也达 90.57%。

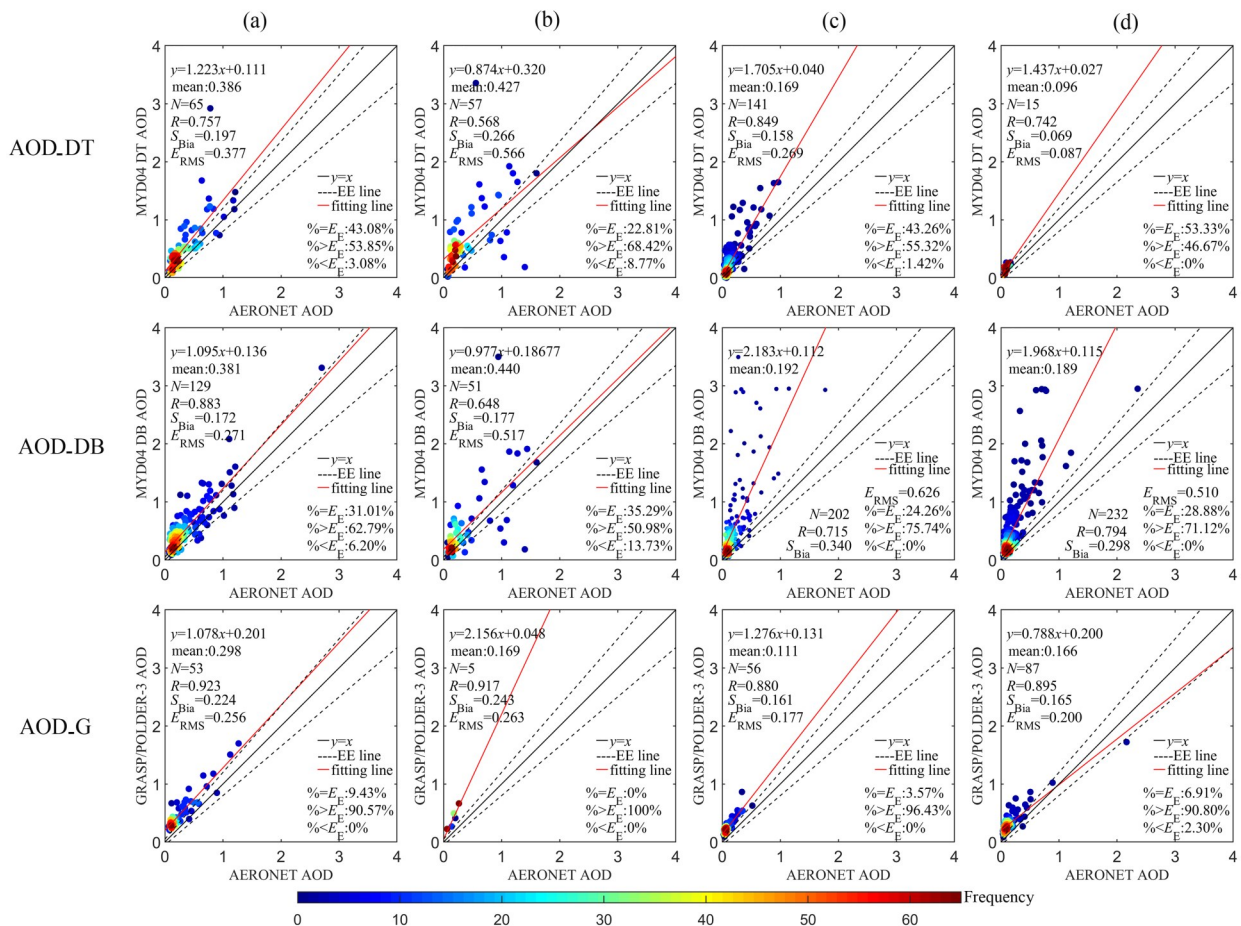


图4 兴隆站点各季节气溶胶产品验证结果。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 4 Validation results of aerosol products in different seasons at Xinglong site. (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

图5为SACOL 站点不同季度下三种产品对比结果。由图可知, AOD_DT 春季与 AOD_A 拟合直线斜率为 0.908, 落在期望误差内的比例为 60.98%; 从相关系数和拟合直线可看出, 夏季 AOD_DT 与地面一致性较强; 秋季数据落在期望误差内的比例为四季最高 (76.27%), 偏差和均方根误差较小, 但从相关系数和拟合直线斜率, 可看出此季节 AOD_DT 与地面一致性较弱; 由于 DT 算法无法在复杂明亮的表面上提取 AOD, 导致冬季没有相匹配的有效数据。AOD_DB 春季时与 AOD_A 的相关性最高 ($R = 0.850$), 落入期望误差内数据占比 71.70%; 夏、秋、冬三季相关系数及拟合直线结果较为接近, 存在一定低估。AOD_G 在春季与地面一致性较强; 夏季相关系数 (0.799) 和落在期望误差内比例 (58.33%) 为四季最高, 均方根误差、偏差较小,

但有效数据条数太少, 不进行对比分析; 秋季均方根误差、偏差也较小, 由相关系数、直线斜率和落入期望误差内的结果, 可得出秋季 AOD_G 与地面一致性稍低于春季; 冬季均方根误差和偏差高于其他三季, 期望误差之上的比例也最大 (81.25%), 说明冬季 AOD_G 产品误差增加, 高估程度增大。

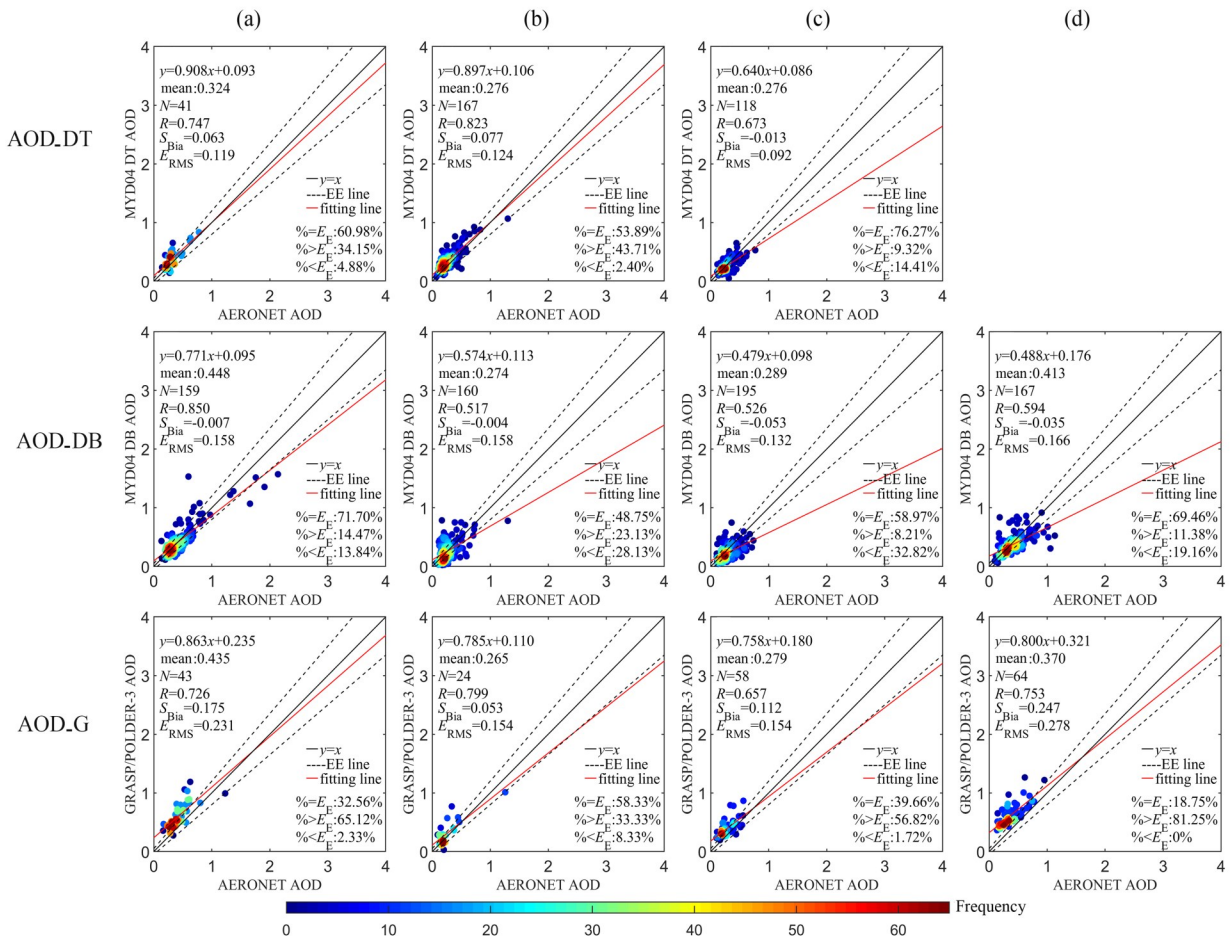


图 5 SACOL 站点各季节气溶胶产品验证结果。(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 5 Validation results of aerosol products in different seasons at SACOL site. (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

2.3 三种产品验证结果评价

由上述比较分析可知, 兴隆站点处 AOD_DT 误差小于 AOD_DB, AOD_G 在相关性和稳定性上较好, 但高估程度明显高于 AOD_DT 和 AOD_DB。SACOL 站点三种产品的精度较兴隆站点有一定提高, AOD_DT、AOD_DB 反演结果较好, AOD_G 高估程度下降。这是由于兴隆站点的平均坡度高于 SACOL 站点, 坡度大的山区, 地形对太阳辐射、大气散射辐射和临近地物的反射辐射的影响增大, 使地表反射率的确立更加困难, 进而降低了气溶胶反演精度。

三种产品精度存在季节性差异。兴隆站点处, AOD_DT 春、夏、秋三季 (冬季数据量太少不进行比较) AOD 较小时, 散点结果图较为相近; 随着 AOD 的增大, 卫星数据偏离程度增加, 秋季偏高程度最大。AOD_DB 春、秋、冬三季对比结果显示, 秋冬季的误差较大, 高估百分比在 70% 之上。AOD_G 春、秋、冬季与

地面数据的相关性较高, 但高估现象较为严重。SACOL 站点处, AOD_DT 夏秋季数据量稍多的情况下, 秋季与地面数据的相关性较低; AOD_DB 夏、秋、冬三季与地面数据偏离较大, 秋冬季线性拟合直线斜率更低; AOD_G 春冬季与地面数据一致性较高, 但冬季误差和高估比例较大, 秋季误差虽小, 与地面数据一致性却稍低。由上述对比结果可知, 三种产品秋冬季精度均有一定程度下降, 说明除去地表植被对反射率的影响后, 山区起伏的地形因素成为影响地表反射率的主要原因, 在太阳几何及观测几何一定的情况下, 地形的起伏使每个坡面的光照条件、遮蔽情况以及坡面局部坐标系下的观测几何变得复杂, 利用波段关系和地表反射率库进行地气解耦误差增加, 但整体结果较好。基于 BRDF 模型和 BPDF 模型地气解耦在各季节下稳定性较好, 但高估程度较大。

由于中国山区匹配数据有限, 为得到更准确的结果, 另外选取西亚 6 个山区站点进行对比, 分别为 Eilat (29.503° N, 34.918° E)、Hamim (22.967° N, 54.300° E)、IMS-METU-ERDEMLI (36.565° N, 34.255° E)、Mezaira (23.145° N, 53.779° E)、SEDE_BOKER (30.855° N, 34.782° E) 和 Xanthi (41.147° N, 24.919° E)。图 6 为西亚山区站点气溶胶产品验证结果。由图可知, AOD_DT 在偏差、均方根误差和落入期望误差内百分比方面结果较好; AOD_G 在与地面数据一致性方面较好, 但高估百分比最大。这与上文在中国山区的验证结论一致, 均表明 AOD_DT 产品在山区具有更好的适用性; 而 AOD_G 与地面数据相关性好, 但存在较大的高估。

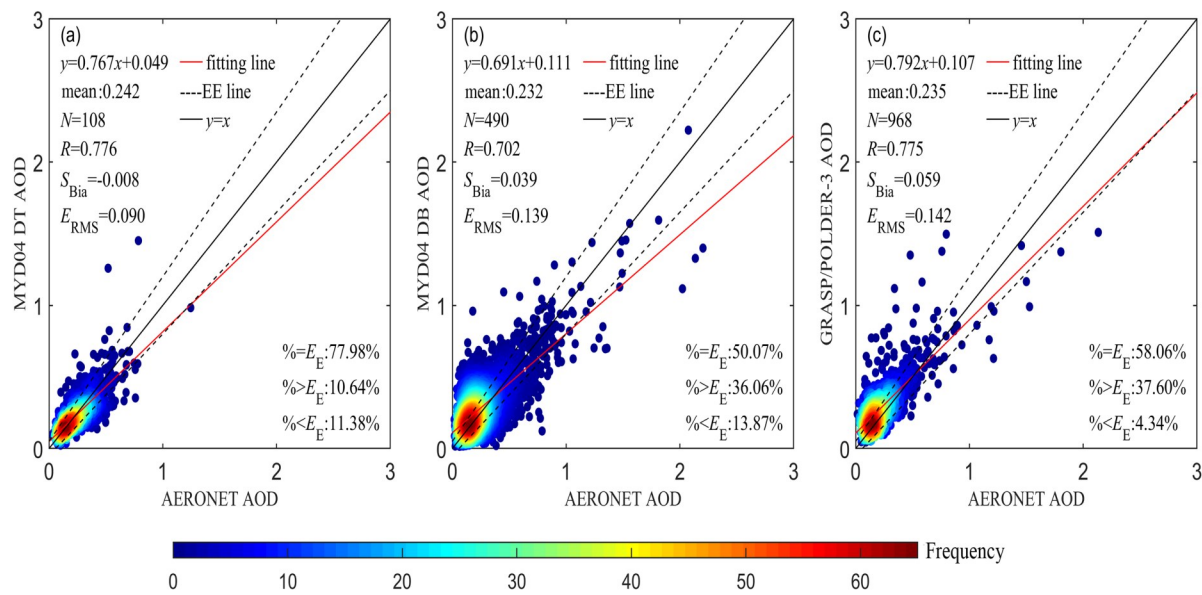


图 6 西亚山区站点气溶胶产品验证结果。(a) AOD_DT; (b) AOD_DB; (c) AOD_G

Fig. 6 Validation results of aerosol products at mountainous sites in West Asia. (a) AOD_DT; (b) AOD_DB; (c) AOD_G

3 地气解耦方法对比

如前所述, 目前主要的地气解耦方法有基于 BRDF 模型和 BPDF 模型的方法 (GRASP 等算法)、基于地表反射波段关系的方法 (DT 算法) 以及基于区域地表反射率库的方法 (DB 算法)。从原理上来讲, BRDF 模型和 BPDF 模型受地形影响较大, 另外两种方法受地形影响较小; 从验证数据来看 (由于无法从 POLDER-3 数

据中获取类似DB算法的地表信息,这里只对比BRDF、BPDF模型和波段关系模型),基于BRDF模型和BPDF模型的反演结果(GRASP)较其他两种(MODIS、DT和DB)的相关性 R 和离散度 E_{RMS} 有一定优势,但存在较大偏差(超过期望误差范围比例过大)。在观测数据准确的前提下,这种偏差基本来源于地表估计的误差。可以得到初步结论:在山区等起伏地表上空,地表波段关系或者建立地表反射率库更有利于准确估算地表反射(准度较高),但由于MODIS的DB和DT算法只能使用单一角度进行反演,使得反演AOD的相关性较差、离散度较大,进而导致反演结果精度不够;而由于POLDER-3能够获取多角度观测数据,GRASP的反演结果在相关性和离散性方面表现更为优异(精度较高),但由于BRDF模型和BPDF模型估计的准度误差较大,导致GRASP反演结果存在高估。

为了更直观地比较两种地气解耦方法,使用POLDER-3在中国山区与城区上空的LIB数据与对应的AERONET站点数据进行大气校正,得到站点区域地表的665 nm和865 nm波段偏振与强度多角度反射率数据。使用经大气校正的地表多角度偏振与强度反射率分别验证两种地气解耦方法,对比两种方法模拟结果与观测的误差。匹配的站点如表1所示,在城区和山区匹配的多角度观测数据分别为405条和453条;考虑到POLDER-3每次观测可以获取最多16个角度的观测信息,大气校正后获取有效地表偏振与强度反射率数据总量分别为8824条(其中城区4128条,山区4696条)和8959条(其中城区4415条,山区4544条)。图7为两种模型与观测值的残差分布直方图,其中BRDF和BPDF分别指使用BRDF和BPDF模型,WR指使用波段关系模型, μ 和 σ 分别为高斯拟合中的均值和方差, R 和 R_p 分别代表非偏和偏振反射率,下标meas和model分别表示观测与模型模拟数据。由于强度与偏振反射率绝对值差别较大,不做比较。从图中可以看出,均值 μ 在0附近,影响误差的最大因素为方差 σ , σ 体现的是离散情况;不论强度还是偏振反射率,山区BRDF模型和BPDF模型与观测值的方差均大于城区;不论是山区还是城区,波段关系模型误差水平均优于BRDF模型和BPDF模型;在城区,BRDF模型和BPDF模型与波段关系模型误差水平接近。结果表明,多角度观测条件下在山区更适合使用波段关系来估计地表反射信息,而在城区两者水平相当。

4 结 论

中国山区面积广大,地形地貌复杂多样,地形及地形引起的地表特性变化加大了卫星气溶胶反演的难度。本研究基于AERONET地基观测数据对比了MYD04 C6.1 DT、DB和GRASP/POLDER-3 AOD产品在中国非山区及山区的反演精度,并详细分析了兴隆和SACOL山区站点的精度差异,主要结论如下:

总体精度方面,MODIS AOD_DT和AOD_DB产品在非山区站点的精度差异不大,AOD_G产品在相关性和稳定性方面更优,但存在一定的高估现象。在山区的验证表明,三种算法的反演精度均存在下降趋势,高估程度明显增大,高估百分比分别为49.74%、38.50%和79.87%。

不同山区站点精度存在较大差异。坡度较小的SACOL站点三种产品的对比结果皆优于兴隆站点,C61 DT算法数据质量较高,但也存在30%的高估;而改进的C61 DB算法降低了高估程度(13.95%);AOD_G高估程度(64.55%)远高于AOD_DT和AOD_DB。兴隆站点三种产品的高估程度均在57%之上,表明地形起伏大的山区地表反射情况复杂,气溶胶反演算法受到严重制约。由于MODIS只能获取单一角度观测数据,使用DT和DB算法的AOD产品离散度较大,GRASP使用POLDER-3数据避免了这一情况,但GRASP产品高估程度相对较大。

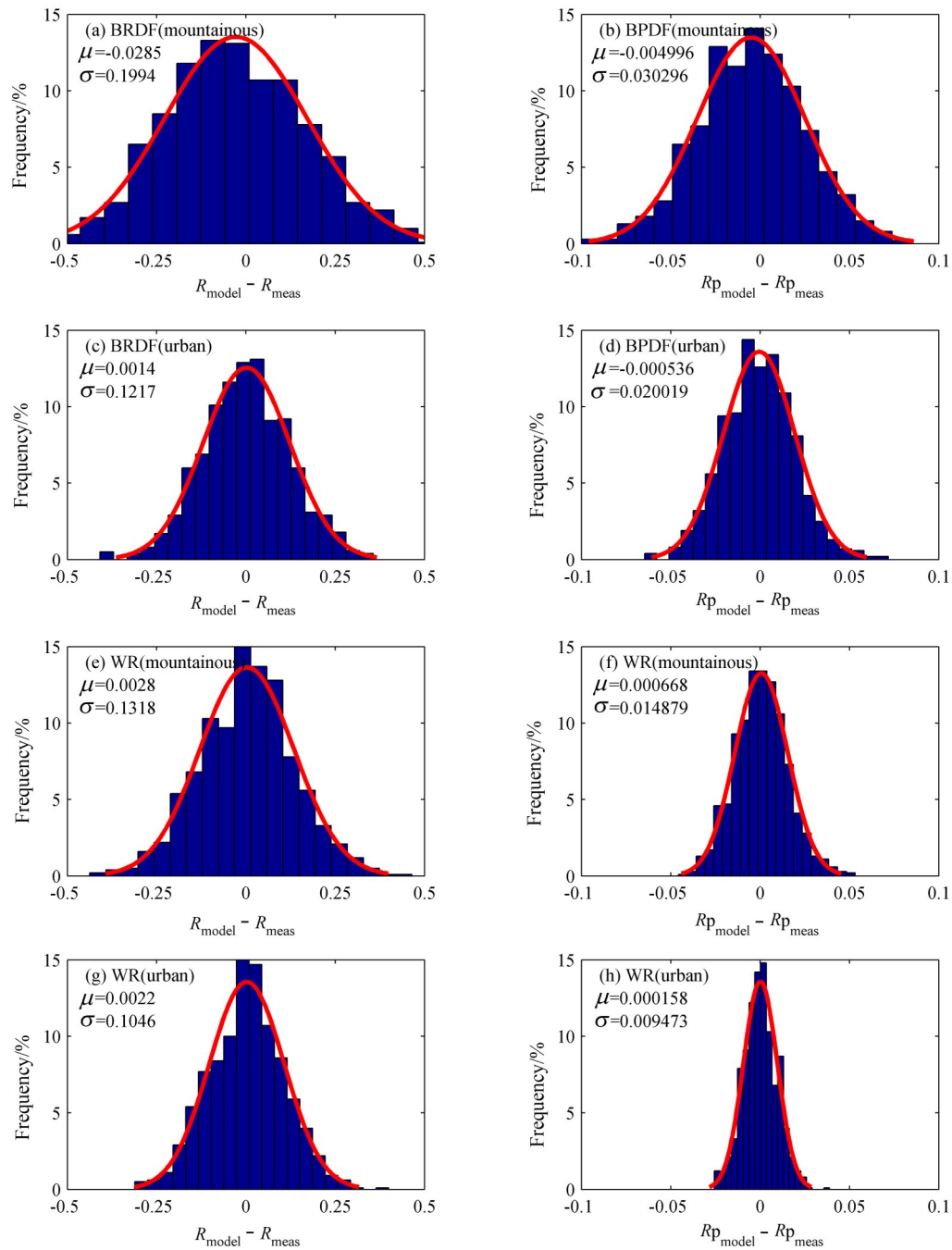


图 7 模拟值与观测值的残差分布直方图。(a) 山区 BRDF 模型模拟非偏反射率; (b) 山区 BPDF 模型模拟偏振反射率; (c) 城市 BRDF 模型模拟非偏反射率; (d) 城市 BPDF 模型模拟偏振反射率; (e) 山区波段关系模型模拟非偏反射率; (f) 山区波段关系模型模拟偏振反射率; (g) 城市波段关系模型模拟非偏反射率; (h) 城市波段关系模型模拟偏振反射率

Fig. 7 Histogram of residual distribution between simulated and observed values. (a) Simulation of non polarized reflectivity using BRDF model in mountainous areas; (b) simulation of polarized reflectivity using BPDF model in mountainous areas; (c) simulation of non polarized reflectivity using BRDF model in urban; (d) simulation of polarized reflectivity using BPDF model in urban; (e) simulation of non polarized reflectivity using wave relationship model in mountainous areas; (f) simulation of polarized reflectivity using wave relationship model in mountainous areas; (g) simulation of non polarized reflectivity using wave relationship model in urban; (h) simulation of polarized reflectivity using wave relationship model in urban

综上所述,在山区等起伏地表上空,基于BRDF模型和BPDF模型的GRASP算法反演多角度偏振数据时精度较高,但总体存在较大高估;基于地表反射波段关系的DT算法反演单角度数据准确度较高,但反演结果的相关性较差、离散度较大。在此基础上使用多角度观测信息对比两种地气解耦方法得到,山区BRDF模型和BPDF模型与观测值的方差均大于城区,城区BRDF模型和BPDF模型与波段关系模型误差接近,表明多角度观测条件下在山区更适合用波段关系来估计地表反射信息。此结论可为未来山区国产多角度偏振传感器DPC反演算法优化提供更加明确的方向,为提高山区DPC反演精度提供理论支撑。

致谢:感谢法国空间中心(CNES)提供的POLDER-3数据,本研究数据获取自https://download.grasp-cloud.com/download/polder/polder-3/high-precision/v1.2/l3/0.1_degree/网站。感谢NASA提供的MODIS AOD、SRTM DEM数据资料,本研究数据获取自<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>、<http://earthexplorer.usgs.gov>网站。感谢全球气溶胶自动观测网提供的AERONET数据,本研究数据获取自<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>网站。最后对运营维护各AERONET站点的科学家表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] Jin J N, Zhao W J, Yang X C, *et al.* Validation and temporal spatial distribution analysis of MODIS and Himawari-8 fine mode aerosol products in Asia [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(4): 1066-1085.
金国囡, 赵文吉, 杨兴川, 等. 亚洲地区MODIS和Himawari-8细模态气溶胶产品验证及其时空分布分析 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(4): 1066-1085.
- [2] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, *et al.* The MODIS 2.1 μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1286-1298.
- [3] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, 9(8): 1357-1381.
- [4] Hsu N C, Tsay S C, King M D, *et al.* Aerosol properties over bright-reflecting source regions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(3): 557-569.
- [5] Deuzé J L, Bréon F M, Deschamps P Y, *et al.* Analysis of the POLDER (POLarization and directionality of earth's reflectances) airborne instrument observations over land surfaces [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45(2): 137-154.
- [6] Duan M Z, Lv D R. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurements I: Theory and simulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(5): 757-765.
段民征, 吕达仁. 利用多角度POLDER偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演 I. 理论与模拟 [J]. 大气科学, 2007, 31(5): 757-765.
- [7] Sun X, Zhao H J. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol over land surface from POLDER data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1772-1777.
孙夏, 赵慧洁. 基于POLDER数据反演陆地上空气溶胶光学特性 [J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1772-1777.
- [8] Wang Z T, Chen L F, Li S S. The retrieval of AOD over land surfaces in China from PARASOL [J]. *Remote Sensing Information*, 2009, 24(6): 49-54.
王中挺, 陈良富, 李莘莘. 利用PARASOL数据反演陆地气溶胶光学厚度 [J]. 遥感信息, 2009, 24(6): 49-54.
- [9] Dubovik O, Smirnov A, Holben B N, *et al.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol

- Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D8): 9791-9806.
- [10] Dubovik O, Sinyuk A, Lapyonok T, *et al.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D11): D11208.
- [11] Dubovik O, Herman M, Holdak A, *et al.* Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(5): 975-1018.
- [12] Chen C, Dubovik O, Fuertes D, *et al.* Validation of GRASP algorithm product from POLDER/PARASOL data and assessment of multi-angular polarimetry potential for aerosol monitoring [J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3573-3620.
- [13] 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.
- [14] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, *et al.* Directional Polarimetric Camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 21-37.
- [15] Chen L F, Shang H Z, Fan M, *et al.* Mission overview of the GF-5 satellite for atmospheric parameter monitoring [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(9): 1917-1931.
陈良富, 尚华哲, 范萌, 等. 高分五号卫星大气参数探测综述 [J]. 遥感学报, 2021, 25(9): 1917-1931.
- [16] Hasekamp O P, Landgraf J. Retrieval of aerosol properties over land surfaces: Capabilities of multiple-viewing-angle intensity and polarization measurements [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3332-3344.
- [17] Wang H, Yang L K, Du W B, *et al.* Inversion of aerosol optical depth over land surface from airborne polarimetric measurements [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(4): 1019-1024.
王涵, 杨磊库, 都伟冰, 等. 航空偏振遥感数据反演陆地上空气溶胶光学厚度 [J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(4): 1019-1024.
- [18] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, *et al.* Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [19] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D13): D13211.
- [20] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, *et al.* Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(16): 9296-9315.
- [21] Dubovik O, Lapyonok T, Litvinov P, *et al.* GRASP: A versatile algorithm for characterizing the atmosphere [J]. *SPIE Newsroom*, 2014, 25: 1-4.
- [22] Li X, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: Effect of crown shape and mutual shadowing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 276-292.
- [23] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D18): 20455-20468.
- [24] Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, *et al.* Polarized reflectances of natural surfaces: Spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2642-2650.
- [25] Yan K, Li H L, Song W J, *et al.* Extending a linear kernel-driven BRDF model to realistically simulate reflectance anisotropy over rugged terrain [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-16.
- [26] Shu C M, Sun X B, Wang H, *et al.* Model optimization of didirectional polarization reflectance distribution function of land

- surface based on airborne polarimetric data [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11(2): 125-133.
- 舒存铭, 孙晓兵, 王涵, 等. 基于航空偏振数据的地表BPDF模型优化研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2016, 11(2): 125-133.
- [27] 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.
- [28] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET—A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(1): 1-16.
- [29] Che H Z, Zhang X Y, Chen H B, *et al.* Instrument calibration and aerosol optical depth validation of the China Aerosol Remote Sensing Network [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D3): D03206.
- [30] Che H Z, Xia X G, Zhao H J, *et al.* Spatial distribution of aerosol microphysical and optical properties and direct radiative effect from the China Aerosol Remote Sensing Network [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(18): 11843-11864.
- [31] 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.
- [32] Wang L. A brief introduction to US shuttle radar topography mission [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2000, (12): 38-40.
- 汪凌. 美国航天飞机雷达地形测绘使命简介 [J]. *测绘通报*, 2000, (12): 38-40.
- [33] Sayer A M, Hsu N C, Lee J, *et al.* Validation of SOAR VIIRS over-water aerosol retrievals and context within the global satellite aerosol data record [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(23): 13496-13526.
- [34] Sogacheva L, Popp T, Sayer A M, *et al.* Merging regional and global aerosol optical depth records from major available satellite products [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(4): 2031-2056.
- [35] Eck T F, Holben B N, Reid J S, *et al.* Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D24): 31333-31349.
- [36] Tan Y, Li E, Zhang Z, *et al.* Validation of POLDER-3/GRASP aerosol products using AERONET measurements over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 215: 116893.