



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目: 基于 DPC 的经验正交函数气溶胶细粒子光学厚度反演算法
作者: 李文杰, 王淑荣, 颜昌翔, 丁宁
网络首发日期: 2022-07-17
引用格式: 李文杰, 王淑荣, 颜昌翔, 丁宁. 基于 DPC 的经验正交函数气溶胶细粒子光学厚度反演算法[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220714.1159.079.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 DPC 的经验正交函数气溶胶细粒子光学厚度反演算法

李文杰^{1, 2}, 王淑荣^{4, 5**}, 颜昌翔^{1, 3*}, 丁宁^{1, 2}

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京, 100049;

³中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

⁴佛山科学技术学院物理与光电工程学院, 广东, 佛山, 528051;

⁵粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 广东, 佛山, 528051)

摘要 气溶胶细粒子是影响大气环境的重要因素, 因此研究气溶胶细粒子的光学厚度具有重要的意义。针对 GF-5 卫星搭载的 DPC 平台上气溶胶细粒子反演算法中半经验模型不适用于城市地表偏振反射率估算的问题。本文基于 DPC 的经验正交函数方法, 开展了气溶胶细粒子光学厚度反演研究。基于 MIE 散射计算气溶胶辐射贡献, 采用经验正交函数方法计算地表贡献, 利用多角度偏振数据以及矢量辐射传输方程, 反演气溶胶细粒子光学厚度。本研究反演结果与 MODIS 的气溶胶细粒子光学厚度产品分布趋势具有一致性; 与 AERONET 北京、香河、香港站点的测量结果进行定量对比, 相关系数: 0.97, 0.96, 0.9, 平均绝对误差为: 0.08, 0.07, 0.12, 均方根误差为: 0.12, 0.11, 0.17, 验证了算法的高精度与合理性; 最后呈现 2019 年中国部分地区的气溶胶细粒子光学厚度月平均数据, 并分析山东地区气溶胶细粒子光学厚度变化情况, 发现 6 月是全年最高的时期, 均值为 0.7。上述结果验证了本算法的可靠性, 可为 DPC 有效监测气溶胶的时空分布提供技术支持

关键字 多角度偏振探测仪; 反演; 地表偏振反射率; 气溶胶细粒子; 光学厚度

中国分类号 TP79 **文献标识码** A

Empirical Orthogonal Function Fine Particle Aerosol Optical Depth Inversion Algorithm Based on Directional Polarimetric Camera

Li Wenjie^{1, 2}, Wang Shurong^{4, 5**}, Yan Changxiang^{1, 3*}, Ding Ning^{1, 2}

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049;

³ Research Center for Materials and Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

⁴ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University of Science and Technology, Foshan, Guangdong, 528051;

⁵ Guangdong-Hong Kong-Macao Intelligent Micro-nano Photoelectric Technology Joint Laboratory, Foshan, Guangdong, 528051)

Abstract Aerosol fine particles are an important factor affecting the atmospheric environment, so

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFF0103603)、国家自然科学基金项目 (61805235)、国家自然科学基金项目 (61627819、61727818)、国家自然科学基金项目 (61875192)、国家自然科学基金项目 (6187030909)、吉林省科技发展计划资助项目 (20180201012GX)、中科院 STS 计划项目 (No. KFJ-STSCYD-212、No. KFJ-STSZDP-049、No. KFJ-STSZDP-057)、长春光机所-复旦大学合作基金 (Y9R633A190)、粤港澳智能微纳光电技术联合实验室研究基金 (No. 2020B1212030010)

共同通信作者: *E-mail: yanx0128@126.com; **E-mail: swang@ciomp.ac.cn

it is of great significance to study the optical thickness of aerosol fine particles. Aiming at the problem that the semi-empirical model in the aerosol fine particle retrieval algorithm on the DPC platform carried by the GF-5 satellite is not suitable for the estimation of urban surface polarization reflectance. In this paper, based on the empirical orthogonal function method of DPC, the inversion of the optical thickness of aerosol fine particles is carried out. The aerosol radiative contribution is calculated based on MIE scattering, the surface contribution is calculated by the empirical orthogonal function method, and the optical thickness of aerosol fine particles is inverted by using the multi-angle polarization data and the vector radiative transfer equation. The inversion results of this study are consistent with the MODIS distribution trend of aerosol fine particle optical depth products; quantitatively compared with the measurement results of AERONET Beijing, Xianghe, and Hong Kong stations, the correlation coefficients are: 0.97, 0.96, 0.9, and the mean absolute error is : 0.08, 0.07, 0.12, the root mean square error is: 0.12, 0.11, 0.17, which verifies the high precision and rationality of the algorithm; finally, the monthly average data of aerosol fine particle optical thickness in some areas of China in 2019 are presented, and the analysis of Shandong The variation of optical thickness of regional aerosol fine particles shows that June is the highest period of the year, with an average value of 0.7. The above results verify the reliability of the algorithm and provide technical support for DPC to effectively monitor the spatiotemporal distribution of aerosols

Keywords directional polarimetric camera; inversion; surface polarization reflectivity; aerosol fine particles; optical depth

1 引言

气溶胶是指悬浮在气体介质中的固态或液态颗粒所组成的气态分散系统,通过直接或间接的方式影响地球的辐射收支平衡,导致大气环境和大气气候的变化,是影响遥感数据量化应用的重要因素^[1]。

目前,探测气溶胶光学厚度的方法主要有两种:地基遥感和卫星遥感。地基遥感具有数据准确、及时、连续的优点,不足之处在于无法对空间大尺度气溶胶光学厚度进行监测。而卫星遥感具备对全球范围的气溶胶光学厚度进行探测的优势,因此卫星遥感技术在国内外得到广泛的研究。目前,具备反演气溶胶细粒子光学厚度及其物理光学特性的卫星探测器,主要包括美国中分辨率成像仪(MODIS)、法国多角度偏振地球反射率探测仪(POLDER)^[2,3]以及中国气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)^[4,5]。

DPC 平台上气溶胶细粒子光学厚度反演算法中地表偏振反射率常采用半经验模型^[6]方法进行估算,该方法存在三点问题,一是:半经验模型参数是通过大量的数据给出的经验系数,将此模型和 Bréon 物理模型、Maignan 单参数模型在三个典型地表类型(森林、草原、沙漠)上进行对比^[7],证明了半经验模型参数并非最佳参数,意味着采用半经验模型参数并不能总是很好地估算地表偏振反射率;二是:在半经验模型中依据低植被的模型参数分别计

算城市、草原的地表偏振反射率，综合上述第一点模型参数存在问题，因此存在低植被的模型参数并不能正确反应城市地表的地表偏振反射率问题。三是：引入 MODIS-MCDQ1 中的 IGBP 地表分类产品数据，需要进行像元的匹配，会带来误差。因此综合上述三点，采用半经验模型的方法并不能正确反映城市的地表偏振反射率。

多角度传感器 (MISR) 官方算法中针对非均一地表类型，利用经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 方法估算地表反射率，该方法具有不受地表类型的限制的优点，因此 zhang 在 POLDER 平台上引入经验正交函数方法提高气溶胶总光学厚度反演精度^[8]。考虑到 DPC 的偏振数据与 MISR、POLDER 的标量数据同样具有多角度特性，并且偏振信息和标量信息都包含大气程辐射信息和地表辐射信息，因此本文将重点探究如何利用 EOF 方法从 DPC 的多角度偏振反射率数据中获取地表偏振反射率，从而提供了一种在不依赖外部数据库的情况下计算城市地表偏振反射率的方法。

针对上述的分析，本文将分为 4 节研究内容。第 1 节重点介绍 DPC 的气溶胶细粒子光学厚度反演算法存在问题以及提出解决方案；第 2 节推导经验正交函数方法估算地表偏振反射率的原理，并分析经验正交函数在 DPC 平台上的应用；第 3 节呈现本研究的反演结果，并且与 MODIS 产品进行直观对比、与 AERONET 站点数据进行定量对比、展现华北地区的气溶胶细粒子光学厚度月平均数据以及分析山东地区气溶胶细粒子光学厚度变化情况。第 4 节为本研究总结。

2 反演原理

图 1 为本研究反演流程图，主要分为 3 部分内容。第 1 部分是 DPC 数据的预处理，主要对 DPC 数据进行云识别以及散射角度判断，获得本研究的多角度偏振数据以及观测几何。第 2 部分是本研究的算法流程，主要是计算气溶胶细粒子偏振反射率、大气分子的偏振反射率以及地表偏振反射率。利用 MIE 散射原理，引入气溶胶细粒子谱分布，计算气溶胶细粒子偏振反射率；利用经验公式^[9]计算大气分子偏振反射率；利用预处理后的多角度偏振数据，构建协方差矩阵，获得 EOF，计算出地表偏振反射率。第 3 部分是气溶胶细粒子光学厚度的获取，依据第 1, 2 部分内容获得表观偏振反射率模拟值和观测值，计算 RMSE 系数，选最小的 RMSE，获得最佳的气溶胶细粒子光学厚度。依据上述分析，2.1 节将推导基于偏振数据的经验正交函数方法，2.2 节将阐述 DPC 平台上经验正交函数方法的应用流程，2.3 节获取气溶胶细粒子光学厚度。

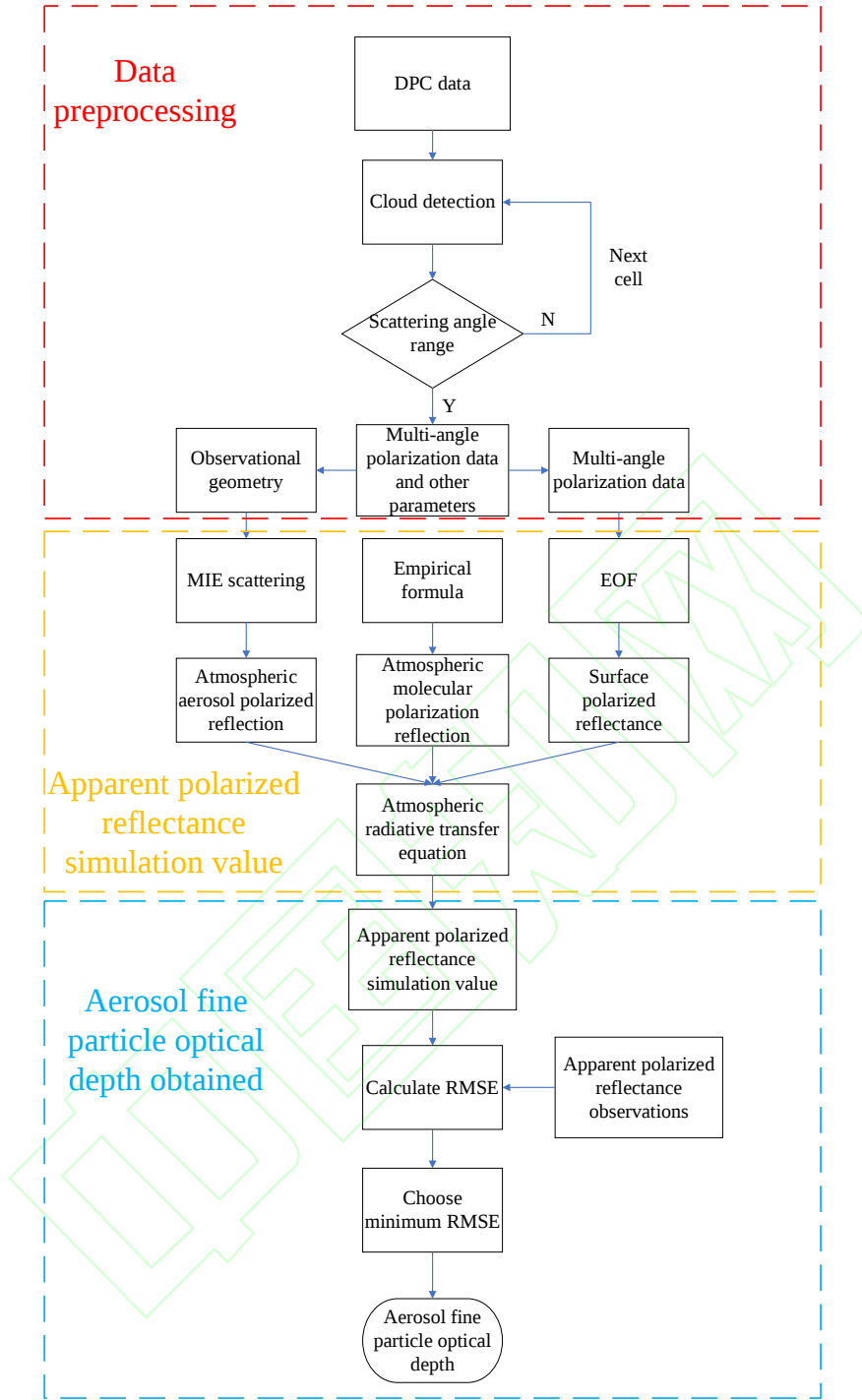


图 1 气溶胶细粒子光学厚度反演流程

Fig. 1 Process of inversion of optical thickness of aerosol fine particles

2.1 经验正交函数方法

卫星传感器接收到的表观偏振反射率^[10,11]可以简化为:

$$R_{p,\lambda}^{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi) = R_{p,\lambda}^{atm}(\theta_s, \theta_v, \phi) + R_{p,\lambda}^{surf}(\theta_s, \theta_v, \phi) \quad (1)$$

其中, $R_{p,\lambda}^{atm}$ 是大气的程辐射偏振贡献, $R_{p,\lambda}^{surf}$ 是地表偏振辐射项。在假设 17.6km 范围内的大气（大气和气溶胶）性质相同情况下, 用 17.6km 空间范围内的地表偏振辐射项均值来代替每个像元的实际的地表辐射项, 结合（1）式可得每个像元对应角度下减少的偏振反射率为:

$$J_{\lambda,x,y} = R_{p,\lambda}^{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi) - \langle R_{p,\lambda}^{TOA}(\theta_s, \theta_v, \phi) \rangle = R_{p,\lambda}^{surf}(\theta_s, \theta_v, \phi) - \langle R_{p,\lambda}^{surf}(\theta_s, \theta_v, \phi) \rangle \quad (2)$$

其中, $J_{\lambda,x,y}$ 代表每个像元对应角度下减少的偏振反射率, x, y 代表图像上像元的位置;

$R_{p,\lambda}^{TOA}$ 为单个像元的表观偏振反射率; $\langle R_{p,\lambda}^{TOA} \rangle$ 为 17.6km 像元范围内表观偏振反射率均值;

$R_{p,\lambda}^{surf}$ 为单个像元的地表偏振反射率; $\langle R_{p,\lambda}^{surf} \rangle$ 为 17.6km 像元范围内的地表偏振反射率均值。

定义散射矩阵（协方差矩阵）为:

$$C = \begin{bmatrix} C_{\lambda,1,1} & \dots & C_{\lambda,1,N_{cam}} \\ \dots & & \dots \\ C_{\lambda,N_{cam},1} & \dots & C_{\lambda,N_{cam},N_{cam}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_{\lambda,i,j} = \sum_{x,y} J_{\lambda,x,y}(i) \cdot J_{\lambda,x,y}(j) \quad i, j = 1, 2, \dots, N_{cam} \quad (4)$$

其中, i, j 代表对应的第 N 个观测方向, 设定 N 最大观测角度为 9。最后构建出 9×9 的协方差矩阵 $C_{\lambda,i,j}$, 其对角线的值表示对应角度下地表偏振辐射项的方差, 即表示对应角度下所有像元的地表偏振辐射项与地表偏振辐射均值的离散程度; 协方差矩阵中的其余元素则代表的是不同角度之间地表偏振辐射项的相关性。

通过公式（3）（4）可发现, 构成散射矩阵 $C_{\lambda,i,j}$ 的原始数据由表观偏振反射率 $R_{\lambda,p}^{TOA}$ 变成了地表偏振辐射项 $R_{p,\lambda}^{surf}$ 。这一步巧妙之处在于, 在基于 17.6km 内大气性质相同的假设, 得到（2）式, 最终得到构建散射矩阵 $C_{\lambda,i,j}$ 的元素: 差值 $J_{\lambda,x,y}$, 且这一元素可由地表偏振辐射项 $R_{p,\lambda}^{surf}$ 构成。也就是说, 通过求协方差矩阵 $C_{\lambda,i,j}$ 的特征向量, 可以求得地表偏振辐射项 $R_{p,\lambda}^{surf}$ 的大小。

先假设只有一个特征向量, 即代表着矩阵只存在一个特征值和特征向量。在物理层面上, 该算法中一个特征向量是代表着仅有一种地表类型, 即 17.6km 空间范围内, 用一种地表类型描述地表偏振辐射项, 则同一角度下每个像元的地表偏振辐射项之间成比例关系。用图 2

描述, $R(i)$ 是特定观测角度下地表偏振辐射项的基准, $aR(i) \sim jR(i)$ 表示特定观测角度下不同像元的地表偏振辐射项的值。

$aR(i)$	$bR(i)$	$cR(i)$
$dR(i)$	$eR(i)$	$fR(i)$
$gR(i)$	$hR(i)$	$jR(i)$

图2 像元地表辐射项

Fig. 2 Pixel surface radiation term

由此可知地表偏振辐射项的平均值:

$$\langle R_{p,\lambda}^{surf}(i) \rangle = \frac{a+b+c+d+e+f+h+j}{9} R(i) = qR(i) \quad (5)$$

$$R(i) = pf_1(i) \quad (6)$$

其中 $f_1(i)$ 表示第一个特征向量的第 i 的值。因此 (6) 代入 (5), 表示为:

$$\langle R_{p,\lambda}^{surf}(i) \rangle = qp f_1(i) = A_1 f_1(i) \quad (7)$$

此时 A_1 就是贯穿特征向量和地表偏振辐射项的系数, 根据 (1) 式, 可知:

$$\langle R_{p,\lambda}^{surf}(i) \rangle = \langle R_{p,\lambda}^{TOA}(i) \rangle - R_{p,\lambda}^{atm}(i) \quad (8)$$

则有:

$$\begin{cases} A_1 f_1(1) = \langle R_{p,\lambda}^{TOA}(1) \rangle - R_{p,\lambda}^{atm} \\ A_1 f_1(2) = \langle R_{p,\lambda}^{TOA}(2) \rangle - R_{p,\lambda}^{atm} \\ \vdots \\ A_1 f_1(n) = \langle R_{p,\lambda}^{TOA}(n) \rangle - R_{p,\lambda}^{atm} \end{cases} \quad (9)$$

在 (9) 的两边同时乘以 $f_1(i)$, 由于规定了特征向量是单位化的, 即

$$f_1^2(1) + f_1^2(2) + \dots + f_1^2(n) = 1, \quad (9) \text{ 式中各式相加, 可得 } A_1:$$

$$A_{1,\lambda} = \sum_{i=1, N_{max}} \left[R_{p,\lambda}^{TOA}(i) - R_{p,\lambda}^{atm}(model, \tau, i) \right] \cdot f_{1,\lambda}(i) \quad (10)$$

其中 $R_{p,\lambda}^{atm}(model, \tau, i)$ 是对应气溶胶模型 $model$ 、对应光学厚度 τ 下、对应角度下 i 的大气程辐射项。

对于多个特征向量的情况，即多个地表类型，对应角度下的地表辐射项平均值必由多个特征向量进行线性组合求得，即下式表达：

$$\langle R_{p,\lambda}^{surf}(i) \rangle = \sum_{n=1}^{N_{max}} A_n f_n(i) \quad (11)$$

其中 $A_{n,\lambda}$ 表达：

$$A_{n,\lambda} = \sum_{i=1, N_{max}} \left[R_{p,\lambda}^{TOA}(i) - R_{p,\lambda}^{atm}(model, \tau, i) \right] \cdot f_{n,\lambda}(i) \quad (12)$$

在 17.6km 空间范围内的非均一地表类型，即存在多个特性向量，通过（13）选择合适的特性向量：

$$\xi_{n1} \leq 2\xi_{n_{cam},\lambda} \leq \xi_{n1-1,\lambda} \quad (13)$$

其中 ξ 为特征值，n1 为特征向量使用个数， n_{cam} 表示特征向量从小到大排列后对应特征向量的位置。

之后通过（2）式的差值 $J_{\lambda,x,y}(i)$ ，求得在地表偏振辐射项，如下式表达：

$$R_{p,\lambda}^{surf}(i) = J_{\lambda,x,y}(i) + \langle R_{p,\lambda}^{surf}(i) \rangle \quad (14)$$

2.2 经验正交函数在 DPC 平台上的应用

依据上述算法原理，针对本研究中的 DPC 大视场观测优势及其遥感数据产品的特点，一是 DPC 平台上多角度偏振数据的有效观测角度数多；二是 DPC 平台上的 level1 级产品空间分辨率较高为 3.29km。因此，将经验正交函数方法运用在 DPC 的平台上时，需要做出相应的调整：

（1）观测角度数的问题。本研究利用 DPC 平台的多角度偏振数据反演城市上空的气溶胶细粒子光学厚度。在特定散射角度范围内，偏振数据主要来源于由气溶胶细粒子偏振贡献。因此依据 AERONET 在北京站点的气溶胶细模态和粗模态的气溶胶谱分布参数，如表 1 所示。利用 MIE 散射理论，引入正态谱分布函数，分析气溶胶的偏振相函数随着散射角度的变化情况。

表 1 气溶胶尺度谱仿真参数
Table1 Simulation parameters of aerosol scale spectrum

Aerosol modalities	m_r	m_i	$V(\mu m^3 \mu m^{-2})$	$r_g(\mu m)$	σ
Fine mode	1.44	0.011	0.075	0.25	0.45
Coarse mode	1.55	0.003	0.018	2	0.6

由图 3 可知，在散射角度 50° 时，气溶胶细模态的偏振相函数达到最大为 0.33，而粗模态偏振相函数为 -0.11。在散射角度为 $60^\circ \sim 140^\circ$ 时，细模态的偏振相函数均高于粗模态的偏振相函数，但是在散射角 $120^\circ \sim 140^\circ$ 时，随着散射角度的增加，细模态和粗模态偏振相函数的差值逐渐减小，即二者逐渐接近；在散射角 $75^\circ \sim 120^\circ$ 时，细模态的偏振相函数值均大于 0.1，而粗模态偏振相函数在 0.01 浮动，此时忽略粗模态的偏振相函数是合理。因此本研究中选择散射角为 $75^\circ \sim 120^\circ$ 的观测角度。

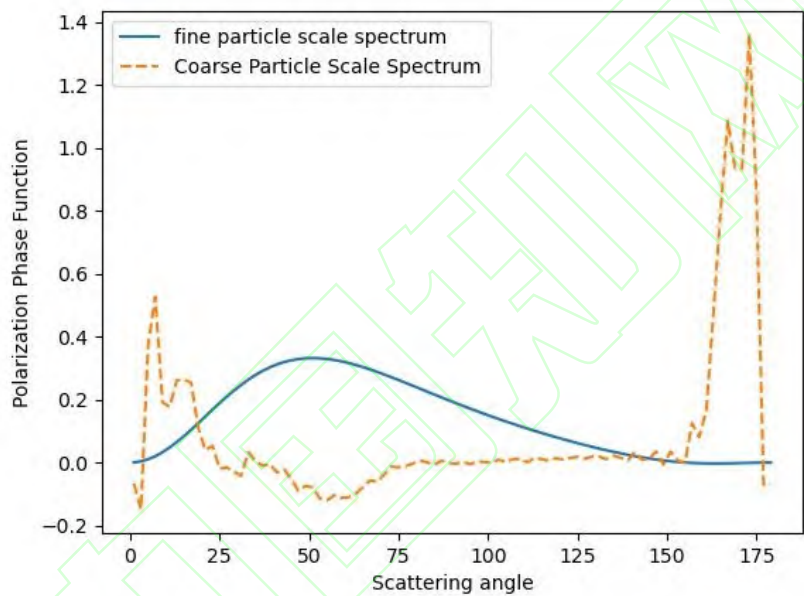


图 3 散射角与偏振相函数变化曲线

Fig. 3 Variation curve of scattering angle and polarization phase function

(2) 空间分辨率的差异。在经验正交函数原理中是以假设一定空间范围内的大气性质保持一致为前提，即在这种空间范围内，每个像元的大气程辐射保持不变。若大气不均一的情况下，可能低估或者高估地表辐射的贡献，因此针对此假设为前提就尤为重要了。MISR 官方算法中使用了 17.6km 作为反演窗口，说明 17.6km 可以作为大气均一的研究假设，由于 DPC 数据的空间分辨率为 3.29km，因此在 DPC 平台上使用 5×5 的像元范围。

2.3 气溶胶细粒子光学厚度获取

根据 2.1 节和 2.2 节，利用 DPC 平台上多角度偏振数据计算地表偏振反射率后，通过设定气溶胶细粒子谱分布（ $N=25$ ），迭代气溶胶细粒子光学厚度，可获得 25 个 RMSE 系数，选择最小的 RMSE，将得到最佳的气溶胶细粒子光学厚度，RMSE 表达如下：

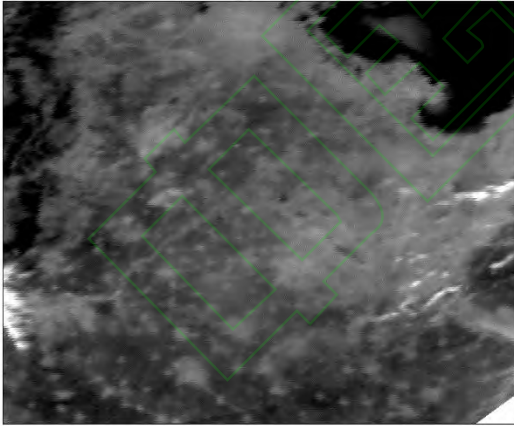
$$RMSE_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^k (R_{p_cal_n_i} - R_{p_means_n_i})^2}{k}}, i = 1 \sim N \quad (15)$$

其中 K 为选择的观测角度数， $R_{p_cal_n_i}$ 为表观偏振反射率模拟值， $R_{p_means_n_i}$ 为表观反射率的真实值。

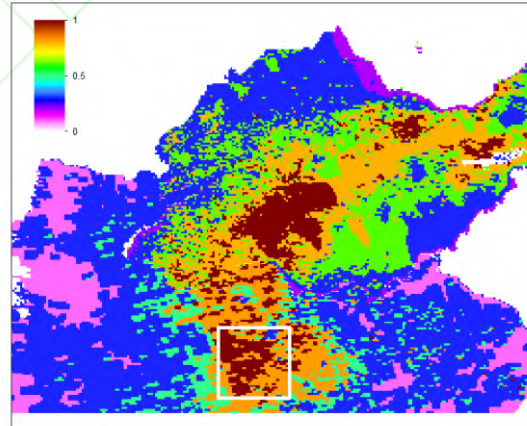
3 验证与分析

3.1 与 MODIS 产品直观对比

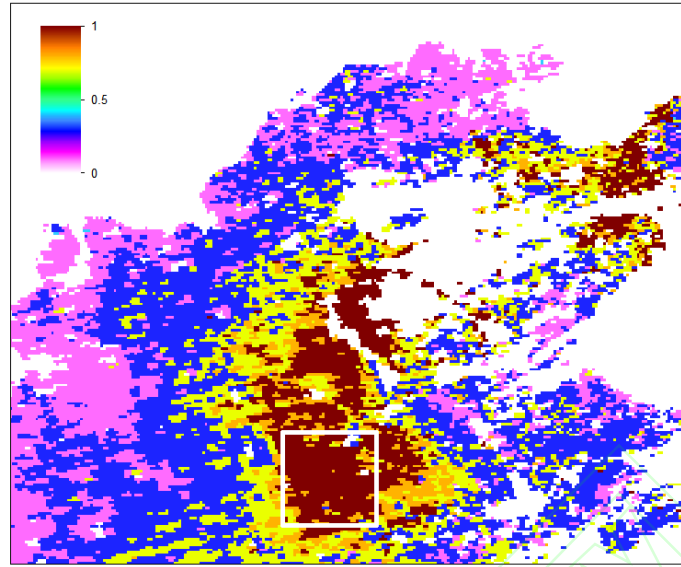
本节针对中国部分地区的 DPC 轨道数据进行气溶胶细粒子光学厚度反演。选择 2019 年 3 月 25 号 DPC 经过中国的单轨道数据和同一时期的 MODIS-MYD04 的气溶胶细粒子光学厚度产品数据进行直观对比，如下图所示。



(a) 490nm 辐射强度图



(b) 本研究气溶胶细粒子光学厚度图



(c) MYD04 的气溶胶细粒子光学厚度图

图 4 490nm 辐射强度图和气溶胶细粒子光学厚度图

Fig. 4 490nm radiation intensity map and aerosol fine particle optical thickness map

(b) 是本文反演结果，(c) 是 MYD04 的结果。然而 MYD04 产品中存在空缺值，是由于二方面原因产生的，一方面：MYD04 产品的是暗目标算法计算出来的结果，以至于在地表反射率高的地表缺少反演数据，从而导致出现空缺值；另一方面：MYD04 产品部分像元值为 0，这是由于在 MYD04 产品中无细粒子气溶胶情况。针对上述分析，本研究的反演算法，一方面：利用多角度偏振数据自身的相关性，计算气溶胶细粒子光学厚度，并不依赖地表的类型，在高反射率地表，也能得到气溶胶细粒子光学厚度；另一方面：部分像元点在 MYD04 产品中像元值为 0，但是 DPC 数据中存在对应的数据。因此在 MYD04 产品中的空缺值，本研究算法依旧存在相应的数据。

(c) 图 MYD04 的从西到东的气溶胶细粒子光学厚度呈现先升高再降低的趋势，并且在中部的交汇处气溶胶细粒子光学厚度较大（大于 0.7）。在 (b) 图本文反演结果也能凸显从西到东气溶胶细粒子光学厚度先升高再降低的趋势，并且在中部处气溶胶细粒子光学厚度较大（大于 0.7），与 (c) 图趋势一致，验证本算法结果的合理性。图 (b) 是本文反演结果虽然大体上与 MYD04 产品在空间分布上具有一致性，但是在数值上，二种结果仅只有白色框内的数据具有较好的一致性，误差平均值为：0.15。

3.2 与 AERONET 定量对比

本研究选取三个在中国长期观测的 AERONET 站点用于反演结果的验证工作。三个 AERONET 站点分别为：北京（ $116.381^{\circ}\text{E}, 39.977^{\circ}\text{N}$ ）、香河（ $116.962^{\circ}\text{E}, 39.745^{\circ}\text{N}$ ）、香港（ $114.180^{\circ}\text{E}, 22.303^{\circ}\text{N}$ ）。在空间匹配方面，本研究利用这三个站点经纬度为基准，读取与基准经纬度差值小于 0.5° 的全部像元^[12]，从中筛选出有效值 AOD_f 的像元，并取 AOD_f 平均值，以此值来与 AERONET 有效值进行对比。在时间匹配方面，选择卫星过境前后 30min 内的 AERONET 数据^[13]。在波段匹配方面，AERONET 基站的数据只有 500nm 波段下存在气溶胶细粒子光学厚度产品，为更靠近 AERONET 基站数据的波段，利用 DPC 的 490nm 波段数据进行反演。

(1) AERONET 北京站的验证结果

北京地区的验证，选择 2019 年的 3 月~12 月的 AERONET 北京站点的气溶胶细粒子光学厚度（ AOD_f ）数据。将本算法反演结果与 AERONET 站点数据进行相关性拟合，如图 5 所示。本文的 DPC 数据反演结果与 AERONET 的 AOD_f 均值为分别 0.5、0.46，并由图 5 可知，二者数据变化趋势保持一致性，相关系数可达 0.97，平均绝对误差为 0.08，均方根误差为 0.1205，且斜率为 0.95，接近于 1， AOD_f 的值分布在直线两侧。证明了本文结论的合理性。

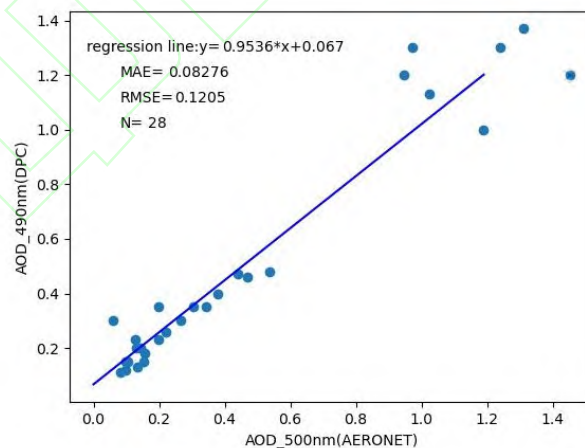


图 5 北京站点的数据对比

Fig. 5 Data comparison of Beijing site

(2) AERONET 香河站的验证结果

香河地区的验证, 选择 2019 年的 3~4 月和 6 月~8 月的 AERONET 站点的 AOD_f 数据。将本算法反演结果与 AERONET 站点数据进行相关性拟合, 如图 6 所示。本文的 DPC 数据反演结果与 AERONET 的 AOD_f 均值为分别 0.5、0.48, 并且由图 6 可知, 二者变化趋势保持一致性, 相关系数为 0.96, 平均绝对误差为 0.07, 均方根误差为 0.1105, 且斜率为 0.89, AOD_f 的值分布在直线两侧。证明了本文结论的合理性, 但是从图中可发现, 在 AOD_f 气溶胶细粒子光学厚度较大时 (大于 1.5) 反演存在较大的误差。

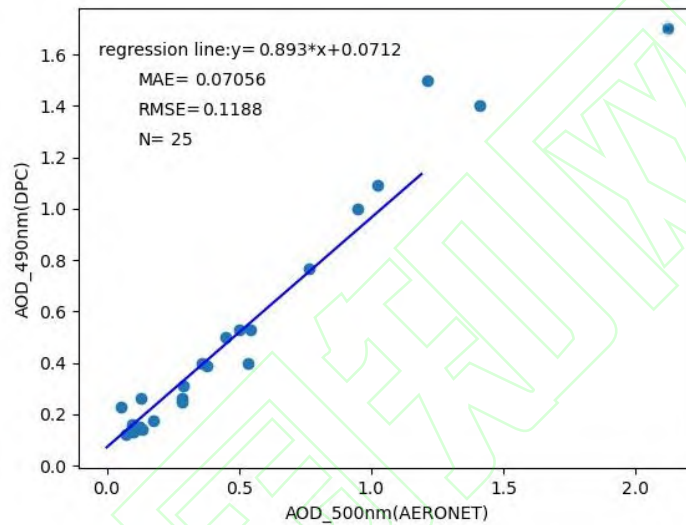


图 6 香河站的数据对比

Fig. 6 Data comparison of Xianghe Station

(3) AERONET 香港站的验证结果

香港地区的验证, 选择 2019 年的 3~4 月和 7 月~10 月的 AERONET 站点的 AOD_f 数据。将本算法反演结果与 AERONET 站点数据进行相关性拟合, 如图 7 所示。本文的 DPC 数据反演结果与 AERONET 的 AOD_f 均值为分别 0.7、0.67, 相关系数达 0.90, 平均绝对误差为 0.12, 均方根误差为 0.17, 且从图中看出斜率为 0.90。香港地区的定量对比结果中虽然数据相关系数达到 0.9, 但是平均绝对误差和均方根误差较大, 并反演的结果普遍大于 AERONET 的 AOD_f 。针对此结果做进一步分析, 这是由于香港属于水陆混合的地表类型, 因此在反演香港地区的 AOD_f 时, 并没有对像元进行海陆区分, 而在利用经验函数方法, 估算地表偏振反射率时, 需要用到气溶胶谱分布, 但是本研究的气溶胶谱分布仅适用于陆地, 因此会对地表偏振反射率的估算带来影响。本研究认为这是造成误差 (平均绝对误差、均方根误差) 较大的原因。

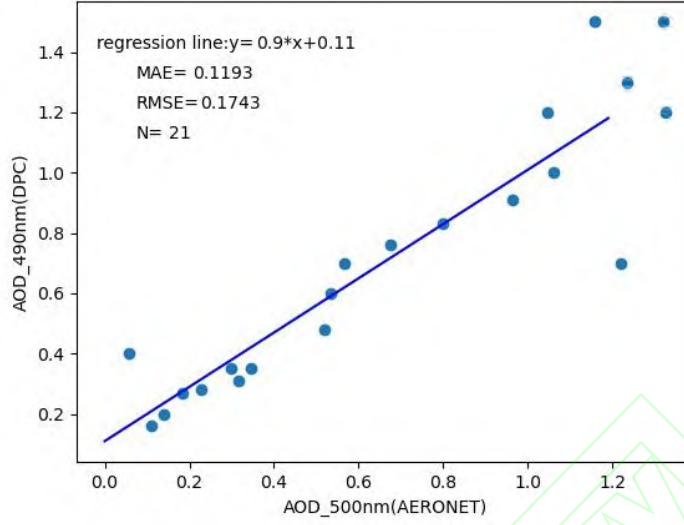


图 7 香港站的数据对比

Fig. 7 Data comparison of Hong Kong station

(4) 误差分析

针对 (1)、(2)、(3) 的反演结果进行误差分析，主要源于偏振辐射定标误差、气溶胶类型参数误差。

偏振辐射定标误差，DPC 传感器的辐射 L 测量的相对不确定性在到之间 2%到 5%^[14]，本研究设定 5%，即 $\frac{\partial L}{L} = 0.05$ ，对于偏振测量，线性偏振度的不确定性用下式表示：

$$\partial_{DOLP} = 0.01 + 0.01 \times DOLP \quad (16)$$

其中 $DOLP$ 是线偏振度，由此可得偏振辐射亮度的绝对误差 ∂_{L_p} ：

$$\partial_{L_p} = L_p \times \frac{\partial L}{L} + L \times \partial_{DOLP} \quad (17)$$

在引入偏振辐射亮度误差后，对本算法结果产生 7.5%的误差影响。

气溶胶类型参数误差，在本研究算法中计算地表偏振反射率需要使用气溶胶类型，即气溶胶类型参数误差会影响地表偏振反射率，因此针对气溶胶类型参数误差进行研究。本研究使用 POLDER 官方的气溶胶细粒子谱分布参数^[15]，如表 2 所示。在表中设定了气溶胶细粒子标准差 σ 为定量 0.4，因此将探究标准差的误差对本算法结果产生的影响。研究 2019 年 3 月到 12 月北京和香河站点的气溶胶细粒子标准差的月平均数据，发现标准差的波动范围 0.04 到 0.1。因此标准差引入 0.05 的误差量后，对本算法结果产生 24%的误差影响。

表 2 气溶胶细粒子的谱分布参数
Table 2 Spectral distribution parameters of aerosol fine particles

Parameter	Value
m_r	1.45
m_i	0.01
r_g	0.05-0.15, 间隔 0.01
σ	0.40

将本研究的算法与 DPC 平台上的 OGRM 方法^[12]进行对比。基于 DPC 多角度数据，引入偏振定标误差和标准差误差后，得到对 2 种算法结果产生的误差影响，如表 3 所示。在引入偏振定标误差后，对本研究算法结果产生 7.5%的误差影响，接近于对 OGRM 算法结果产生 7.3%的误差影响；在引入气溶胶谱分布参数误差后，对本研究的算法结果产生 24%的误差影响，小于对 OGRM 算法结果产生 28%的误差影响，说明相比于 OGRM 算法，本研究算法在引入气溶胶谱分布参数误差后产生的计算误差更小。

表 3 偏振定标误差和标准差误差对算法结果产生的误差影响
Table 3 Influence of Polarization Calibration Error and Standard Deviation Error on Algorithm Results

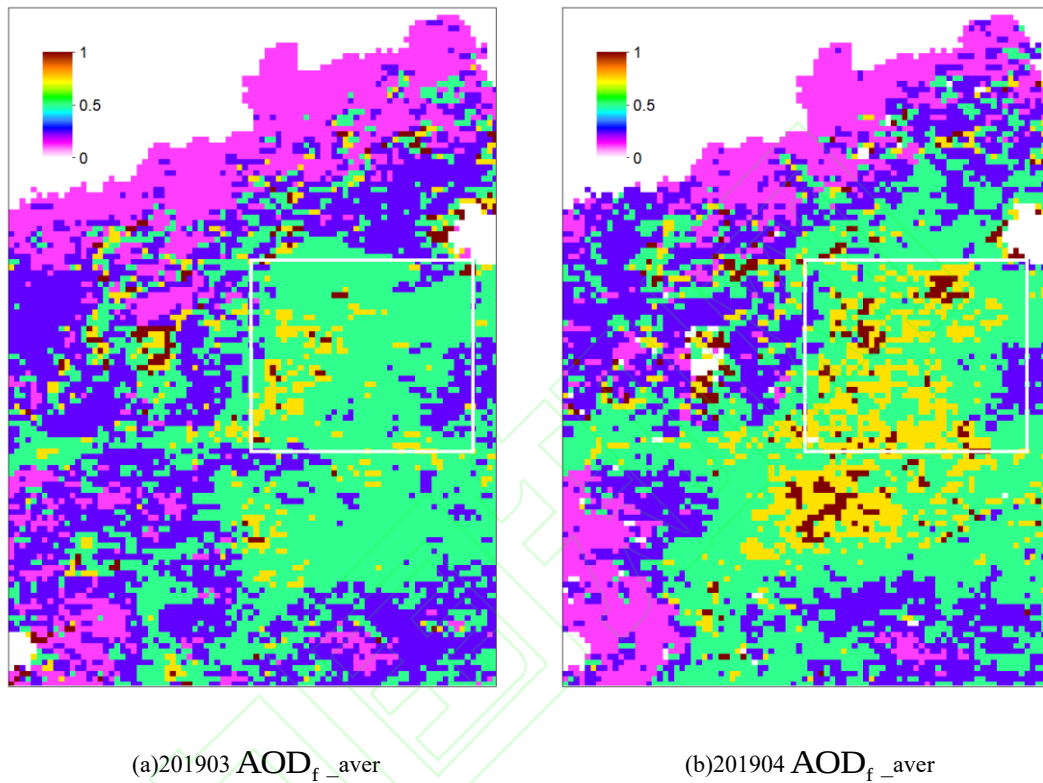
Algorithm	Calibration error	standard deviation error
The inversion algorithm used in this study	7.5%	24%
OGRM	7.3%	28%

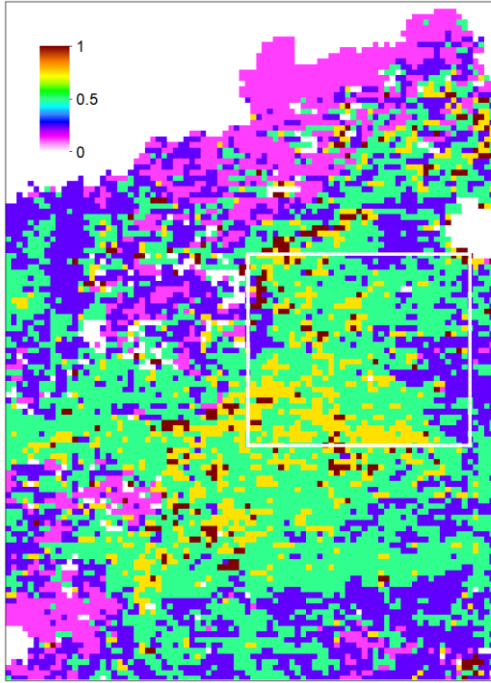
由表 3 可知，气溶胶类型误差相比于偏振定标误差会引入更多的气溶胶细粒子光学厚度误差量，进一步证明了（3）中气溶胶类型的误差是导致平均绝对误差、均方根误差的主要原因。因此，在气溶胶细粒子光学厚度反演工作中，要尽可能使用最能代表当地气溶胶状态的气溶胶类型参数。

在考虑了以上误差造成了本算法结果偏离 AERONET 站点 AOD_f 结果的情况以外，二者数据的定量对比结果仍然会存在差异，像 AERONET 站点反演算法本身也会存在一定的计算误差，而偏离实际情况；另外站点数据的采集时间与 DPC 数据的拍摄时间不同，两个时间点的 AOD 也会有一定差异，从而形成不同的反演结果，这是由于 AERONET 站点并不是时时进行观测，受限于当时的环境情况，例如存在较多的云的情况下，AERONET 不能得到卫星过境时间点的相应数据。

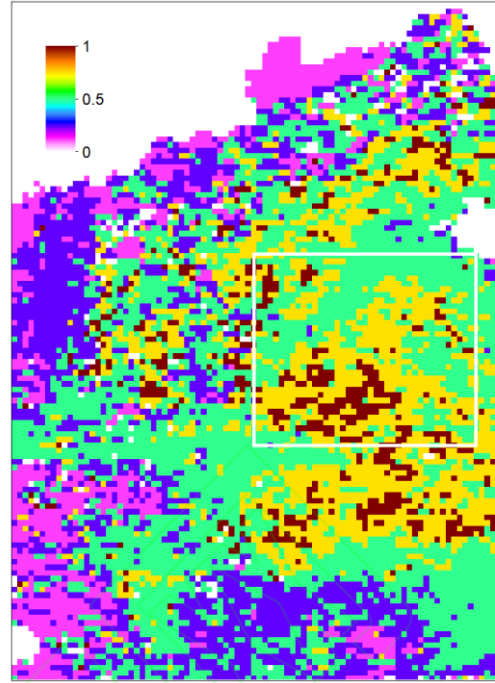
3.3 中国部分地区的气溶胶细粒子光学厚度月平均数据

本研究利用 2019 年 DPC 的有效数据反演了中国部分地区的气溶胶细粒子光学厚度数据，并合成月平均数据。需要指出的是：在高分应用综合信息服务平台上缺乏 2019 年 1 月到 3 月反演区域的有效数据，因此仅合成了 2019 年 3 月到 12 月的气溶胶细粒子光学厚度月平均数据，如图 8 所示。

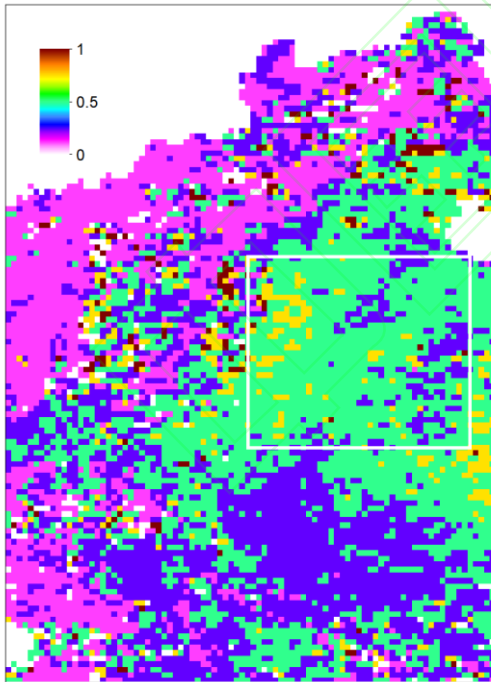




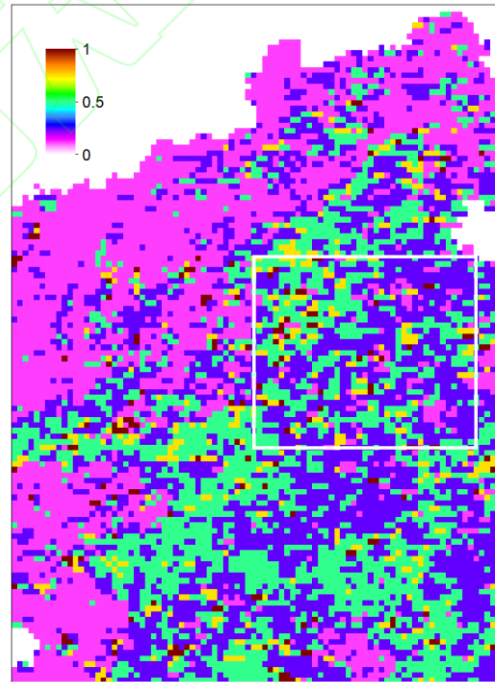
(c)201905 AOD_f_aver



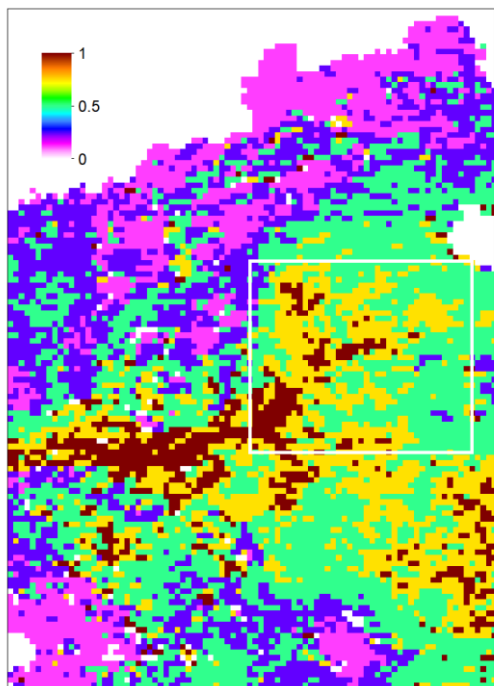
(d)201906 AOD_f_aver



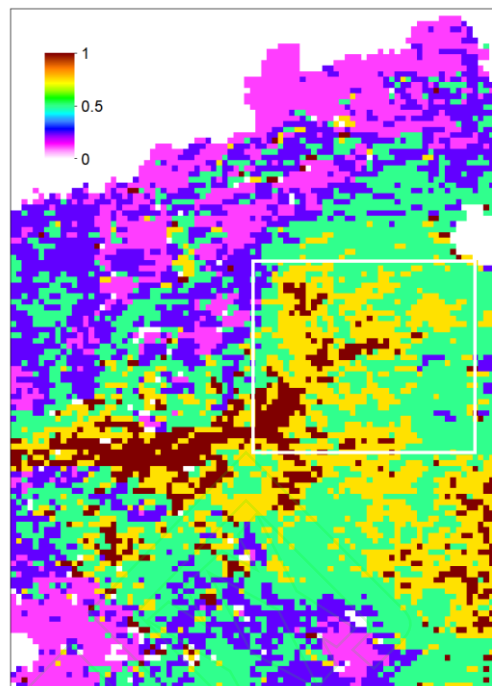
(e)201907 AOD_f_aver



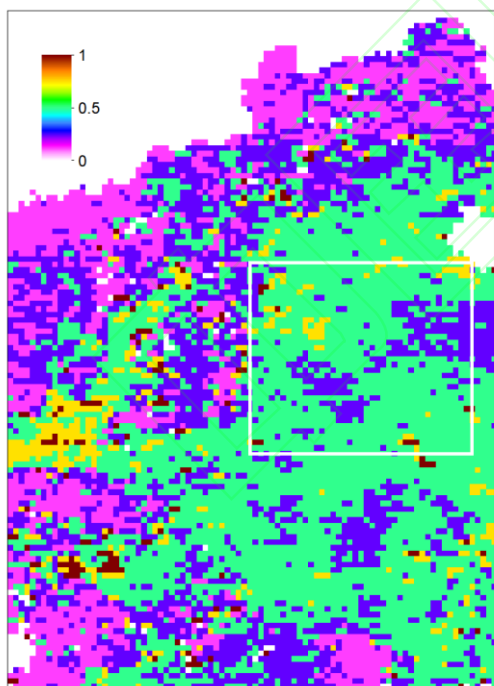
(f)201908 AOD_f_aver



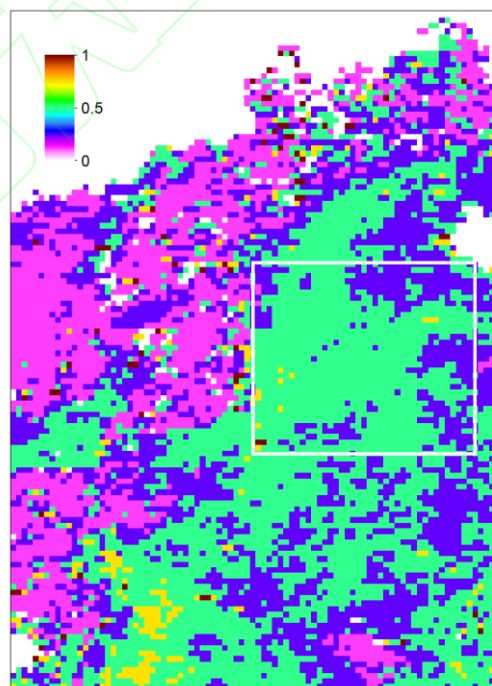
(g)201909 AOD_f_aver



(h)201910 AOD_f_aver



(m)201911 AOD_f_aver



(n)201912 AOD_f_aver

图 8 气溶胶细粒子光学厚度月平均数据

Fig. 8 Monthly Average Data on Optical Depth of Aerosol Fine Particles

本节依据图 8 气溶胶光学细粒子厚度 (AOD_f) 月平均数据, 重点分析 2019 年白色框内 (山东) 的 AOD_f 变化情况:

(1) 山东在 3、4 月份 AOD_f 均值分别为 0.48, 0.59。在 5 月份是 AOD_f 均值 0.38。在 6 月份山东地区的 AOD_f 均值达到 0.7, 个别地区最大可达 0.95, 之后 7 月份和 8 月均值分别为 0.51, 0.23, 但是到了 9 月份 AOD_f 均值 0.45, 之后 10 月、11 月和 12 月均值分别为 0.52, 0.42、0.38。

(2) 分析 (1) 说明的 AOD_f 变化情况, 王利^[6]分析了华北地区 10 年 AOD_f 的时空分布, 并且提到山东济南地区在春季时期主要受周边省份的短距离气团的影响, 因此在 3 月、4 月时期山东的 AOD_f 原因是受到周边省份的影响, 并且受到煤炭工业和冶炼工业的影响。在 6 月相比于 5 月更高的 AOD_f , 是由于 6 月份山东主要燃烧秸秆^[17]、以及工业污染排放提供了大量的气溶胶细粒子。7 月和 8 月份 AOD_f 降低是由出现多次 (济南为例共 20 次) 降水, 且多为大雨/雷阵雨^[18], 但是在 9 月和 10 月时期降雨的骤停 (济南为例共 3 次) 以及受到周边省的 AOD_f 影响, 导致 9 月和 10 月的 AOD_f 开始短暂性上升, 11 月和 12 月气温较低, 多大风, 气溶胶易扩散^[19], 导致 AOD_f 在 11 月和 12 月出现下降的趋势。

4 结论

本文基于 DPC 多角度偏振数据, 提出了基于经验正交函数的气溶胶细粒子光学厚度反演算法, 获得以下结论: 一是 DPC 中国部分地区反演结果与 MODIS-MYD04 的气溶胶细粒子光学厚度数据具有相同的变化趋势; 二是 DPC 反演结果与 AERONET 地基数据在北京、香河、香港三个站点的上进行定量分析, 相关系数为: 0.97, 0.96, 0.9; 平均绝对误差为: 0.08, 0.07, 0.12; 均方根误差为: 0.12, 0.11, 0.17; 三是根据 2019 年中国部分区域的月平均数据, 分析了山东地区气溶胶细粒子光学厚度的变化情况, 发现山东地区的气溶胶细粒子光学厚度均值在 6 月份达到最大 0.7, 证明了本文算法在获取区域气溶胶细粒子光学厚度分布方面具有应用价值。

致谢: 感谢高分应用综合信息服务共享平台 (<http://gaofenplatform.com/channels/53.html>) 提供的 DPC 载荷数据; 感谢 AERONET 站点 (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) 提供气溶胶细粒子光学厚度数据; 感谢 LAADS DAAC (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) 提供 MODIS 气溶胶细粒子光学厚度数据。

参考文献

- [1] 任希岩, 吉东生, 王跃思, 等. 北京大气细粒子及其成分的浓度变化特征[J]. 地球信息科学, 2008(04): 426-430.
Ren Xiyan, Ji Dongsheng, Wang Yuesi, et al. Characteristics of concentration variation of fine particles and their components in Beijing's atmosphere[J]. Earth Information Science, 2008(04): 426-430.
- [2] Andr'e Y, Laherr'ere JM, Bret-Dibat T, et al. Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [C]//SPIE's 1995 International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, August 23, 1995, San Diego, CA, United States, 1995, 2572: 79-90.
- [3] Deschamps PY, Breon FM, Leroy M, et al. The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 598-615.
- [4] Zheng QL, Yi SX, Jin H, et al. Polarimetric satellite sensors for earth observation and application in atmospheric remote sensing[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2019, 14(1): 2-17.
- [5] Li ZQ, Hou WZ, 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.
- [6] Nadal F, Bréon FM. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements[J]. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 1709-1718.
- [7] Xiang KS, Cheng TH, Gu XF, et al. Analyzed polarized reflectance model of typical surface types over China based on the PARASOL measurements[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2016, 180: 109-116.
- [8] Zhang Yang. Retrieval of aerosol optical depth using the empirical orthogonal functions (EOFs) based on PARASOL multi-angle intensity data[J]. Remote Sensing, 2017, 6: 578.
- [9] Bodhaine BA, Wood NB, Dutton EG, et al. On Rayleigh Optical Depth Calculations [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1999, 16: 1854-1861.
- [10] Vermote E, Tanré D. Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum Vector (6SV) [M], 2016.
- [11] Bao F, Gu X, Cheng T, et al. High spatial resolution aerosol optical properties retrieval algorithm using Chinese high-resolution Earth observation satellite I[J]. IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54: 5544-5552.
- [12] 高鑫. 基于群组残差最优方法的多角度偏振陆上云检测与气溶胶反演研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 2020: 84-85
Gao Xin. Research on multi-angle polarization overland cloud detection and aerosol inversion based on group residual optimal method [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) 2020: 84-85
- [13] 黄红莲, 提汝芳, 张冬英, 等. 高分五号卫星偏振遥感陆地上空气溶胶光学厚度[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(04): 454-461.

- Huang Honglian, Ti Rufang, Zhang Dongying, et al. Optical depth of terrestrial aerosols in polarized remote sensing of Gaofen-5 satellite[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020,39(04):454-461.
- [14] 郑逢勋, 朱家乙, 侯伟真, 等.卫星遥感中不同偏振量对气溶胶反演的影响分析[J].光谱学与光谱分析, 2021, 41(07): 2212-2218.
- Zheng Fengxun, Zhu Jiayi, Hou Weizhen, Li Zhengqiang. Analysis of the influence of different polarizations on aerosol retrieval in satellite remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(07): 2212-2218.
- [15] Tanré D, Bréon FM, Deuz JL, 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: 1383-1395.
- [16] 王利, 徐翠玲, 徐甫, 等.2011~2020年华北平原气溶胶光学厚度时空分布特征及潜在源分析[J].地球科学与环境学报, 2021, 43(06):1018-1032.
- Wang Li, Xu Cuiling, Xu Fu, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and potential sources of aerosol optical depth in the North China Plain from 2011 to 2020[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2021, 43(06):1018-1032.
- [17] 毛前军, 金穗穗.2009年至2018年全球气溶胶光学厚度时空分布特性研究[J].激光与光电子学进展, 2021, 58(03):92-98.
- Mao Qianjun, Jin Suisui. Research on the spatiotemporal distribution characteristics of global aerosol optical depth from 2009 to 2018 [J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2021, 58(03): 92-98.
- [18] 毛前军, 金穗穗, 张恒星.基于CALIPSO卫星遥感数据的全球典型区域气溶胶光学特性研究[J].激光与光电子学进展, 2021, 58(24):426-433.
- Mao Qianjun, Jin Suisui, Zhang Hengxing. Study on the optical properties of aerosols in typical global regions based on CALIPSO satellite remote sensing data[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics, 2021, 58(24):426-433.
- [19] 朱首正, 卜令兵, 刘继桥, 等.机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶光学特性及污染研究[J].中国激光, 2021, 48(17):164-176.
- Zhu Shouzheng, Bu Lingbing, Liu Jiqiao, et al. Research on the optical properties and pollution of atmospheric aerosols detected by airborne hyperspectral resolution lidar[J]. China Laser, 2021, 48(17): 164-176