

高分五号卫星偏振遥感陆地上空气溶胶光学厚度

黄红莲, 提汝芳, 张冬英, 方 薇, 孙晓兵, 易维宁

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对多角度偏振成像仪(Directional Polarimetric Camera, DPC)数据, 提出了基于多角度多光谱偏振信息的气溶胶光学厚度反演方法。该方法使用Nadal-Breon半经验模型计算地表偏振反射率, 以扣除地表影响; 采用倍加累加法矢量辐射传输模型构建气溶胶参数查找表, 通过计算最小残差, 动态确定最优气溶胶模型, 从而实现陆地上空气溶胶光学厚度的反演。使用DPC的L1级条带数据, 反演获得了中国东部地区气溶胶光学厚度的空间分布, 并与MODIS产品和AERONET地基点数据分别进行了对比, 反演结果与MODIS气溶胶产品的整体分布具有很好的一致性; 同时, 与AERONET地基点观测结果具有较高的相关性, 670 nm和865 nm两个波段的相关系数都在0.8以上, 说明该算法模型反演陆地上空的气溶胶光学厚度准确可靠, 可为DPC遥感大气气溶胶提供技术支持。

关键词: 气溶胶; 光学厚度; 偏振信息; 多角度; 高分五号卫星

中图分类号: P427.1 文献标识码: A

Inversion of aerosol optical depth over land from directional polarimetric camera onboard chinese Gaofen-5 satellite

HUANG Hong-Lian, TI Ru-Fang, ZHANG Dong-Ying, FANG Wei, SUN Xiao-Bin, YI Wei-Ning
(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Directional polarimetric camera (DPC) can acquire multi-spectral, multi-angle, radiometric and polarimetric reflectance data from the earth. A method for the inversion of aerosol optical depth was presented according to the multi-spectral, multi-angle and polarimetric data. Firstly, the polarized land surface reflectance is calculated using the Nadal-Breon semi-empirical model to deduct the land surface radiation from the measured value. Secondly, the vector radiation transfer model derived from double-accumulation method is used to construct the lookup table of aerosol optical parameters. Then, the minimum residual is calculated to determine the aerosol model dynamically for the retrieving of aerosol optical thickness over the land. Using the L1 products of DPC, the aerosol optical thickness in eastern China is retrieved. The values are compared with the product of MODIS and the data measured at the same time from AERONET ground station displaced at several places. Results show that the distribution of aerosol optical thickness retrieved from DPC data is in good agreement with MODIS aerosol product. And also, the results of DPC and AERONET ground station are highly correlated. The correlation coefficients of 670 nm and 865 nm bands are above 0.8. It demonstrates the feasibility of the algorithm and what we have considered over land.

Key words: aerosol, optical thickness, polarized information, multi-angle, Gaofen-5 satellite

PACS: 92. 20. Bk, 42. 68. Mj, 07. 07. Df

引言

从辐射传输角度看, 大气气溶胶散射、吸收太

阳辐射, 影响到达地面的太阳辐射能量; 又通过与云相互作用, 改变云的状态和生存周期, 间接影响

收稿日期: 2019-08-02, 修回日期: 2019-12-16

Received date: 2019-08-02, Revised date: 2019-12-16

基金项目: 高分重大专项(30-Y20A010-9007-17/18), 合肥研究院重点项目

Foundation items: Supported by National High Resolution Major Special Project of China (30-Y20A010-9007-17/18), Key Project of Hefei Research Institute of Chinese Academy of Sciences

作者简介(Biography): 黄红莲(1980-), 女, 副研究员, 主要从事定量遥感应用方面的研究。E-mail: hlhuang@aiofm.ac.cn

地气系统的能量收支,进而影响全球气候变化。从地表资源-环境遥感角度看,气溶胶影响到达地表的太阳辐射能,是光学遥感图像大气校正必须考虑的重要因素。近年来,由于生物质燃烧和其它人为活动带来的霾天气频繁发生,大气环境问题日益突出,对区域气溶胶来源、传播及转化过程的监测不断提出新的需求。

大气气溶胶是大气中的不稳定因素,其时空分布复杂多变,相对于地基观测,卫星遥感可以获得全球范围的气溶胶光学特性和微物理特性,是获取大区域范围气溶胶时空变化的唯一手段。卫星观测接收的是地气系统的总反射光,要反演获得气溶胶光学特性,首先需要扣除地表反射辐射。由于陆地地表地物种类复杂,且有很多亮地物,其反射率可能远大于大气反射率,如何准确扣除地表反射辐射是陆地上空气溶胶反演的一个难点。研究人员针对不同的观测数据,发展了不同的反演算法。针对MODIS传感器获得的多光谱测量数据,利用中波红外波段($2.1\mu\text{m}$)地表反射率与可见光波段地表反射率的线性关系,扣除地表反射,实现气溶胶参数的反演^[1-2]。针对MISR传感器的多角度测量数据,采用经验正交函数法,通过构建多角度观测条件下的协方差矩阵来估算地表辐射项,实现陆地上空的气溶胶参数的反演^[3]。

相对于强度遥感来说,偏振参量对地面反射辐射不敏感,而对气溶胶小粒子及其复折射率虚部比较敏感,有利于扣除地表辐射的贡献,实现地气分离,可以有效提高气溶胶反演精度。利用偏振技术探测气溶胶的代表是法国POLDER系列传感器和美国的APS传感器。前者由法国CNES自1999年起到目前共发射了三颗,对同一地物能够获得16个不同角度的偏振辐射数据。我国中科院安徽光机所研制了类POLDER型传感器多角度偏振探测仪(DPC),并于2018年5月搭载在高分五号01星上发射升空,可以提供多角度、多光谱的偏振辐射数据。许多研究人员利用偏振遥感数据进行了气溶胶反演,Deuze利用半经验BPDF模型扣除地表贡献,给出了基于POLDER的偏振测量数据反演陆地上空气溶胶参数的算法^[4]。Dubovik基于统计最优化理论,提出了利用多角度偏振信息进行气溶胶参数反演的新一代算法^[5-6]。Cheng利用DPC航空观测的多角度多谱段偏振数据,反演了珠江三角洲的气溶胶光学特性^[7]。Li亦基于统计最优化理论,为DPC

设计了多参数最优化反演气溶胶参数的框架,并讨论了该算法中DPC观测信息对角度的依赖,分析了后验误差的影响因素,对反演不确定性进行了系统的定量评估^[8-9]。该算法可以同时反演气溶胶的光学厚度、单次散射反照率、复折射指数、粒子谱分布、气溶胶标高以及地表的相关参数,在一定程度上证明了多角度偏振遥感数据在气溶胶反演中有不可替代的优势,但是由于运算中涉及到大量的优化迭代,其计算收敛速度慢,很难满足工程化的应用需求。

本文针对高分五号卫星DPC获取的数据特点,研究利用多角度偏振信息反演陆地上空气溶胶光学厚度的方法。首先,利用偏振对地表不敏感的优势,采用Nadal-Breon开发的两参数半经验BPDF模型^[10],基于MODIS的植被指数和地表分类产品数据,计算地表偏振反射率BPDF,实现偏振信息的地气分离。然后,基于全球气溶胶监测网络AERONET地基站点数据聚类分析获得的6种气溶胶粗细粒子模型^[11],利用倍加累加法矢量辐射传输模型RT3,构建气溶胶参数查找表。最后,使用最小残差法,通过动态寻找最优气溶胶模型,进行中国东部地区的气溶胶光学厚度反演,并对反演结果进行验证,为我国自主研发的多角度偏振成像仪遥感大气气溶胶提供技术支持。

1 多角度偏振遥感数据获取和处理

高分五号卫星DPC用于获取全球大气气溶胶和云参数,具有多角度、多光谱偏振辐射成像功能。它共设置8个工作谱段,其中5个为非偏振谱段,3个为偏振谱段,通过转动滤光片/偏振片逐波段采集数据,对偏振谱段,采集 0° 、 60° 、 120° 三个偏振方向的强度信息,解析获得偏振信息。该仪器总视场为 $\pm 50^\circ$,可以在沿轨12个观测方向上获得地气系统的反射辐射强度和偏振信息,为云、气溶胶的参数探测和海色遥感服务。DPC的基本参数如表1所示。

由于DPC直接获取的是不同观测角度的灰度图,要开展气溶胶反演工作,首先需要进行均匀性校正、辐射校正、偏振校正、几何定位和数据网格化等一系列的数据预处理工作,得到L1级产品数据。DPC的L1级数据为网格化后分波段保存的以轨为单位的HDF数据,对偏振波段,L1级数据包含归一化的斯托克斯参数 I 、 Q 、 U 和对应的经纬度、太阳几何、观测几何、海陆标示等辅助信息。归一化的 I 、

表1 DPC载荷主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of DPC sensor

仪器参数	数值
工作谱段	443 nm、490 nm(P)、565 nm、670 nm(P)、 763 nm、765 nm、865 nm(P)、910 nm
偏振解析	线偏振,三个方向0°、60°、120°
总视场	-50°~+50°
多角度观测	最大12个角度
星下点空间分辨率	3.3 km
辐射定标误差	≤5%
偏振定标误差	≤0.02

Q 、 U 计算公式如下:

$$\begin{cases} I_{\text{nor}} = \pi I F_0 \\ Q_{\text{nor}} = \pi Q / F_0 \\ U_{\text{nor}} = \pi U / F_0 \end{cases}, \quad (1)$$

其中, I 为探测器接收到的总辐亮度, Q 、 U 为线偏振强度, F_0 为大气层外的太阳辐照度。

由于 Q 和 U 与参考平面有关,对测量定标的精度要求较高,因此在实际反演中,通常采用不含偏振方向信息的偏振反射率进行气溶胶光学特性反演。故由下式将归一化的 I 、 Q 、 U 转化为反射率和偏振反射率:

$$\begin{cases} \rho = \frac{I_{\text{nor}}}{\mu_s} \\ \rho_p = \frac{\sqrt{Q_{\text{nor}}^2 + U_{\text{nor}}^2}}{\mu_s} \end{cases}, \quad (2)$$

其中, μ_s 为太阳天顶角的余弦。

2 反演算法原理

利用卫星观测的大气顶偏振反射率反演获得陆地上空气溶胶光学特性。卫星观测的大气顶偏振反射率可以用下式表示:

$$\rho_p^*(\theta_s, \theta_v, \phi) = T_g \cdot [\rho_p^a(\theta_s, \theta_v, \phi) + \rho_p^m(\theta_s, \theta_v, \phi) + T(\theta_s) \cdot T(\theta_v) \cdot \rho_p^s(\theta_s, \theta_v, \phi)] \quad (3)$$

上式中, θ_s 和 θ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角, ϕ 为相对方位角; $\rho_p^*(\theta_s, \theta_v, \phi)$ 为卫星观测的大气顶偏振反射率, $\rho_p^a(\theta_s, \theta_v, \phi)$ 为气溶胶偏振反射率, $\rho_p^m(\theta_s, \theta_v, \phi)$ 为大气分子偏振反射率, $\rho_p^s(\theta_s, \theta_v, \phi)$ 为地表地物偏振反射率; T_g 为大气分子吸收透过率,在可见光的非吸收波段,可以忽略不计; $T(\theta_s)$ 为下行散射透过率, $T(\theta_v)$ 为上行散射透过率。

$$T_\lambda(\theta_s) = \exp\left[-\left(\frac{\psi\delta_{0,\lambda}^m + \zeta\delta_{0,\lambda}^a}{\cos\theta_s}\right)\right], \quad (4)$$

$$T_\lambda(\theta_v) = \exp\left[-\left(\frac{\psi\delta_{0,\lambda}^m + \zeta\delta_{0,\lambda}^a}{\cos\theta_v}\right)\right], \quad (5)$$

上式中, $\delta_{0,\lambda}^m$ 为分子光学厚度, $\delta_{0,\lambda}^a$ 为气溶胶光学厚度。 ψ 和 ζ 为两个经验系数,用于考虑地表和大气之间的多次散射。 ψ 一般为0.9,而 ζ 直接与气溶胶Ångström指数有关,由下式计算得到^[12]:

$$\zeta = 0.03658 + 0.1023\alpha + 0.0080\alpha^2, \quad (6)$$

上式中, α 为气溶胶Ångström指数^[13]。

2.1 气溶胶光学特性查找表

使用倍加累加法辐射传输模型PolRadTran/RT3构建查找表,RT3用来求解基于平面平行介质的矢量辐射传输方程,利用矩阵算子理论的倍加累加法,同时考虑了太阳辐射和热源辐射,能进行红外波段乃至微波波段的大气斯托克斯参量计算。其输入是分层大气及其边界条件参数,输出为不同层离散傅立叶方位角上的上行、下行斯托克斯参量 I 、 Q 、 U 、 V ,通过输入相应散射条件可以灵活设置各种大气微粒的特性。RT3被广泛应用于辐射传输模型比较、遥感应用等方面^[14-15]。

根据高分五号卫星DPC的波段设置和观测角度设置,计算查找表时气溶胶光学参数的设置如表2所示。以550 nm波段的光学厚度为基准,使用表2中的参数设置,模拟计算670 nm、865 nm两个波段的大气顶偏振反射率,形成气溶胶参数查找表。

表2 查找表参数设置

Table 2 Parameters of lookup table

参数	范围	步长	个数
波长	660~680 nm		2
	845~885 nm		
太阳天顶角	0°~80°	2°	41
观测天顶角	0°~87°	约6°	16
相对方位角	0°~180°	5°	37
光学厚度	0.0~0.2	0.02	11
	0.2~0.8	0.05	12
	0.8~2.0	0.15	8
	2.0~2.9	0.3	3
气溶胶模型	6种		6

由于不同气溶胶模型对大气顶偏振反射率的影响较大,使气溶胶模型选择成为构建气溶胶参数查找表的关键因素。Omar基于AERONET全球地基点的气溶胶光学特性和微物理特性数据,使用

聚类分析的方法,构建了6种典型的气溶胶模型,其具体参数如表3所示,包括气溶胶粒子折射率和谱分布参数,其细模态和粗模态的平均半径和标准偏差^[11]。6种气溶胶模型均假设气溶胶粒子谱为双峰正态对数分布:

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{F \times V}{\sqrt{2\pi} \sigma_f} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln R_f)^2}{2\sigma_f^2} \right] + \frac{(1-F) \times V}{\sqrt{2\pi} \sigma_c} \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln R_c)^2}{2\sigma_c^2} \right] \quad (7)$$

上式中, f 和 c 分别表示细模态和粗模态, r 为粒子半径, R 为体积谱对应的几何中值半径, σ 为标准偏差, V 为体积柱浓度, F 为体积柱浓度细模态占比,简称细粒子比:

$$V = V_f + V_c, F = \frac{V_f}{V} \quad (8)$$

按照正态对数气溶胶粒子尺度谱分布,一组气溶胶粒子平均半径(R_f 和 R_c)和粒子尺度谱分布标准偏差(σ_f 和 σ_c)都会决定一个气溶胶模态。谱分布结合气溶胶粒子复折射率($m=n+ki$)用来表达一种气溶胶模型,可以近似描述气溶胶粒子散射。根据AERONET全球地基站点数据构建的6种气溶胶模型可以比较真实的反映全球的气溶胶特性。基于该6种气溶胶模型参数,采用双峰正态对数粒子谱分布,按照表2的参数设置,使用矢量辐射传输模型RT3计算卫星高度的斯托克斯参量,构建气溶胶参数查找表。

2.2 地表偏振反射率计算

地表偏振反射率使用Nadal-Breon两参数半经验BPDF模型计算,该模型是基于POLDER的航空观测数据发展起来的^[10],POLDER的气溶胶反演算法即使用NB模型扣除地表的偏振反射。NB模型计算公式如下所示:

$$R_p(\theta_s, \theta_v, \phi) = X \left[1 - \exp \left(-Y \frac{F_p(\alpha, n)}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \right) \right] \quad (9)$$

其中 θ_s 为太阳天顶角, θ_v 为观测天顶角; F_p 是非涅尔反射系数; α 为镜面入射角,可以根据太阳天顶角、观测天顶角和相对方位角计算得到; n 为折射率,计算陆地表面的偏振反射率时,通常认为 n 等于1.5^[10]。 X 、 Y 由不同地表的NDVI值来获取的经验系数,它们与地表类型和植被指数的关系见表4。

不同地物的地表偏振反射率不同,相同地物的偏振反射率随时间变化也会出现明显的变化,因此如何来分离地表的贡献是陆地上空气溶胶反演中最困难,也是对精度影响最大的问题。所以,为了保证气溶胶反演精度,首先,基于MODIS产品数据,建立地表分类查找表和植被指数NDVI查找表,其中,考虑到地表植被覆盖的时空变化,植被指数查找表按月给出12个植被指数查找表。然后,基于建立的地表分类查找表和植被指数NDVI查找表,根据确定NB模型半经验参数表中的 X 和 Y 与地表类型和植被指数的关系,由式(9)即可计算出地表偏振反射率,得到12个月不同的全球地表偏振反射率查找表。

2.3 气溶胶反演

基于构建的气溶胶参数查找表和地表偏振反射率查找表,使用高分五号卫星多角度偏振成像仪670 nm和865 nm两个波段观测的L1产品数据,进行气溶胶观测特性反演,具体过程如下:

(1)读取DPC 670 nm和865 nm两个波段的L1产品数据,包括每个像元所有观测角度的归一化 I 、 Q 、 U 和观测时间、观测几何、太阳几何、经纬度信息、海陆标示等,进行云检测。

(2)对无云像元,判断有效观测角度,当有效观测角度大于等于5个时,使用式(2)计算670 nm和865 nm两个波段的大气顶偏振反射率 $\rho_{p,\lambda}^{meas}$,根据观

表3 气溶胶模型参数列表

Table 3 Detailed parameters of aerosol models

参数	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5	模型6
单次散射反照率	0.93	0.80	0.88	0.92	0.93	0.72
复折射率实部(673 nm)	1.4520	1.5202	1.4494	1.4098	1.3943	1.4104
复折射率虚部(673 nm)	0.0036	0.0245	0.0092	0.0063	0.0044	0.0337
细模态平均半径/ μm	0.117	0.144	0.133	0.158	0.165	0.140
细模态标准偏差	1.482	1.562	1.502	1.526	1.611	1.540
粗模态平均半径/ μm	2.834	3.733	3.590	3.547	3.268	3.556
粗模态标准偏差	1.908	2.144	2.104	2.065	1.995	2.134
细粒子比	0.22	0.33	0.38	0.53	0.26	0.49

表4 NB半经验模型参数表

Table 4 Parameters of Nadal-Breon semi-empirical model

地表类型	NDVI	$X \times 100$	Y
森林	0~0.15	0.7	120
	0.15~0.3	0.75	125
	≥ 0.3	0.65	120
灌木	0~0.15	1.5	90
	0.15~0.3	0.95	120
	≥ 0.3	0.7	140
低植被	0~0.15	1.3	90
	0.15~0.3	0.95	90
	≥ 0.3	0.75	130
沙漠	0~0.15	2.5	45
	≥ 0.15	2.5	45

测几何、太阳几何信息计算大气分子偏振反射率 ρ_p^m 。

(3)根据无云像元的经纬度信息和观测时间,匹配到全球地表偏振反射率查找表的对应位置,获得该像元所有观测角度的地表偏振反射率 $\rho_{p, \text{surf}}$ 。

(4)根据无云像元的观测几何、太阳几何信息,使用气溶胶光学特性查找表,通过插值,查找获得满足几何条件的所有气溶胶模型和光学厚度的气溶胶偏振反射率 ρ_p^o 。

(5)由式(3)得到模拟计算的大气顶偏振反射率 $\rho_{p, \lambda}^{\text{simul}}$,比较DPC 670 nm和865 nm两个波段不同观测角度下获得的大气顶偏振反射率和模拟计算得到的大气顶偏振反射率,动态地确定气溶胶模型。对每个基本气溶胶模型,分别利用式(10)计算最小残差,残差最小时对应的气溶胶模型就是最佳气溶胶模型。该气溶胶模型时,各观测角度残差最小时光学厚度的平均为反演得到的550 nm波段的气溶胶光学厚度。

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{\lambda=670,865}^N \sum_{l=1}^N (\rho_{p, \lambda}^{\text{simul}}(\theta_s, \theta_{vl}, \phi_l, \tau_l, \text{mod}) + \rho_{p, \lambda}^{\text{meas}}(\theta_s, \theta_{vl}, \phi_l))^2}, \quad (10)$$

上式中, λ 代表波长, N 为多角度偏振成像仪的有效观测角度数,mod为气溶胶模型,上标simul和meas分别表示模拟和观测。

根据反演得到的最佳气溶胶模型和550 nm处光学厚度,由对应气溶胶模型的消光系数,计算其它波段光学厚度。

$$\tau_{\lambda}(\text{mod}) = \tau_{\lambda}(\text{mod}) \cdot \frac{\text{EXTIN}_{\lambda}(\text{mod})}{\text{EXTIN}_{550}(\text{mod})}. \quad (11)$$

3 反演结果与验证

利用第三节中的气溶胶反演算法,使用DPC的L1级产品数据,对中国东部地区进行了气溶胶光学特性反演,获得了2018年9-10月份中国东部地区的气溶胶光学厚度。DPC的L1级产品数据空间分辨率为3.3 km \times 3.3 km,气溶胶反演时进行了3 \times 3像元的合并,获得气溶胶产品的空间分辨率为9.9 km \times 9.9 km。

3.1 MODIS产品对比验证

为验证反演结果的有效性,将反演获得的气溶胶光学厚度与中分辨成像光谱仪(MODIS)气溶胶光学厚度产品作对比。搭载MODIS的AQUA卫星与搭载DPC的GF-5卫星均是下午星,过境时间相差不大,本文所选择的DPC和MODIS对比数据过境时间相差在1小时以内。另外,MODIS_C6版本的陆地上空气溶胶光学厚度产品空间分辨率为10 km \times 10 km,故,MODIS与DPC气溶胶产品可以很好的实现时空匹配。

图1和图2分别为2018年9月4日和10月2日DPC和MODIS气溶胶产品对比结果,图中展示的DPC气溶胶反演结果使用的都是单轨数据;而对MODIS,9月4日使用的是单个气溶胶产品数据,10月2日是三个气溶胶产品数据拼接得到的,拼接处存在没有覆盖的区域。

从图1、图2可以看出,2018年9月4日中国东部地区的气溶胶分布比较均匀,而10月2日中国东部地区的气溶胶分布具有明显的区域性,华北地区、长三角和珠三角地区气溶胶光学厚度明显高于其它地方的气溶胶光学厚度。

无论气溶胶分布均匀还是空间变化明显,DPC反演的气溶胶光学厚度与MODIS气溶胶产品的整体分布都具有较高的一致性。对9月4日,仅在个别区域的反演结果略有不同;对10月2日,相对与MODIS气溶胶产品,DPC反演的华北地区、长三角和珠三角地区气溶胶光学厚度略偏高。另外,广东东南角MODIS反演的高值区域,DPC当做云区域剔除。

3.2 AERONET地基站点对比验证

全球气溶胶监测网络(AERONET)是由NASA和PHOTONS成立的全球气溶胶观测网络。仪器主要使用CE318系列、Skyradiometer,在全球布设了四百多个定点观测站点,可以提供340 nm、380 nm、440 nm、500 nm、670 nm、870 nm、1020 nm和1640

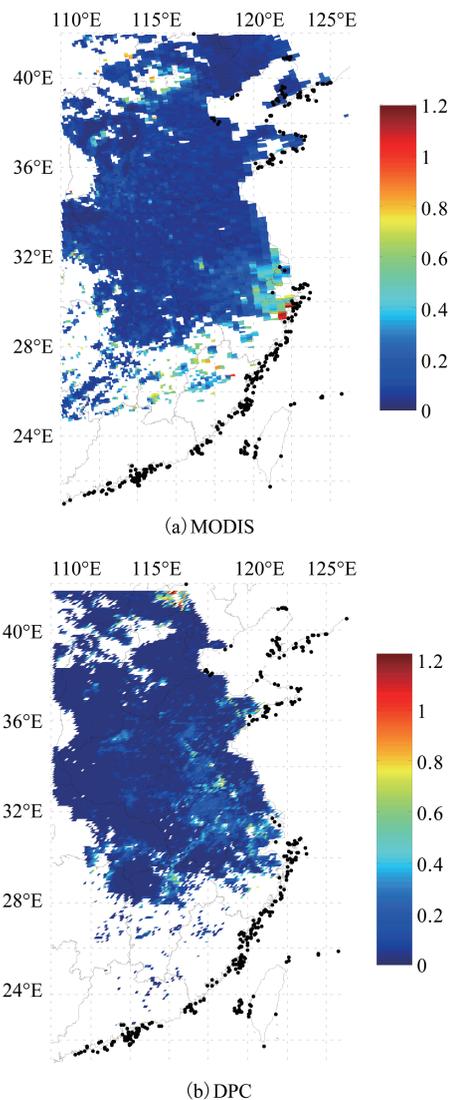


图1 2018年9月4号DPC和MODIS气溶胶产品对比结果
Fig.1 Comparison of DPC and MODIS retrieved AOD on September 4, 2018

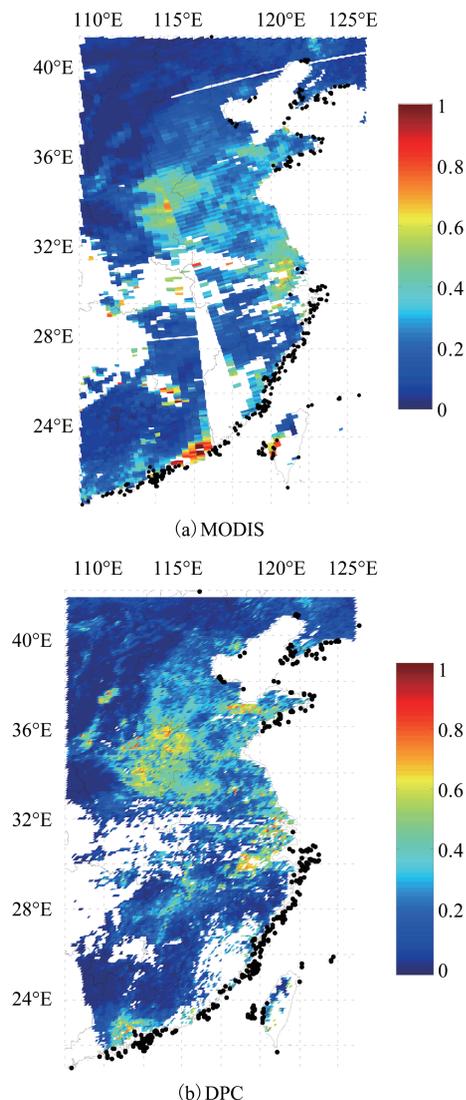


图2 2018年10月2号DPC和MODIS气溶胶产品对比结果
Fig.2 Comparison of DPC and MODIS retrieved AOD on October 2, 2018

nm波段的气溶胶光学厚度(各站点能提供的波段略有不同)。AERONET地基站点数据具有较高的测量精度和良好的稳定性,通常用于卫星反演结果的验证。

为了进一步检验DPC反演结果的有效性,使用AERONET地基站点数据与DPC反演结果作对比,对比分析他们的相关性。选择包头、北京、香河、徐州、太湖五个在中国有长期观测的AERONET地基站点,选取高分五号卫星过境前后30 min内的AERONET地基站点的光学厚度,与站点地理位置相对应的DPC反演的光学厚度进行对比。

由于AERONET气溶胶产品没有提供550 nm及附近波段的气溶胶光学厚度,而有670 nm波段和870 nm波段的气溶胶光学厚度,与DPC的670 nm波

段和865 nm波段基本一致,故使用670 nm和865 nm两个波段的结果进行对比分析。另外,为了进一步分析DPC的反演精度,同时给出670 nm波段处MODIS和AERONET气溶胶光学厚度对比结果,其中MODIS的670 nm波段处气溶胶光学厚度,是由MODIS气溶胶产品的660 nm波段处气溶胶光学厚度外插得到的。

图3(a-b)分别为670 nm波段和865 nm波段的DPC和AERONET气溶胶产品对比结果图,其中横轴为AERONET地基观测光学厚度,纵轴为DPC反演的光学厚度。图4为670 nm波段处MODIS和AERONET气溶胶产品对比结果图,其中横轴为AERONET地基观测光学厚度,纵轴为MODIS反演的光学厚度。DPC和AERONET气溶胶产品对比结

果图中,大部分气溶胶光学厚度在拟合直线附近,仅个别点离拟合直线较远,并且这些点在MODIS和AERONET气溶胶产品对比结果图中离拟合直线也较远。另外,DPC反演的光学厚度与AERONET地基站点观测结果相比,670 nm和865 nm两个波段的相关系数分别为0.822和0.824,而MODIS和AERONET地基站点观测结果的相关性为0.787,也说明DPC反演结果和地基观测结果有较高的一致性。

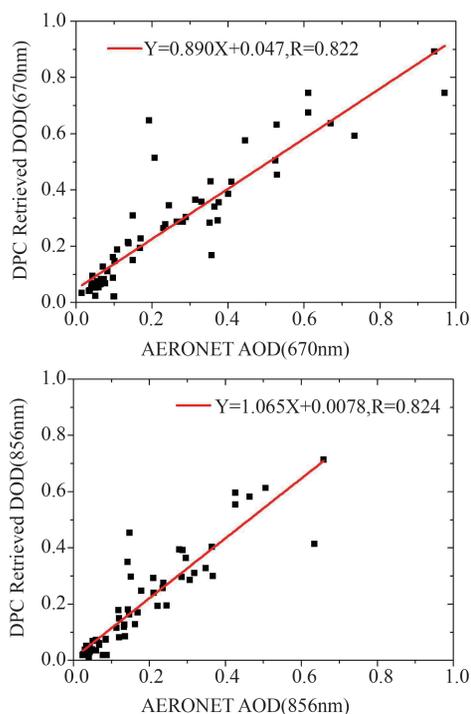


图3 DPC和AERONET气溶胶产品对比结果

Fig.3 Comparison of DPC and AERONET retrieved AOD

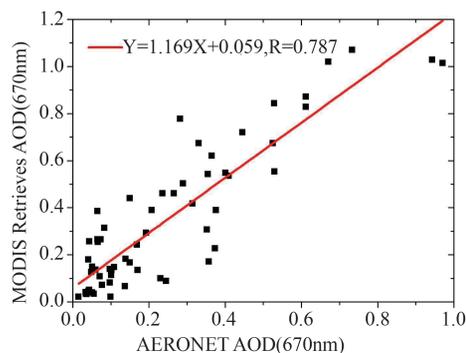


图4 MODIS和AERONET气溶胶产品对比结果

Fig.4 Comparison of MODIS and AERONET retrieved AOD

4 总结

本文针对多角度偏振成像仪的数据特点,提出

了基于多光谱多角度偏振信息的陆地上空大气气溶胶反演方法。该方法通过构建地表偏振反射率查找表和气溶胶光学特性查找表,利用670 nm和865 nm两个波段的偏振观测数据,反演得到了中国东部地区的气溶胶光学厚度。将DPC反演结果与MODIS气溶胶产品和AERONET地基站点数据分别进行了对比分析。发现:①在2018年9月4号和2018年10月2日,DPC反演的中国东部气溶胶光学厚度与MODIS气溶胶产品的整体分布都具有很好的 consistency,仅在个别区域略有不同。②在2018年9-10月份期间,对包头、北京、香河、徐州、太湖五个地基站点,DPC反演的气溶胶光学厚度和地基观测结果具有较高的一致性,670 nm和865 nm两个波段的相关系数都在0.8以上,并且比MODIS和地基观测结果的相关性高。一方面,说明该算法对复杂下垫面的陆地上空气溶胶光学厚度反演是准确可靠的,另一方面,也直接验证了DPC在轨观测数据的有效性。

References

- [1] Kaufman Y J, Tanr 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*, 1997, **102**(42): 17051-17067.
- [2] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, *et al.* The second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of MODIS spectral reflectance [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D13211.
- [3] Diner D J, Martonchik J V, Kahn R A, *et al.* Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land [J]. *Remote sensing of Environment*, 2005, **94**: 155-171.
- [4] Deuze' J L, Breon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS - 1 polarized measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D5): 4913 - 4926.
- [5] 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**: 975-1018.
- [6] Dubovik O, Lapyonok T, Litvinov P, *et al.* GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere [J]. *SPIE: Newsroom*, 2014; 10.1117/2.1201408.005558.
- [7] Cheng T H, Gu X F, Xie D H, *et al.* Simultaneous retrieval of aerosol optical properties over the Pearl River Delta, China using multi-angular, multi-spectral, and polarized measurements [J]. *Remote sensing of Environment*, 2011, **115**(7): 1643-1652.
- [8] 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 & Radiative Transfer*, 2018, **218**: 21–37.
- [9] ZHENG Feng-Xun, HOU Wei-Zhen, LI Zheng-Qiang. Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angledependence and a posteriori error [J]. *Acta Phys. Sin.* (郑逢勋, 侯伟真, 李正强. 高分五号卫星多角度偏振相机最优化估计反演: 角度依赖与后验误差分析. *物理学报*), 2019, **68**(4): 040701.
- [10] Nadal F, Breon F M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements[J]. *IEEE*, 1999, **37**(3): 1709–1718.
- [11] Omar A H, Won J G, Winker D M, et al, Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**: D10S14
- [12] 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.
- [13] Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity [J]. *Tellus*, 1964, **16**(1): 64–75.
- [14] 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*, 2007, **112**: D13211.
- [15] Romano F, Cimini D, Rizzi R, et al. Multilayered cloud parameters retrievals from combined infrared and microwave satellite observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**: D08210.