

卫星 PSAC 载荷陆地观测中气溶胶和地表参数的信息量分析

樊依哲^{1,2}, 孙晓兵^{1,3*}, 提汝芳¹, 黄红莲^{1,3}, 刘晓^{1,3}

(1. 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 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

3. 合肥市农业行业首席工作室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对卫星载荷大气校正仪分系统 PSAC 在陆地上空气溶胶反演领域的应用需求, 基于最优化反演框架, 引入信息量和后验误差分析方法, 讨论了不同观测模式下气溶胶和地表参数的信号自由度(DFS)的观测角度依赖性, 给出了气溶胶和地表参数的后验误差。在此基础上, 分析了气溶胶和地表参数的 DFS 随光学厚度(AOD)和地表反射率的变化趋势。研究表明: 1) 不同的观测几何下, 气溶胶参数总的 DFS 有很大差异, 反演气溶胶参数的最优散射角范围是 $140^\circ \sim 180^\circ$; 2) 任意观测角度, 细粒子为主的细模柱浓度 v_0^f , 粗粒子为主的气溶胶柱浓度 v_0^c 和 v_0^s 能被反演出来, 谱分布部分参数以及折射指数部分参数在大散射角能被反演获得; 3) 对不同 AOD 和地表反射率下参数的 DFS 分析, 偏振信息的增加有助于亮地表下气溶胶参数的反演, 增加短波红外波段能提升在 AOD 高值条件下对地表参数的获取能力。

关键词: 偏振扫描大气校正仪(PSAC); 偏振遥感; 短波红外; 气溶胶; 信息量分析; 最优估计反演

Information analysis of aerosol and surface parameters in PSAC observation over land

FAN Yi-Zhe^{1,2}, SUN Xiao-Bing^{1,3*}, TI Ru-Fang¹, HUANG Hong-Lian^{1,3}, LIU Xiao^{1,3}

(1. Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Chief Studio of Agricultural Industry in Hefei, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to meet the aerosol retrieval application requirements of polarized scanning atmospheric corrector (PSAC) over land, the information content and a posterior error analysis is applied to the synthetic data in this paper, which inherits from the optimal estimate theoretical framework. We discussed the angle dependence of the degrees of freedom for signal (DFS) of the aerosol and surface parameters in different scenarios, and analyzed the posterior errors of the aerosol and surface parameters. On this basis, the variation trend of the aerosol and surface parameters DFS with aerosol optical depth (AOD) and surface reflectivity is analyzed. The results show that: 1) Under different observation geometry, the total DFS of aerosol parameters vary greatly, and the optimal scattering angle range of aerosol parameters is $140^\circ \sim 180^\circ$. 2) The columnar aerosol volumes (v_0^f and v_0^c) for the coarse mode dominated aerosols and the columnar aerosol volumes (v_0^s) for fine-dominated aerosol models can be inverted at any observation angle, and some parameters of particle size distribution and refractive index can be obtained at large scattering angle. 3) The increase in polarization information is helpful to the inversion of aerosol parameters under the bright surface, and the increase of short-wave infrared band can improve the ability to obtain surface parameters under the condition of high AOD.

收稿日期: 2021-11-29, 修回日期: 2022-03-27

Received date: 2021-11-29, Revised date: 2022-03-27

基金项目: 卫星应用共性关键技术项目(30-Y20A010-9007-17/18), 国家重点研发计划(2016YFE0201400), 中国科学院合肥物质科学研究院重点项目(Y73H9P1801)

Foundation items: Supported by Key Technology Program for Satellite Application (30-Y20A010-9007-17/18), National Key Research and Development Program of China (2016YFE0201400), Key Project of Hefei Institute of Physical Science Chinese Academy of sciences (Y73H9P180)

作者简介(Biography): 樊依哲(1991-), 男, 河南新密人, 博士研究生, 主要从事卫星偏振遥感、气溶胶特性等研究。E-mail: yzf@mail.ustc.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn

Key words: polarized scanning atmospheric corrector (PSAC), polarization remote sensing, shortwave infrared, aerosol, information analysis, optimal estimation inversion

PACS:07. 07. Df, 92. 20. Bk, 92. 70. Bc, 42. 68. Ay

引言

大气气溶胶是由悬浮在空气中的液体和固体颗粒组成的,这些颗粒来自自然或人为来源^[1]。气溶胶通过散射和吸收太阳辐射,改变云的微物理性质,在地气辐射平衡和气候中发挥重要作用,进而影响人类健康和大气能见度。为了更好地了解气溶胶的影响,需要通过测量来获得各种气溶胶属性,包括气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)、颗粒大小和折射率^[2]。可以通过地面、机载和卫星平台的遥感来探测气溶胶特性^[3-10]。

搭载在环境减灾二号卫星的偏振扫描大气校正仪(polarized scanning atmospheric corrector, PSAC)通过时间同步和空间覆盖的探测方式获取光谱、观测角度和偏振三个维度的大气信息,获取成像区域上空的大气参数,用于星载相机载荷获取图像的大气校正。作为PSAC气溶胶反演算法研究的前端研究,本文评估PSAC观测对大气气溶胶参数的反演能力。

通常,气溶胶反演算法利用光谱辐射信息来反演其AOD,包括中分辨率成像光谱辐射计(MODIS)暗目标算法^[11-12],深蓝算法^[13-14]以及用于中分辨率成像传感器(MERIS)气溶胶反演算法^[15]。这些算法主要利用较短波长(如紫外或蓝光)的较低地表反射率,或者利用可见光和近红外之间的地表反射率关系,将气溶胶信息从地表反射中分离出来。

PSAC的独特优势在于它拥有从410~2250 nm范围的9个探测通道,且都具有偏振探测能力。尽管其观测方式为单角度观测,但是其探测波段多,范围广以及具有偏振探测能力的优势将有助于反演多个气溶胶参数。

为此,利用PSAC的模拟数据进行理论上的信息量分析。基于最优估计理论^[16],分析不同光谱组合、不同观测角度、以及标量联合偏振的PSAC测量中,在不同大气条件及不同地表反射率下每个气溶胶参数可能包含的信息量。不仅根据信号自由度(DFS)来量化气溶胶参数的信息含量,而且估计不同大气条件下,每个反演参数的后验误差。

利用线性化矢量辐射传输模型(UNL-VRM)^[17]对PSAC测量的多光谱反射率和偏振反射率进行了

模拟。该正向模式的输出不仅包括Stokes矢量,还包括Stokes矢量关于气溶胶散射和微物理参数的雅可比矩阵,根据DFS和每个参数的反演不确定性来量化信息量。除了评估可以反演的气溶胶参数外,还量化了随着PSAC的偏振测量的增加而增强的气溶胶信息量。此外,还分析了气溶胶信息量的角度相关性,以估计观测几何对反演精度的影响。最后,根据气溶胶的DFS变化特征,评估了在不同大气条件下(主要是不同AOD),不同地表反射率的条件下,对气溶胶参数的反演能力。本研究的重点是对PSAC进行定量分析,特别是对气溶胶参数的信息量进行定量分析,并为开发气溶胶PSAC业务算法提供理论基础。

1 信息量分析理论

设 \mathbf{x} 是由 n 个参数(例如气溶胶体积、折射率、粒子谱分布等)组成的状态向量,该状态向量将从包含 m 个测量元素(例如光谱标量和偏振反射率)的观测向量 \mathbf{y} 中反演。 \mathbf{y} 和 \mathbf{x} 之间的关系如式(1)所示:

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\epsilon} \quad (1)$$

其中正向模型 \mathbf{F} 描述 \mathbf{y} 和 \mathbf{x} 之间的物理关系的正演模型(对应于UNL-VRM)。 $\boldsymbol{\epsilon}$ 表示观测不确定性和正演模型不确定性的组合误差,以下为简单起见,称为测量误差,其协方差矩阵如式(2)所示:

$$\mathbf{S}_{\boldsymbol{\epsilon}} = \mathbf{S}_y + \mathbf{K}_b \mathbf{S}_b \mathbf{K}_b^T \quad (2)$$

其中 \mathbf{S}_y 描述了仪器的测量误差,是观测向量的先验协方差矩阵; \mathbf{S}_b 描述了模型中非反演参数的不确定性,是非反演参数的先验协方差矩阵; \mathbf{K}_b 表示的是观测向量对模型中非反演参数的雅可比矩阵。

反演问题是从测量数据中推断出状态向量。假设误差服从高斯概率密度函数,且观测向量与真实状态附近的状态向量线性相关,则可以得到状态向量的最优估计:

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_a + (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_{\boldsymbol{\epsilon}}^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_{\boldsymbol{\epsilon}}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K} \mathbf{X}_a) \quad (3)$$

其中, \mathbf{X}_a 和 \mathbf{S}_a 分别表示状态向量 \mathbf{x} 的先验估计和误差协方差矩阵,并且 $\mathbf{S}_{\boldsymbol{\epsilon}}$ 是测量误差协方差矩阵。 \mathbf{K} 被称为加权函数矩阵或雅可比矩阵,并且由每个前向模型元素相对于每个状态向量元素的偏导数组

成,即 $K_{i,j} = \partial y_i / \partial x_j$, ($i = 1, \dots, m$; $j = 1, \dots, n$) ($K_{i,j}$ 表示矩阵 K 中第 i 行第 j 列的元素, F_i 是第 i 个模拟测量值, x_j 是状态向量 x 中的第 j 个元素)。雅可比描述了观测值对反演参数的敏感性。根据最优估计理论^[16], 后验误差协方差矩阵 \hat{S} 与测量误差和先验误差密切相关:

$$\hat{S} = (K^T S_e^{-1} K + S_a^{-1})^{-1}, \quad (4)$$

\hat{S} 对角元素的平方根为对应参数的后验误差。每个状态参数的信息量通常用平均核矩阵来表征^[2, 17-23]。根据定义, 平均核矩阵是后验状态向量相对于真实状态的导数:

$$\frac{\partial \hat{x}}{\partial x} = A = (K^T S_e^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_e^{-1} K, \quad (5)$$

矩阵 A 是归一化矩阵, 其对角元素 $A_{i,i}$ 即为状态向量 x 中的第 i 个参数的 DFS, 当某个参数的 DFS 大于 0.5, 可以认为该参数能够通过观测反演得到^[24]。而观测系统总的 DFS 是矩阵 A 的对角元素之和, 即矩阵 A 的迹:

$$\text{DFS} = \text{Trace}(A) = \sum_{i=1}^n A_{i,i}. \quad (6)$$

2 卫星观测模拟

将信息量分析理论应用于 PSAC 气溶胶反演, 需要知道测量矢量和状态矢量, 以及它们的误差协方差矩阵。在这一部分中, 首先简要描述 PSAC 观测特征和用于模拟 PSAC 观测的正演模型。然后, 给出了状态向量中选择的参数以及先验误差和测量误差协方差矩阵的假设。

2.1 PSAC 测量和观测向量

PSAC 搭载于环境减灾二号卫星 (HJ-2A/B 卫星), 通过时间同步和空间覆盖的探测方式获取光谱、角度和偏振三个维度的大气信息, 获取成像区域上空的大气参数, 用于相机等载荷的图像校正。提供 9 个波段的 Stokes 矢量的前三个分量 (I, Q 和 U), PSAC 基本观测参数如表 1 所示。

根据表 1 所示, PSAC 的辐射强度测量的相对不

表 1 PSAC 的基本参数

Table 1 The basic characteristics of PSAC sensor

设备参数	值
中心波长/nm	410, 443, 555, 670, 865, 910, 1380, 1610, 2250
相应带宽/nm	20, 20, 20, 20, 40, 20, 40, 60, 80
观测量	I, Q, U
辐射定标误差	$\leq 7\%$
偏振定标误差	$\leq 0.5\%$

确定的上限为 7%, 按照 7% 进行计算, 即 $\epsilon_l/I = 0.07$, ϵ_l 表示绝对定标误差。对于偏振测量其线偏振度的最大绝对误差为 0.5%, 为了更精确地描述偏振测量误差, 将线偏振度的误差按式 (7) 进行分解:

$$\epsilon_{\text{DOLP}} = 0.0025 + 0.0025 * \text{DOLP}, \quad (7)$$

线偏振度 $\text{DOLP} = I_p/I$, I_p 为偏振辐亮度。因此偏振辐亮度的绝对误差为:

$$\epsilon_{I_p} = I_p \frac{\epsilon_l}{I} + I \epsilon_{\text{DOLP}}. \quad (8)$$

为了研究增加红外波段以及偏振探测对气溶胶信息量的改变, 分析了四种不同观测模式如表 2 所示。

表 2 用以信息量分析的四种观测模式

Table 2 The list of scenarios of satellite observations used for the information content analysis

观测模式	单角度观测包含的测量值
S1	410, 443, 555, 670, 865 nm 波段的标量值
S2	410, 443, 555, 670, 865 nm 波段的标量值和偏振值
S3	410, 443, 555, 670, 860, 1 610 和 2 250 nm 波段的标量值
S4	410, 443, 555, 670, 860, 1 610 和 2 250 nm 波段的标量值和偏振值

在不同模式其观测向量构成不同, 以 S4 为例。其观测向量被定义为:

$$y = [I_{\lambda_1}, \dots, I_{\lambda_7}, I_{p_{\lambda_1}}, \dots, I_{p_{\lambda_7}}], \quad (9)$$

下标 λ_1 到 λ_7 分别表示 410, 443, 555, 670, 865, 1610 和 2250 nm 波段。在 S1 到 S4 中, 观测向量分别包含 5, 10, 7, 和 14 个观测值。假设观测误差不随波段和观测角度的变化, 以 S4 模式为例, 则仪器的测量误差协方差矩阵 S_y 如下所示:

$$S_y = \text{diag}([\epsilon_{I_{\lambda_1}}^2, \dots, \epsilon_{I_{p_{\lambda_1}}}^2, \dots]^T), \quad (10)$$

$\epsilon_{I_{\lambda_1}} = \epsilon_l * I_{\lambda_1}$ 为波段 λ_1 处标量值的绝对误差, $\epsilon_l = 0.07$, 如表 1 所示。 $\epsilon_{I_{p_{\lambda_1}}}$ 为波段 λ_1 处偏振值的绝对误差, 计算方法如式 (8) 所示。

模拟所用的几何条件为: 太阳天顶角为 30° , 观测天顶角范围为 $0^\circ \sim 75^\circ$, 相对方位角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。模拟信息量随角度的变化规律, 进而获得气溶胶信息量大的角度范围。

2.2 前向模型

使用 UNL-VRM 作为正演模型来模拟 PSAC 的观测。UNL-VRM 是专门为模拟大气遥感观测和

反演气溶胶、气体、云和地表特性而开发数值模拟平台,将球形粒子的线性化散射代码与矢量线性化辐射传输模型相结合^[17],完成对大气层顶光辐射强度与偏振状态量的模拟,如图 1 所示的 UNL-VRM 辐射传输模型处理流程。UNL-VRM 前向模型由 6 个部分组成:1) 矢量辐射传输模型,VLIDORT^[25];2) 线性化 MIE 电磁散射代码^[28];3) 线性化 T 矩阵散射代码^[28];4) 大气中分子散射计算模块;5) 计算大气中气体吸收模块;6) 计算双向反射/偏振分布函数(BRDF/BPDF)模块。UNL-VRM 模型的突出特征就是线性化的 Mie/T 矩阵散射代码。Stokes 矢量 I 可以对一系列的粒子、气体和地表参数进行雅可比矩阵计算,主要包括 AOD,气溶胶单次散射反照率(SSA)、气溶胶粒子谱、复折射指数、气体吸收和混合比以及地表反射率等参数。雅可比矩阵也被称为加权函数,可以计算整层或者廓线特性参数,例如,整层大气柱下或者某一高度下的 AOD。此外利用该辐射传输软件还可以评估气溶胶反演过程中,仪器观测中包含气溶胶参数的信息量、DFS 和进行反演误差分析^[17, 22]。

正演计算的输入有:(a)光谱和几何参数(传感器设定),(b)大气特性与组成(大气温度,压强,气体混合比和气溶胶浓度),(c)单模或多模态气溶胶

微物理参数(粒子尺度分布和复折射指数),(d)地表反射率。

2.3 气溶胶模型以及地表模型

本研究中使用 5 对参数来描述气溶胶模型,这 5 对参数分别是:粒子柱浓度 v_0^f 和 v_0^c ,有效半径 r_{eff}^f 和 r_{eff}^c ,有效方差 v_{eff}^f 和 v_{eff}^c ,折射率实部 m_r^f 和 m_r^c 以及折射率虚部 m_i^f 和 m_i^c 。上标 f 和 c 分别代表细模粒子和粗模粒子。双峰对数正态分布函数常用来描述球形气溶胶的粒子谱分布,用有效半径和有效方差作为 UNL-VRM 的输入参数来进行模拟^[22]。

此外,气溶胶复折射率随波长变化而变化,为了描述折射率的光谱依赖性,引入如下幂指数关系^[3]:

$$\begin{cases} m_r(\lambda) = m_r(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-b_r} \\ m_i(\lambda) = m_i(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-b_i} \end{cases}, \quad (11)$$

$m_r(\lambda_0)$, b_r , $m_i(\lambda_0)$ 和 b_i 为系数, λ_0 表示参考波长,下标 r 和 i 分别表示折射率实部和折射率虚部。在此文中,参考波长 $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$, $m_r(\lambda_0)$ 和 $m_i(\lambda_0)$ 对应与 550 nm 处的折射率。然后根据下式可以进一步获得 $m_r(\lambda_0)$, b_r , $m_i(\lambda_0)$ 和 b_i 的雅可比表达式^[26]:

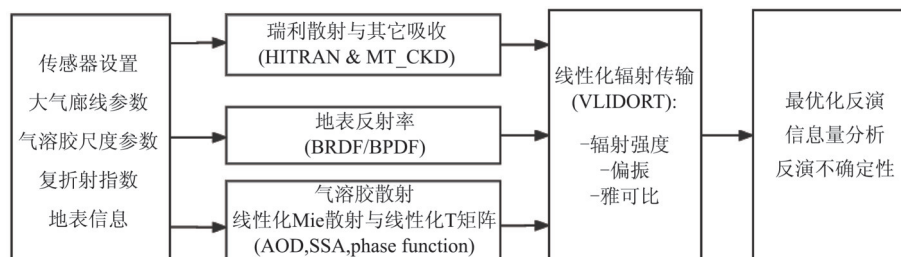


图 1 UNL-VRM 辐射传输模型的处理流程(来源:UNL-VRM 说明文档)

Fig. 1 Flowchart of the UNL-VRM components (Documentation of UNL-VRM)

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial m_r(\lambda_0)} = \frac{\partial I}{\partial m_r(\lambda)} \frac{\partial m_r(\lambda)}{\partial m_r(\lambda_0)} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-b_r} \frac{\partial I}{\partial m_r(\lambda)} \\ \frac{\partial I}{\partial b_r} = \frac{\partial I}{\partial m_r(\lambda)} \frac{\partial m_r(\lambda)}{\partial b_r} = -m_r(\lambda_0) \times \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-b_r} \ln\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \frac{\partial I}{\partial m_r(\lambda)} \end{cases}. \quad (12)$$

利用两种气溶胶模型来进行模拟计算,一种是以细粒子为主的气溶胶,另一种是以粗粒子为主的沙尘型气溶胶。

两种气溶胶模型的粒子谱分布和折射率参数以及相应的不确定度来自之前的研究^[27],如表 3 所示,斜杠后面的为相应参数误差。粒子柱浓度 v_0^f 和 v_0^c 的不确定度为相对误差^[24],其他参数的为绝对误

差。粒子谱分布如图 2 所示。

在分析 DFS 的角度相关性时,使用的地表模型为内置的植被模型。在分析 DFS 随不同大气条件和地表反射率的变化时,选择朗伯体模型,其相应误差为 40% 相对误差^[24]。

2.4 状态向量

对于气溶胶反演中的 DFS 的信息量分析,根据

表3 细粒子为主和粗粒子为主的气溶胶参数

Table 3 The aerosol parameters for fine-dominated and coarse-dominated aerosol models

气溶胶模型	$V_0^f/\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$	$V_0^c/\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$	$r_{\text{eff}}^f/\mu\text{m}$	$r_{\text{eff}}^c/\mu\text{m}$	$v_{\text{eff}}^f/\mu\text{m}$	$v_{\text{eff}}^c/\mu\text{m}$	m_r (550 nm)	m_i (550 nm)
细粒子为主	0.2145	0.114/	0.25/	2.82/	0.44/	0.31/	1.43/	0.003/
	/100%	100%	0.03	0.28	0.046	0.051	0.05	0.003
粗粒子为主	0.057/	0.436/	0.12/	1.99/	0.25/	0.36/	1.51/	0.003 6/
	100%	100%	0.025	0.24	0.097	0.06	0.05	0.003

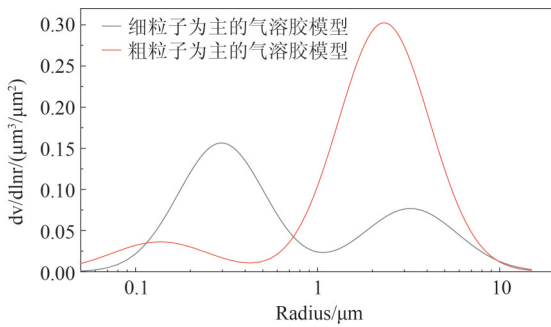


图2 两种气溶胶模型的粒子谱分布

Fig. 2 The size distribution of two aerosol models

上述介绍以S4观测为例,状态向量可以定义为:

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_a^T, \mathbf{x}_s^T]^T, \quad (13)$$

其中,上标T表示矩阵的转置, \mathbf{x}_a 代表大气参数, \mathbf{x}_s 为地表参数,其定义如下所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_a = [V_0^f, V_0^c, m_r^f, m_i^f, m_r^c, m_i^c, r_{\text{eff}}^f, v_{\text{eff}}^f, r_{\text{eff}}^c, v_{\text{eff}}^c]^T \\ \mathbf{x}_s = [r_{\lambda_1}, r_{\lambda_2}, r_{\lambda_3}, r_{\lambda_4}, r_{\lambda_5}, r_{\lambda_6}, r_{\lambda_7}]^T \end{cases}, \quad (14)$$

$m_r(\lambda_0)$, b_r , $m_i(\lambda_0)$ 和 b_i 并没包含在 \mathbf{x} 中,因为只反演在550 nm处的折射率。 $r_{\lambda_1}, \dots, r_{\lambda_7}$ 为相应波段的地表反射率。 \mathbf{x}_a 中参数的先验值和误差可以从表3获得, \mathbf{x}_s 的先验值从UNL-VRM内置的地表反射率库获得。假定状态向量中的参数的先验误差彼此独立,因此以S4为例,状态向量的先验误差协方差矩阵的定义如下所示:

$$S_a = \text{diag}([\sigma_{V_0^f}^2, \sigma_{V_0^c}^2, \sigma_{m_r^f}^2, \sigma_{m_i^f}^2, \sigma_{m_r^c}^2, \sigma_{m_i^c}^2, \sigma_{r_{\text{eff}}^f}^2, \sigma_{v_{\text{eff}}^f}^2, \sigma_{r_{\text{eff}}^c}^2, \sigma_{v_{\text{eff}}^c}^2, \dots, \sigma_{r_{\lambda_7}}^2]^T), \quad (15)$$

气溶胶相应参数的误差如表3所示,地表参数的先验相对误差设置为40%^[24]。

3 植被地表气溶胶和地表参数信息量分析

3.1 气溶胶和地表参数总的信息量分析

为了便于分析S1-S4模式下,不同散射角下气溶胶和地表参数总的DFS变化。设置粗模式为主的气溶胶和细模式为主的气溶胶的AOD在550 nm处为1。其气溶胶参数的总的DFS和地表参数总的DFS如图3和图4所示:

图3展示的是粗粒子为主的气溶胶,气溶胶和地表参数的DFS随角度的变化规律。比较S1和S2两种场景下的DFS变化图,发现,气溶胶DFS有明显变化(图3(a-b)),而地表DFS变化不大(图3(e-f))。发现在S1的图3(a)图中,总的DFS在2左右,随角度变化不明显,而在S2的图3(b)图中,由于增加相应波段的偏振反射率,DFS有明显增加。在散射角80°~120°范围内,其DFS增加值约为0.4左右,散射角范围130°~180°之间,其DFS增加量大于0.5,在散射角160°附近有最大值为1.6。因此在S1场景中,可以反演2个气溶胶参数,在增加相应波段的偏振信息S2场景中,可以反演3-4个气溶胶参数。比较图3(e-f)发现,偏振信息的增加对地表参数的反演能力提升不大,其DFS在1~2.5之间,表明能获取1到2个地表参数。

比较S1和S3发现,在S1的基础上增加1610和2250 nm波段的标量反射率对大气的DFS增加贡献很少,其DFS大约增加0.3左右。然而对地表参数的DFS提升很大,平均提升有1.5左右,在散射角为160°附近DFS增加为约为2。因此增加短波红外波段的标量信息,能反演2-4个地表参数,而气溶胶参数为1-2个。

比较S1和S4发现,增加短波红外波段并增加偏振信息,使气溶胶总DFS和地表总DFS都有较大提升。在散射角为80°~120°时,气溶胶的DFS增加约为1,在散射角为130°~180°之间时,气溶胶总DFS平均增加约为0.8,在140°附近有最大值1.8。地表参数总的DFS平均增加约为1.8左右。因此,增加短波红外波段(1610和2250 nm)以及偏振信息,能反演4-5个气溶胶参数,2-4个地表参数。

图4描述了以细粒子为主的气溶胶模型中,气溶胶总的DFS和地表总的DFS随角度的变化规律。比较S1和S2,可以看到图4(a)中DFS值范围在1~1.3之间,图4(b)中DFS值范围在1.3~3之间。图4(a)中,DFS对角度变化不大,图4(b)中,在散射角为80°~140°时其DFS在1.5左右,当散射角为140°~

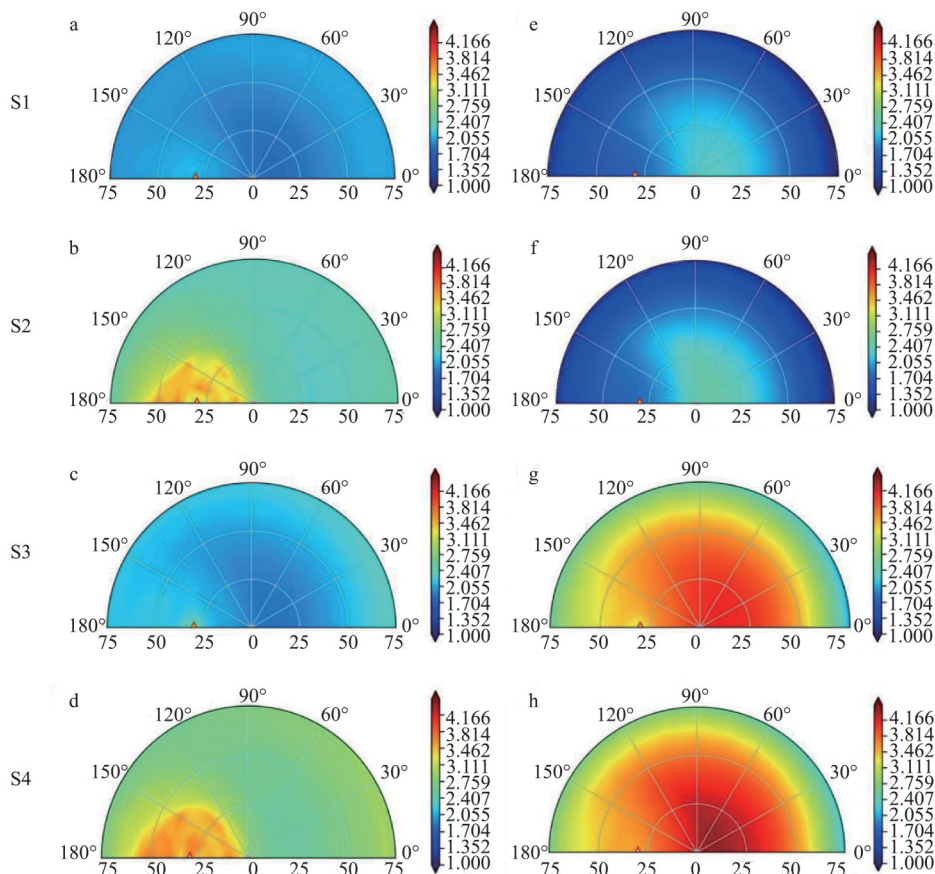


图3 粗粒子为主的气溶胶模型中大气参数总的 DFS(a-d)和地表参数总的 DFS(e-h)随观测角度变化的极坐标图 注:太阳天顶角为 30° ,极坐标半径表示观测天顶角($0^\circ\sim 75^\circ$),极坐标角度表示相对方位角($0^\circ\sim 180^\circ$),S1-S4定义如表2所示

Fig. 3 Polar plots total DFS of aerosol parameters (a-d) and total DFS of surface parameters (e-h) varying with observation angle in coarse-dominated aerosol model Note: The solar zenith angle is 30° , the polar radius represents observation zenith angle from 0° to 75° and the polar angle is relative azimuth angle from 0° to 180° , the scenarios S1-S4 are defined as Table 2

160° 时,其 DFS 从 1.5 增加到 3,然后当散射角为 $160^\circ\sim 180^\circ$ 时,其 DFS 从 3 减小到 1.5。对地表参数 DFS 进行比较(e 和 f)发现,偏振信息的增加对地表的 DFS 提升贡献较小。其 DFS 变化范围为 1.3 到 3,其平均 DFS 为 2.5。因此,在 S1 中,能反演 1 个气溶胶参数,同时也能反演 1-3 个地表参数。在 S2 中,能反演 1-3 个气溶胶参数,同时也能反演 1-3 个地表参数。

比较图 4 中的 S1 和 S3,发现气溶胶的 DFS 没有明显增加(a 和 c),而地表参数的 DFS 范围从 1.3~3 增加为 3.1~5。其 DFS 的平均值由 2.5 增加到 4.4。因此,在细粒子为主的气溶胶中,增加短波红外波段的标量值对气溶胶参数的反演能力提升不大,而能多反演 2 个地表参数。因此,在 S3 中,能反演 1 个气溶胶参数,3-5 个地表参数。

比较图 4 中的 S1 和 S4,增加短波红外波段以及偏振反射率对气溶胶参数以及地表参数的 DFS 都

有较大提升。在散射角为 $80^\circ\sim 140^\circ$ 时其 DFS 在 1.7 左右,当散射角为 $140^\circ\sim 160^\circ$ 时,其 DFS 从 1.7 增加到 3.8,然后当散射角为 $160^\circ\sim 180^\circ$ 时,其 DFS 从 3.8 减小到 2。其地表参数的 DFS 从 3.1~5。因此,在 S4 中,能反演 2-4 个气溶胶参数,3-5 个地表参数。

为探究不同气溶胶模型对反演气溶胶参数与地表参数的影响,以 S4 为例。如图 5 所示,在散射角为 $80^\circ\sim 140^\circ$ 时,粗粒子为主的气溶胶模型的 DFS 要大于以细粒子为主的气溶胶模型,在 $140^\circ\sim 160^\circ$ 时,细模式的气溶胶 DFS 快速增加,而粗模式气溶胶缓慢增加。在 $160^\circ\sim 180^\circ$ 时,细模式的气溶胶 DFS 快速减小,而粗模式的 DFS 改变不大。而地表参数的 DFS 比较(图 3 和图 4 中 h)发现,DFS 随角度的相对分布,改变不大,但是其值从 2~4(图 3 的 h)增加到 3~5(图 4 的 h)。因此,整体来看在 S4 观测中,以细粒子为主的气溶胶模式中,其气溶胶参数的总 DFS 要小于以粗粒子为主的气溶胶模式;其地表参

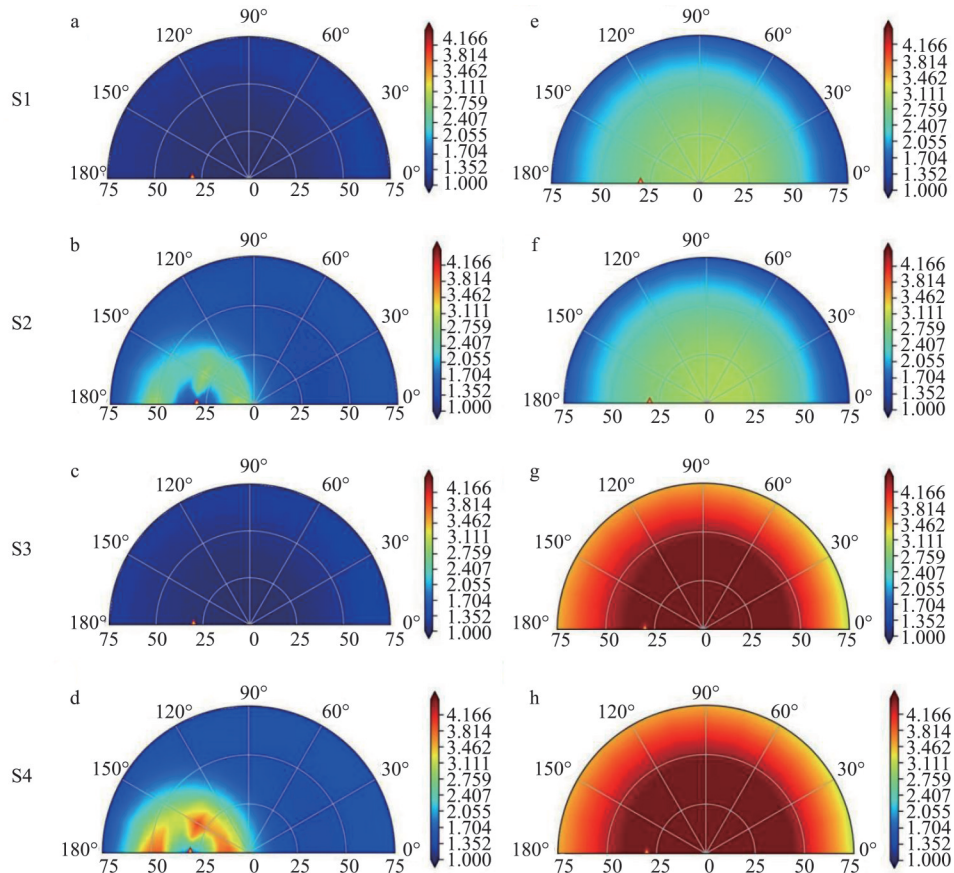


图4 细粒子为主的气溶胶模型中大气参数总的DFS(a-d)和地表参数总的DFS(e-h)随观测角度变化的极坐标图

注:S1-S4及极坐标定义与图3一致

Fig. 4 Polar plots total DFS of aerosol parameters(a-d) and total DFS of surface parameters(e-h) varying with observation angle in fine-dominated aerosol model

Note: The scenarios S1-S4 and polar coordinates are defined similar to Fig. 3

数总的DFS要大于以粗粒子为主的气溶胶模式。

上述内容皆在分析气溶胶总DFS和地表总DFS在不同观测模式,不同气溶胶模型随散射角的变化,为了更加清晰直观,我们对气溶胶总DFS和地表总DFS按散射角进行统计分析,其散射角范围为 $60^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。统计结果如表4所示。

表中Min、Max、均值和标准差,分别表示总的DFS随角度变化的最小值、最大值、均值和标准差。其后缀F和C分别表示在以细粒子为主气溶胶模型和在以粗粒子为主气溶胶模型。从表中可以看出,不论是细粒子为主的气溶胶模型还是以粗粒子为主的气溶胶模型,S4模式下,气溶胶总

表4 气溶胶总DFS和地表总DFS随角度变化的统计分析

Table 4 Statistical analysis of aerosol total DFS and surface total DFS as a function of angle

	观测模式	Min_F	Max_F	均值_F	标准差_F	Min_C	Max_C	均值_C	标准差_C
气溶胶总的DFS	S1	1.03	1.22	1.09	0.06	1.81	2.14	1.95	0.08
	S2	1.27	2.99	1.73	0.47	2.25	3.64	2.65	0.36
	S3	1.03	1.25	1.10	0.06	1.85	2.54	2.04	0.13
	S4	1.30	4.00	1.97	0.73	2.52	3.77	2.87	0.32
地表总的DFS	S1	1.34	3.00	2.51	0.47	1.03	2.29	1.86	0.35
	S2	1.34	3.02	2.53	0.48	1.06	2.52	1.96	0.39
	S3	3.12	4.93	4.43	0.49	2.08	4.14	3.57	0.51
	S4	3.13	4.97	4.46	0.50	2.22	4.41	3.73	0.54

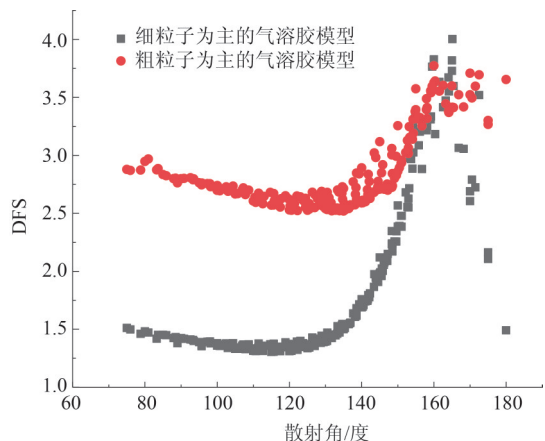


图5 不同气溶胶模型中气溶胶总的DFS随散射角的变化
Fig. 5 The variation of total DFS of aerosol parameters with the scattering angle in different aerosol models

DFS 和地表总 DFS 的最小值、最大值以及均值皆为

最大。

3.2 气溶胶和地表各参数的DFS分析

为分析气溶胶模型和地表模型中每个参数的DFS随角度的变化规律,分析两种不同类型的气溶胶模型(细粒子为主和粗粒子为主),以S4为例进行分析。粗粒子为主的气溶胶各参数DFS随角度的变化如图6所示。

图6描述了粗粒子为主的气溶胶模型各参数的DFS随角度的变化趋势,DFS的范围为0~1,当某个参数的DFS值大于0.5时,表明这个参数可以从反演中获得。整体来看,在S4中能通过反演获得的5个气溶胶参数分别为:气溶胶粒子谱分布中的柱浓度 v_0^f 和 v_0^c (图6中的v-f和v-c),粗模式中555 nm处的折射率实部 m_r^c 及折射率虚部 m_i^c (图6中的 m_{r-c} 和 m_{i-c})以及粗模式中的有效半径 r_{eff}^c (图6中的

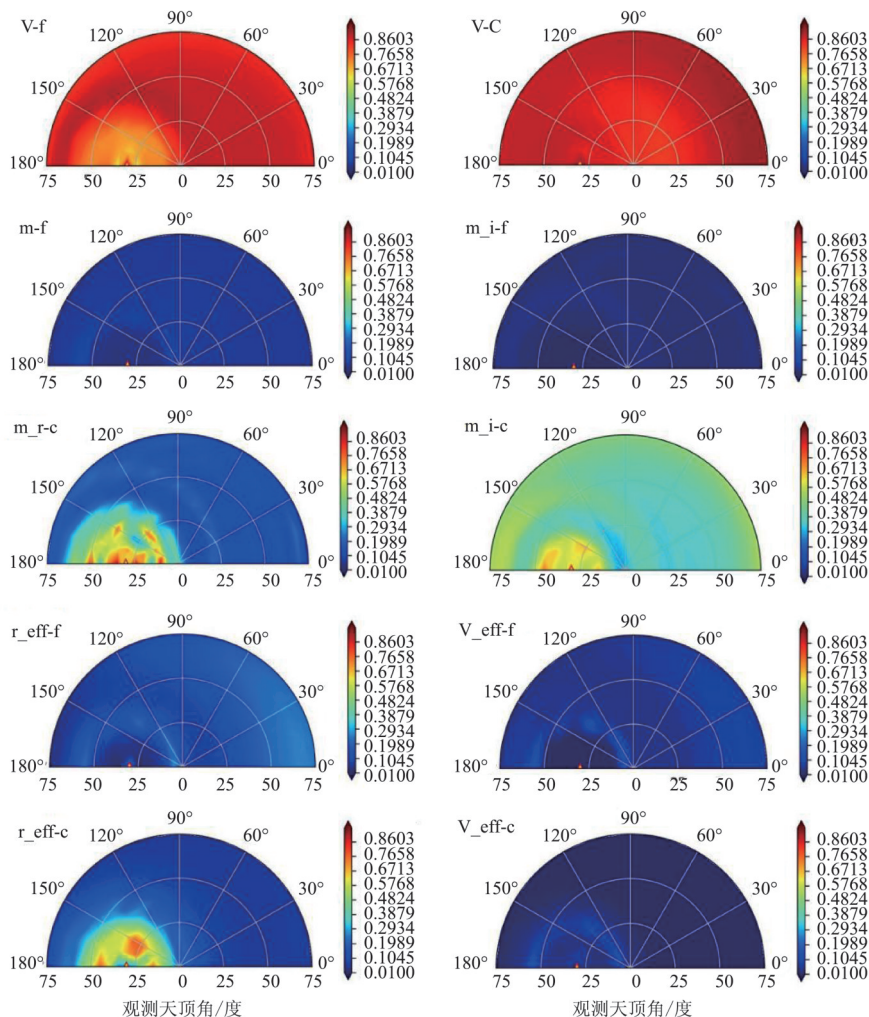


图6 粗粒子为主的气溶胶各参数的DFS随角度的变化
注:极坐标定义与图3一致

Fig. 6 The variation of DFS with observation angles of aerosol parameters in coarse-dominated aerosol model
Note: polar coordinates are defined similar to Fig. 3

$r_{\text{eff-c}}$)。而其余气溶胶参数不管在何种观测几何条件下,其DFS均小于0.5。在能反演的参数中,并不是每个角度都能获得足够的参数信息。柱浓度 v_0^f 和 v_0^c 不管在何种观测条件下都能从S4的观测模式下通过反演获得,但是在散射角大于 140° 时, v_0^f 的DFS随着散射角的增大而较小从0.9降低到0.7。折射率实部 m_r^c 、折射率虚部 m_i^c 和有效半径 r_{eff}^c 只有在特定角度范围内才能被反演获得, m_r^c 在散射角大于 150° 时能被反演获得(图6中 m_{r-c}), m_i^c 在散射角大于 135° 时,其DFS大于0.5(图6中 m_{i-c})能从观测中反演获得, r_{eff}^c 在散射角为 $160^\circ\sim 175^\circ$ 之间能被反演获得(图6中 $r_{\text{eff-c}}$)。

细模式为主的气溶胶模型参数的DFS随角度

的变化如图7所示。

从图7整体来看,能够通过反演得到的4个气溶胶参数分别为:气溶胶粒子谱分布中的柱浓度 v_0^f 和 v_0^c (图7中的 $v-f$ 和 $v-c$),细模的折射率实部 m_r^f (图7中的 m_{r-f})和粗模的折射率实部 m_r^c (图7中的 m_{r-c})。同粗粒子为主的气溶胶模型类似,并不是每个角度都能获得足够的参数信息。从图中可以看出 v_0^f 可以在任意观测角度下通过反演获得其平均DFS约等于0.93,而 v_0^c 只能在有限散射角范围 $160^\circ\sim 165^\circ$ 之间进行反演获得。 m_r^f 能在散射角 $140^\circ\sim 175^\circ$ 之间进行反演获得,在此散射角范围内其平均DFS为约0.77。 m_r^c 在散射角为 $155^\circ\sim 175^\circ$ 之间其DFS大于0.5,因此可以通过反演获得。

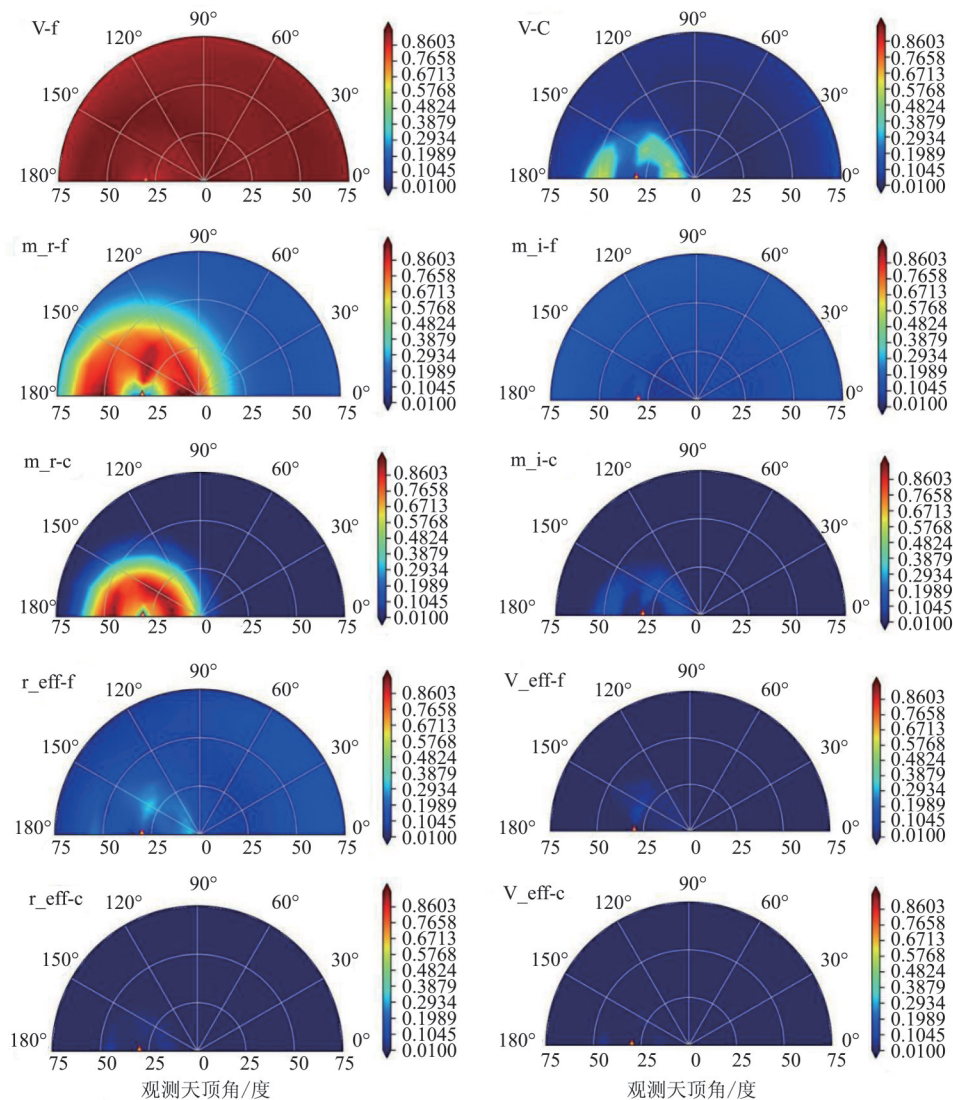


图7 细粒子为主的气溶胶各参数的DFS随观测角度的变化

注:极坐标定义与图3一致

Fig. 7 The variation of DFS with observation angles of aerosol parameters in fine-dominated aerosol model

Note: Polar coordinates are defined similar to Fig. 3

植被地表模型下,地表各参数 DFS 随角度变化如图 8 所示。

从图 8 中可以发现,不论是细粒子为主的气溶胶还是粗粒子为主的气溶胶模型中,410 nm 和 443 nm 处的地表反射率的 DFS 皆小于 0.5,因此不能从 S4 中获得。在两种气溶胶模式中,865 nm 和 1 610 nm 以及 2 250 nm 处的地表反射率皆能从观测中通过反演获得。两种气溶胶模式下,最大差异体现在 555 nm 和 670 nm 的地表反射率上。在粗粒子为主的模式中,670 nm 处的 DFS 小于 0.5,不能被反演出来,可能是因为植被对红波段反射较弱,在加上粗粒子的多次散射对信号进一步削弱,导致其信息量不足。对比图 8 的 c 和 j,可以明显发现,在散射角较大的区域 c 中的 DFS 有着明显降低,这可能与粗粒子的多次散射,导致其信息减弱有关。

3.3 气溶胶和地表参数的后验误差分析

经过气溶胶和地表各参数的 DFS 分析后,发现在 S4 观测模式下,以粗粒子为主的气溶胶模型中可以对气溶胶的 5 个参数进行反演(柱浓度 v_0^f 和 v_0^c , 折射率实部 m_r^c 及折射率虚部 m_i^c , 粗模式中的有效半径 r_{eff}^c), 对 4 个地表参数进行反演(555 nm、865 nm、1 610 nm 和 2 250 nm 的地表反射率)。在以细粒子为主的气溶胶模型中可以对气溶胶的 4 个参数进行反演(柱浓度 v_0^f 和 v_0^c , 细模折射率实部 m_r^f

和粗模的折射率实部 m_r^c), 对 5 个地表参数进行反演(555 nm、865 nm、1610 nm 和 2 250 nm 的地表反射率)。因此,对能反演的参数进行后验误差分析如图 9 所示。

图 9(a-e)分别为柱浓度 v_0^f 和 v_0^c , 折射率实部 m_r^c , 折射率虚部 m_i^c , 粗模式中的有效半径 r_{eff}^c 的后验相对误差。从图 9(a-e)可以看出,尽管可以对 5 个气溶胶参数反演但不同参数的后验误差在不同角度下明显不同。柱浓度 v_0^f 和 v_0^c 的后验相对误差较小,其均值分别为 0.16 和 0.13,表明经过 S4 模式观测,其不确定度明显减小,与其 DFS 较大相一致(图 6 中 v-f 和 v-c)。而折射率实部 m_r^c , 折射率虚部 m_i^c 和粗模式中的有效半径 r_{eff}^c 这三个参数的后验误差随角度变化明显,在散射角较大时,其后验误差较小,与其 DFS 随角度变化相一致。

经过对图 9 和图 6-7 对比分析发现,当某个 DFS 较大时,其相应的后验误差较小,即参数能被在较小的误差内反演出来。后验误差越小,表明其反演出来的参数值越精确。

4 不同大气和地表条件下信息量分析

上述分析是在大气条件 550 nm 处的 AOD 为 1 时,地表反射率为固定值进行的分析。为了便于分析不同 AOD,不同地表反射率下,气溶胶和地表参数的信息量变化,设定太阳天顶角为 30° , 观测天顶

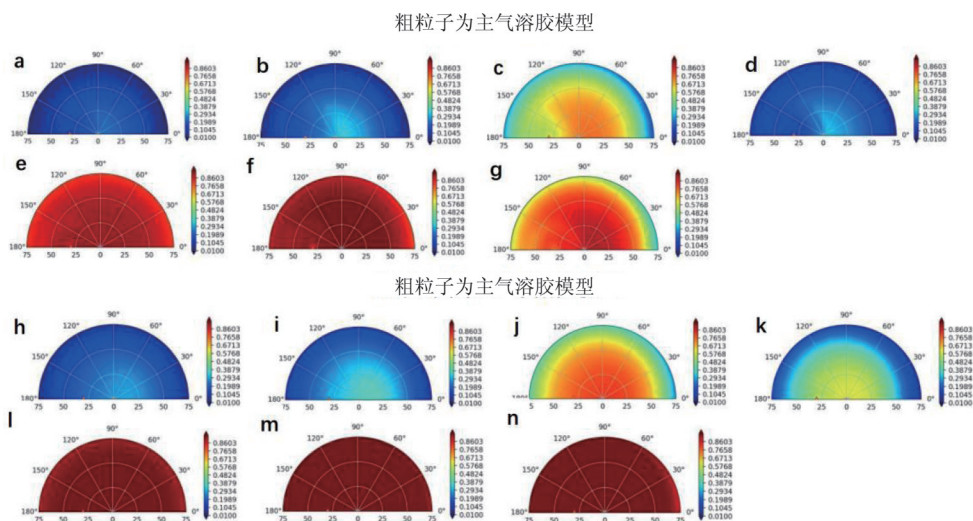


图 8 地表各参数 DFS 随观测角度变化的极坐标图 注:a-g 表示的是粗粒子为主的气溶胶模型下,410、443、555、670、865、1 610 和 2 250 nm 处地表反射率的 DFS 分布;h-n 表示的是细粒子为主的气溶胶模型下,相同波长处地表反射率的 DFS 分布;极坐标定义与图 3 一致

Fig. 8 Polar plots of surface parameters varying with observation angles Note: a-g represent the DFS distribution of surface reflectivity at 410, 443, 555, 670, 865, 1 610 and 2 250 nm in the coarse-dominated aerosol model. while h-n represents the DFS distribution in the fine-dominated aerosol model; Polar coordinates are defined similar to Fig. 3

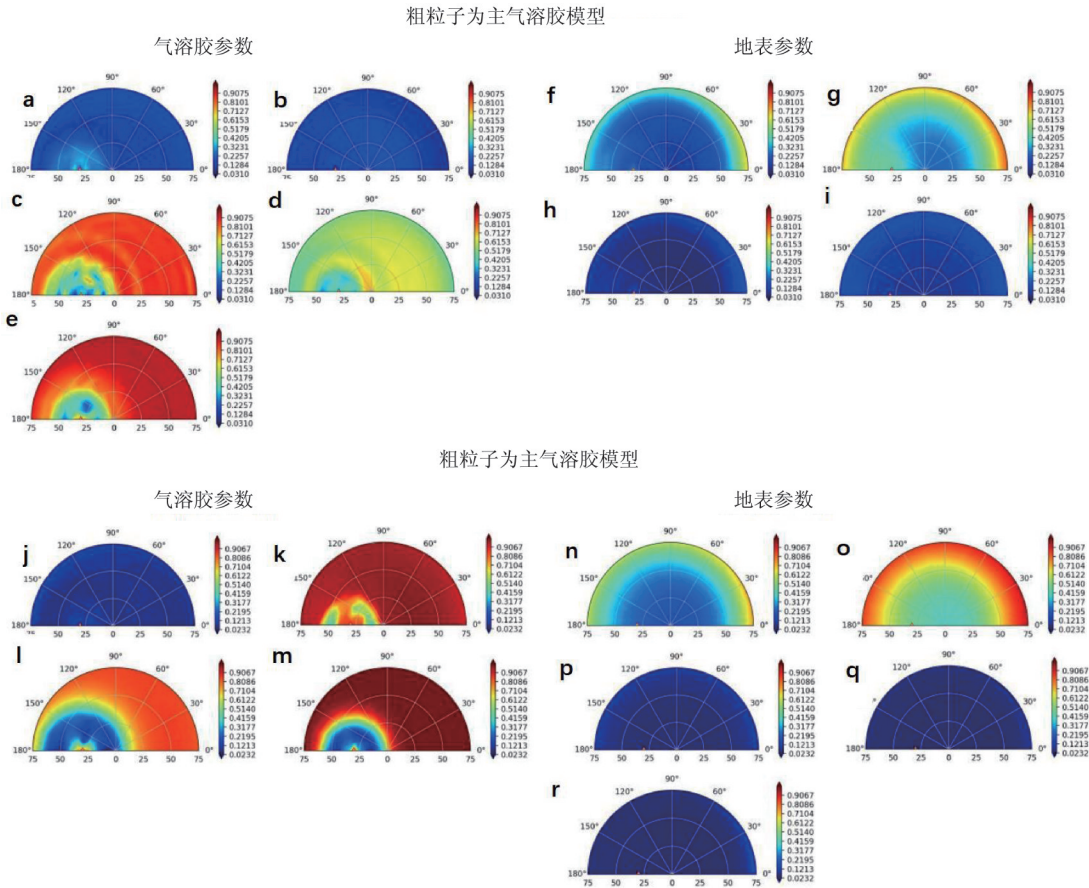


图9 反演参数的后验相对误差(0~1)随角度分布的极坐标图。

注:极坐标定义与图3一致

Fig. 9 Polar plots with angular distribution of a posteriori relative error (0~1) of inversion parameters

Note: Polar coordinates are defined similar as Fig. 3

角为40°,相对方位角为180°。AOD从0~5,地表反射率从0~1。在S1-S4四种观测模式下,细粒子为主的气溶胶模型,其参数总的DFS随AOD和地表反射率的变化如图10所示。

图10中S1-S4的定义如表2所示,图10(a-d)描述是在S1-S4中气溶胶总的DFS随AOD和地表反射率的变化,图10(e-h)描述的地表参数总的DFS随AOD和地表反射率的变化。观察图10(a)和图10(c),发现在相同AOD下,随着地表反射率的增加,气溶胶参数总的DFS随着地表反射率的增大而较小。发现当在S1和S3场景中,当AOD小于0.5地表反射率大于0.4的时,其DFS小于0.5,即不能反演任何气溶胶参数。如果在S1和S3场景中加上相应波段的偏振信息(图10(b)和图10(d)),发现只有在AOD很小时(约等于0),不能反演气溶胶参数,其他任何地表反射率下,都能反演出至少2个气溶胶参数。

观察图10(e-h),发现随着在相同地表反射率

下,随着AOD的增大其DFS逐渐较少,并且在波段不增加的前提下,增加偏振信息对地表参数的反演能力提升有限(图10(e-h))。增加短波红外波段后,其地表参数的反演能力有较大提升(对比图10(e-h))。因此,偏振信息的增加有利于在亮地表低污染的情况下,对气溶胶参数进行反演,短波红外波段的增加,有利于在高污染情况下获取地表信息。

下面分析在以细粒子为主的气溶胶模型中,气溶胶参数总的DFS和地表参数的DFS随AOD和地表反射率的变化如图11所示。

图11描述的在单角度S1-S4观测模式下,细粒子为主的气溶胶模型中,气溶胶总的DFS和地表参数总的DFS随AOD和地表反射率的变化,S1-S4和图11(a-h)的定义与图10中的一样。从图11(a)发现,当地表反射率大于0.3,AOD小于1时,其DFS小于0.5即不能准确反演任何一个气溶胶参数。在S1基础上增加相应波段的偏振信息图11(b),其

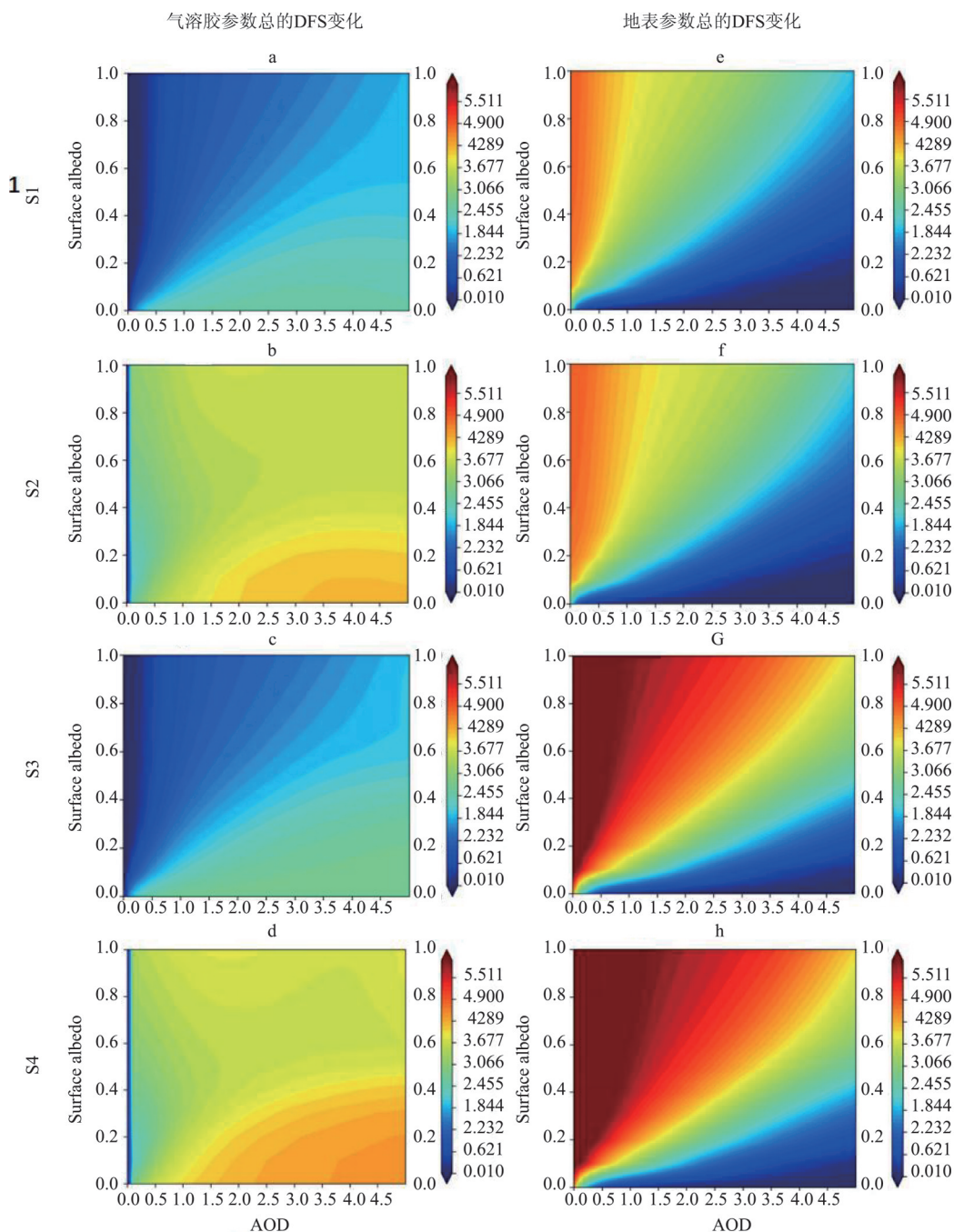


图 10 粗粒子为主的气溶胶模型下气溶胶参数(a-d)总的 DFS 和地表参数,(e-h)总的 DFS 随 AOD 和地表反射率的变化

Fig. 10 Variation of total DFS of aerosol parameters (a-d) and surface (e-h) parameters with AOD and surface albedo in coarse-dominated aerosol model

DFS 有较大的提高,至少能反演出 1 个气溶胶参数。在 S1 基础上增加短波红外波段标量信息后图 11 (c),在地表反射率小于 0.2, AOD 高值区域,其 DFS 有明显提高。在 S2 基础上增加短波红外波段的偏振信息后图 11(d)发现其 DFS 有较大的提升,其平均 DFS 从 2.2 增加到 3.2,意味着能多反演一个气溶胶参数。

比较图 11(e-f),发现在相同地表反射率时,地表参数总的 DFS 随着 AOD 的增大而减少,增加短波红外波段信息能提升在 AOD 高值条件下对地表参数的获取能力。与图 10 相应各图比较发现,相同地表反射率和相同 AOD 下,细粒子为主的气溶胶模型中,地表参数的总的 DFS 要大于以粗粒子为主的气溶胶中的地表参数总的 DFS,这可能是因为在散射

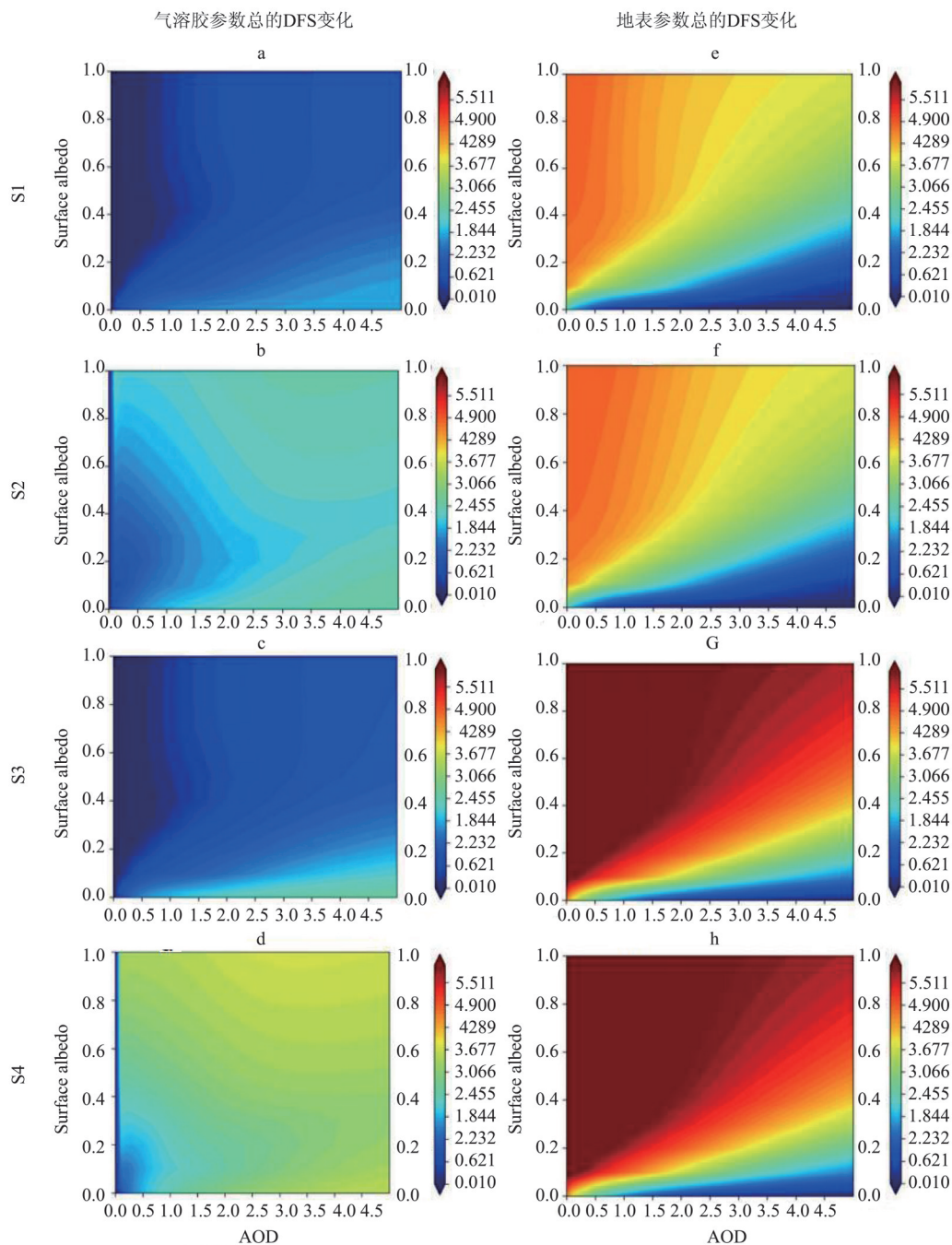


图 11 细粒子为主的气溶胶模型下气溶胶参数(a-d)总的 DFS和地表参数,(e-h)总的DFS随AOD和地表反射率的变化

Fig. 11 Variation of total DFS of aerosol parameters (a-d) and total DFS of surface (e-h) parameters with AOD and surface albedo in fine-dominated aerosol model

角较大的区域,粗粒子的对地表信号的散射要强于细粒子,使卫星接收到的地表信号减弱。

5 结论

根据卫星 PSAC 载荷的观测模式,利用 UNL-VRM 模拟了不同情景下多光谱单角度偏振和辐射测量,进行了气溶胶和地表参数 DFS 的观测角度依赖分析,并对其参数的后验误差进行分析。在此基

础上,又分析了气溶胶和地表参数的 DFS 随 AOD 和地表反射率的变化趋势。通过这些分析,得到以下结论:

(1) 植被地表下,对于粗粒子为主的气溶胶模型,利用 410~865 nm 波段的标量信息对于粗粒子为主的气溶胶中只有能反演 2 个气溶胶参数,1-2 个地表参数,对于细粒子为主的气溶胶中能反演 1 个气

溶胶参数和1-3地表参数。增加短波红外波段的标量信息后,地表参数的反演能力有了较大提高大约2个DFS,再增加410~2500 nm波段的偏振信息后,能多获取3个气溶胶参数。因此,偏振信息的增加能提高气溶胶参数的能力,短波红外波段的增加对能极大的提高地表参数反演能力,同时对气溶胶参数的反演能力也有一定的提升。

(2)利用410~2500 nm波段的标量和偏振信息对不同散射角气溶胶总的DFS进行分析,发现散射角在 80° ~ 140° 范围内,粗粒子为主的气溶胶总的DFS在2.5~3之间,而细粒子为主的气溶胶总的DFS在1.5~2之间。散射角在 140° ~ 160° 范围内,粗粒子为主的气溶胶总的DFS从3缓变到3.8,而细粒子为主的气溶胶总的DFS快速的从2增加到4左右。散射角超过 160° 时,粗粒子为主的气溶胶总的DFS在3.5左右浮动,而细粒子为主的气溶胶总的DFS下降到2左右。因此,反演气溶胶参数的最优散射角范围是 140° ~ 180° 。

(3)利用410~2500 nm共7个波段的标量和偏振信息对具体反演的参数进行分析,发现对于粗粒子为主的气溶胶模型,能够反演出柱浓度 v_0^c 和 v_0^s ,粗模式折射率实部 m_r^c 及折射率虚部 m_i^c ,以及粗模式中有效半径 r_{eff}^c 。对于细粒子为主的气溶胶,能够反演出柱浓度 v_0^f 和 v_0^s ,细模的折射率实部 m_r^f 和粗模的折射率实部 m_r^c 。并通过对反演参数的后验误差分析,发现随角度变化不大且后验误差较小的参数是:粗粒子为主的气溶胶中的柱浓度 v_0^f 和 v_0^s ,细粒子为主的气溶胶重细模式的柱浓度 v_0^f ,其后验相对误差的均值分别为16%,13%和6%。其他参数的后验误差同角度密切相关,与参数的DFS分布类似,在散射角 140° ~ 175° 之间较小。

(4)分析在不同AOD和不同地表反射率下气溶胶总DFS和地表总的DFS变化规律,发现对于粗粒子为主气溶胶,只有标量信息时,当AOD小于0.5地表反射率大于0.4时,不能反演出相关的气溶胶参数。加上偏振信息后,至少能反演出2个气溶胶参数(AOD>0)。地表参数总的DFS在相同地表反射率的下,随着AOD的增大逐渐较少。对于细粒子为主的气溶胶,只有410~865 nm标量信息时,当地表反射率大于0.3,AOD小于1时,不能反演出气溶胶参数。加上偏振信息后,其至少能反演出2个参数。加上短波红外波段和相应的偏振信息后,能反演3-4个气溶胶参数。因此,偏振信息的增加有助

于亮地表下气溶胶参数的反演,增加短波红外波段能提升在AOD高值条件下对地表参数的获取能力。

本研究专注于短波红外波段和偏振信息的增加对植被地表上空气溶胶反演能力的探究,选择了两种具有代表性气溶胶模型。缺少其他地表类型的分析,如城市下垫面,在未来研究中,将进一步考虑不同地表类型下气溶胶参数的反演能力。

References

- [1] Zubko V, Kaufman Y J, Burg R I, et al. Principal component analysis of remote sensing of aerosols over oceans [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(3):730-745.
- [2] Hasekamp O P, Landgraf J. Retrieval of aerosol properties over the ocean from multispectral single-viewing-angle measurements of intensity and polarization: Retrieval approach, information content, and sensitivity study [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(D20):1-16.
- [3] Dubovik O, King M D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2000, **105**(D16):20673-20696.
- [4] Dubovik O, Lapyonok T, Litvinov P, et al. GRASP: a versatile algorithm for characterizing the atmosphere [J]. *SPIE Newsroom*, 2014, DOI:10.1117/2.1201408.005558.
- [5] 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.
- [6] Holben B N, Tanré D, Smirnov A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D11):12067.
- [7] 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.
- [8] 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*, 2017, **99**(4):739-755.
- [9] Wang J, Christopher S A, Brechtel F, et al. Geostationary satellite retrievals of aerosol optical thickness during ACE-Asia [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, **108**(D23):8657.
- [10] Wang J, Xu X G, Spurr R, et al. Improved algorithm for MODIS satellite retrievals of aerosol optical thickness over land in dusty atmosphere: Implications for air quality monitoring in China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(11):2575-2583.
- [11] Kaufman Y J, Wald A E, Remer L A, et al. The MODIS 2.1- μ m channel—correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. *Geoscience Remote Sensing IEEE Transactions on*, 1997, **35**(5):1286-1298.

- [12] 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), DOI: 10.1029/2006JD007811.
- [13] 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.
- [14] Hsu N C, Tsay S C, King M D, *et al.* Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(11):3180-3195.
- [15] Von Hoyningen-Huene W Freitag M, Burrows J B. Retrieval of aerosol optical thickness over land surfaces from top-of-atmosphere radiance [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, **108**(D9):4260.
- [16] Rodgers C D. Inverse methods for atmospheric sounding (theory and practice) II Error analysis and characterisation [M]. World Scientific, 2000:43-63.
- [17] Wang J, Xu X G, Ding S G, *et al.* A numerical testbed for remote sensing of aerosols, and its demonstration for evaluating retrieval synergy from a geostationary satellite constellation of GEO-CAPE and GOES-R [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2014, **146**:510-528.
- [18] Frankenberg C, Hasekamp O, O'Dell C, *et al.* Aerosol information content analysis of multi-angle high spectral resolution measurements and its benefit for high accuracy greenhouse gas retrievals [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, **5**(7):1809-1821.
- [19] Geddes A, Bosch H. Tropospheric aerosol profile information from high-resolution oxygen A-band measurements from space [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(2):859-874.
- [20] Holzer-Popp T, Schroedter-Homscheidt M, Breitkreuz H, *et al.* Improvements of synergetic aerosol retrieval for ENVISAT [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(24):7651-7672.
- [21] Martynenko D, Holzer-Popp T, Elbern H, *et al.* Understanding the aerosol information content in multi-spectral reflectance measurements using a synergetic retrieval algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, **3**(6):1589-1598.
- [22] Xu X G, Wang J. Retrieval of aerosol microphysical properties from AERONET photopolarimetric measurements: 1. Information content analysis [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2015, **120**(14):7059-7078.
- [23] Zheng F X, Hou W Z, Li Z Q. Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angle dependence and a posteriori error [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(4):16.
- [24] Hou W, Li Z, Wang J, *et al.* Improving Remote Sensing of Aerosol Microphysical Properties by Near-Infrared Polarimetric Measurements Over Vegetated Land: Information Content Analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(4):2215-2243.
- [25] Spurr R J D. VLIDORT: A linearized pseudo-spherical vector discrete ordinate radiative transfer code for forward model and retrieval studies in multilayer multiple scattering media [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2006, **102**(2):316-342.
- [26] Hou W, Wang J, Xu X, *et al.* An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 1. Development of theoretical framework [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, **178**:400-415.
- [27] Fan Y, Sun X, Huang H, *et al.* The primary aerosol models and distribution characteristics over China based on the AERONET data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, **275**:107888.
- [28] Spurr R, Wang J, Zeng J, *et al.* Linearized T-matrix and Mie scattering computations [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2012, **113**:425-439.