

# 卫星遥感中不同偏振量对气溶胶反演的影响分析

郑逢勋<sup>1</sup>, 朱家乙<sup>2</sup>, 侯伟真<sup>3</sup>, 李正强<sup>3\*</sup>

1. 河南科技大学农业装备工程学院, 河南 洛阳 471003
2. 中国兵器工业集团江苏北方湖光光电有限公司, 江苏 无锡 214035
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101

**摘要** 偏振探测是提高气溶胶卫星遥感能力的重要途径。作为目前全球重要的偏振数据源,我国高分五号卫星搭载的多角度偏振探测仪(DPC)能够测量不同的偏振量,包括 Stokes 矢量偏振分量、偏振辐亮度( $L_p$ )和线偏振度(DOLP)。各偏振量所包含的有效信息和测量误差不同,进而影响气溶胶参数的反演精度。针对此,在最优估计反演框架下,利用信号自由度(DFS)和后验误差定量化分析了各偏振量对气溶胶参数反演的影响,为后续 DPC 气溶胶算法开发提供参考。研究表明:Stokes 矢量包含的信息量最高,其次是线偏振度和偏振辐亮度,相应的气溶胶总 DFS 分别为 7.5、6.1 和 5.2;采用不包含偏振方向信息的  $L_p$  反演时,复折射指数虚部和粒子谱有效方差的信息量比采用 Stokes 矢量和 DOLP 反演时显著下降,表明这两个参数对偏振方向和测量误差敏感,增加偏振方向信息和降低测量误差能够有效提高这两个参数的可反演性;偏振方向的探测对提高气溶胶遥感能力有重要价值,采用  $L_p$  和 DOLP 反演时,气溶胶各参数的后验误差比采用 Stokes 矢量反演分别增加 67.6%和 65.5%,其中细模态体积柱浓度和粒子谱有效半径受到的影响最大;在全部气溶胶参数中,复折射指数实部后验误差最小,虚部的反演不确定性最大。总体来说,细模态气溶胶的三个参数(体积柱浓度、复折射指数实部和粒子谱分布有效半径)在三种偏振量反演情况下平均 DFS 均大于 0.85,能够较好的通过 DPC 观测反演得到,而粗模态气溶胶反演与气溶胶类型有关,参数反演不确定性较大。

**关键词** 高分五号;偏振遥感;气溶胶;信息量分析;最优估计反演

**中图分类号:** TP721 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)07-2212-07

## 引言

卫星多角度偏振探测在气溶胶遥感方面具有显著优势<sup>[1-3]</sup>。继法国 POLDER(Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances)传感器之后,我国高分五号卫星搭载的大气气溶胶多角度偏振探测仪(directional polarimetric camera, DPC)成为全球气候变化,污染传输,气溶胶特性研究领域重要的数据来源<sup>[4-5]</sup>。谢一淞等基于 DPC 的偏振数据反演获得了首幅高分辨率(3.3 km)全球陆地上空细粒子气溶胶光学厚度(fine mode aerosol optical depth, AOD<sub>f</sub>)空间分布图<sup>[6]</sup>,然而,DPC 多角度、多光谱强度和偏振测量的优势仍没有得到充分发挥。

最优估计(optimal estimation, OE)反演方法是目前气溶

胶遥感领域的前沿<sup>[7-8]</sup>。OE 反演方法将先验知识和观测误差融合在代价函数中,能够充分利用观测数据的有效信息,实现多个参数的同步反演<sup>[9]</sup>。相较于传统的基于查找表(lookup table, LUT)的方法,OE 反演方法在反演过程中实时进行前向辐射传输计算,在连续的向量空间寻找最优解,因此具有较高的反演精度<sup>[10]</sup>。全球气溶胶地基观测网 AERONET(AERosol RObotic NETwork)官方反演算法采用了 OE 架构<sup>[11]</sup>,在此基础上发展的 GRASP(generalized retrieval of aerosol and surface properties)算法是目前最前沿的能够业务化运行的 OE 反演方法<sup>[12-13]</sup>。OE 反演研究在国内得到了较快发展,目前主要以理论分析和仿真研究为主<sup>[14-17]</sup>。Li 等针对 DPC 提出了一套 OE 反演框架<sup>[18]</sup>,利用 DPC 多角度的强度和偏振测量进行气溶胶和地表参数的同步反演。基于该框架的研究表明,气溶胶反演精度主要取决于观测误差<sup>[19]</sup>。在

收稿日期:2020-07-31,修订日期:2020-12-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41871269),河南省高等学校重点科研项目(21A416003),河南科技大学博士科研启动金资助

作者简介:郑逢勋,1983年生,河南科技大学农业装备工程学院讲师 e-mail: zhengfengxun@126.com

\* 通讯作者 e-mail: lizq@radi.ac.cn

偏振测量方面, DPC 能够提供 Stokes 矢量的偏振分量、偏振辐亮度和线偏振度等不同的偏振量, 不同偏振量的定标误差不同, 而定标误差是观测误差的主要来源。因此, 不同偏振量对气溶胶反演的影响需要进行系统的定量评估。

针对此问题, 本研究基于 OE 反演框架, 针对 DPC 传感器的定标误差, 利用最优估计理论中的信号自由度和后验误差指标分析不同偏振量对气溶胶反演的影响, 为后续基于 DPC 的气溶胶反演研究提供参考。

## 1 DPC 测量的偏振量

DPC 采用滤光片-偏振片组合的方式进行偏振测量。对每一个偏振通道, DPC 分别在  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $120^\circ$  三个角度上通过偏振片进行三次标量测量(分别用  $L_1$ ,  $L_2$  和  $L_3$  表示), 进而得到该通道总的辐亮度和偏振辐亮度

$$\begin{cases} L' = \frac{2}{3}(L_1 + L_2 + L_3) \\ L'_p = \frac{4}{3}\sqrt{L_1^2 + L_2^2 + L_3^2 - L_1L_2 - L_1L_3 - L_2L_3} \end{cases} \quad (1)$$

基于线偏振光的假设, 进一步可以得到归一化 Stokes 矢量的前三个分量  $I$ ,  $Q$  和  $U$

$$\begin{cases} I = L'/E_0 \\ Q = L'_p \cos(2\varphi)/E_0 \\ U = L'_p \sin(2\varphi)/E_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $I$  为归一化的总辐射强度,  $Q$  和  $U$  描述了光相对于主平面的偏振状态,  $\varphi$  表示偏振角, 是由偏振方向和主平面构成的夹角,  $E_0$  为大气层顶的太阳辐射常数。经过实验室定标和在轨辐射定标后, DPC 提供的 Level1 级产品包含上述三个分量。Stokes 矢量完整描述了光的偏振状态, 包含偏振的强度和方向信息。直接使用 Stokes 矢量反演对偏振方向的测量有很高的精度要求, 因此实际反演算法中通常采用不含偏振方向信息的偏振辐亮度( $L_p$ )或者线偏振度(degree of linear polarization, DOLP)进行反演<sup>[20-21]</sup>

$$\begin{cases} L_p = \sqrt{Q^2 + U^2} \\ \text{DOLP} = L_p/I \end{cases} \quad (3)$$

DOLP 是在 0 到 1 之间变化的无量纲的量, 作为相对量, DOLP 具有较高的定标精度<sup>[22]</sup>。

因此, DPC 反演时, 在偏振量的使用上有三种选择: (1) 直接使用  $Q$  和  $U$  分量; (2) 使用偏振辐亮度  $L_p$ ; (3) 使用线偏振度 DOLP。由于不同的偏振量包含的有效信息不同、测量误差也不同, 最终会造成反演精度的差异。

## 2 研究方法

### 2.1 OE 反演框架

根据最优估计反演理论<sup>[23]</sup>, 假设观测误差遵循高斯概率分布, 由贝叶斯定理可得到待反演参数统计意义上的最优估计值, 称为后验估计

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_a + (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K} \mathbf{x}_a) \quad (4)$$

其中,  $\mathbf{y}$  为由观测量构成的向量;  $\mathbf{x}$  为待反演参数构成的向

量, 称为状态向量,  $\mathbf{x}_a$  为状态向量的先验估计;  $\mathbf{K}$  为雅可比矩阵(Jacobians matrix), 描述了观测向量对状态向量的敏感程度;  $\mathbf{K} = \partial \mathbf{y} / \partial \mathbf{x}$ ;  $\mathbf{S}_a$  和  $\mathbf{S}_y$  分别表示先验估计误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵。由式(4)可知, 后验估计是通过测量对先验估计的修正。

基于上述理论, Li 等建立了针对 DPC 传感器的多参数反演框架<sup>[18]</sup>。在该框架下, 观测向量  $\mathbf{y}$  由多光谱、多角度的强度和偏振测量量组成, 包含多个观测角度下五个通道(443, 490, 565, 670 和 865 nm)的标量测量和三个通道(490, 670 和 865 nm)的偏振测量。状态向量  $\mathbf{x}$  由多个气溶胶和地表模型参数组成, 表 1 列出了反演框架涉及的模型参数。其中, 气溶胶参数包括复折射指数和粒子谱分布参数, 粒子谱分布采用双峰对数正态分布形式描述。不同气溶胶类型可通过调节细模态体积比(Volume fine mode fraction, FMF<sub>v</sub>)参数得到, 定义为:  $\text{FMF}_v = V_0^f / (V_0^f + V_0^c)$ 。OE 反演框架直接得到气溶胶微物理参数, 气溶胶光学厚度、单次散射反照率等光学量可以进一步通过 MIE 散射计算获取。对于强度测量地表反射率采用了改进的核驱动 BRDF 模型, 对于偏振测量, 地表偏振反射率模型采用了单参数的 BPDF 模型。

表 1 最优估计反演框架中的模型参数

Table 1 The parameters adopted in the optimal estimation retrieval framework

符号	参数名称
$V_0^f, V_0^c$	气溶胶细、粗模态体积柱浓度 ( $\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$ )
$r_{\text{eff}}^f, r_{\text{eff}}^c$	气溶胶细、粗模态有效半径 ( $\mu\text{m}$ )
$v_{\text{eff}}^f, v_{\text{eff}}^c$	气溶胶细、粗模态有效方差
$m_r^f, m_i^f$	气溶胶细、粗模态复折射指数实部
$m_r^c, m_i^c$	气溶胶细、粗模态复折射指数虚部
$f_{\text{iso}}(\lambda)$	地表 BRDF 朗伯项参数
$k_1, k_2$	地表 BRDF 几何项和体积项系数
C	地表 BPDF 参数

前向模型采用了线性化的矢量辐射传输模型 UNL-VRM (Unified Linearized Vector Radiative Transfer Model)<sup>[24]</sup>。该模型耦合了分子吸收模块、MIE 散射计算和多种地表反射率模型, 并且能够在计算卫星观测 Stokes 矢量的同时, 提供 Stokes 矢量对于气溶胶和地表模型参数的雅可比矩阵  $\mathbf{K}$  的计算, 非常有利于 OE 反演的实现<sup>[25]</sup>。

### 2.2 信息量计算方法

平均核矩阵描述了反演结果对真实状态的敏感程度, 定义为

$$\mathbf{A} = \partial \hat{\mathbf{x}} / \partial \mathbf{x} = (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_y^{-1} \mathbf{K} \quad (5)$$

矩阵  $\mathbf{A}$  对角元素的值定义为相应状态参数的信号自由度(degree of freedom for signal, DFS)。DFS 描述了一个观测系统中所包含的状态向量的信息片段的数量, 体现了反演过程中观测对相应状态参数的约束程度。DFS 是一个无量纲的量, DFS 值越大, 表明观测包含的该参数信息越多, 观测对该参数越敏感。DFS 可以作为评价传感器观测能力的一个重要指标。通常, 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<sup>[10]</sup>。观测量包含的总 DFS 是矩阵  $\mathbf{A}$  的对角元素之和, 即矩阵  $\mathbf{A}$  的迹。在本研究中, 总 DFS 描述了从 DPC 观测中可以反演得到相互独立的气溶胶参数的数量。在相同条件下, 通过信息量分析得到的总 DFS 值越大, 说明传感器观测所获取的信息量就越多, 可反演的气溶胶参数个数也就越多。

后验估计的误差协方差矩阵  $\hat{\mathbf{S}}$  描述了待反演量的理论反演误差, 定义为

$$\hat{\mathbf{S}} = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T (\mathbf{S}_y + \mathbf{K}_b \mathbf{S}_b \mathbf{K}_b^T)^{-1} \mathbf{K})^{-1} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{S}_y$  主要由卫星传感器的信噪比和定标误差等因素决定;  $\mathbf{S}_b$  为影响观测的非反演参数的误差协方差矩阵, 描述了模型参数先验估计的不确定性,  $\mathbf{K}_b$  为相应的雅可比矩阵。 $\hat{\mathbf{S}}$  对角元素的平方根即为对应参数的后验误差 (posteriori error)。

图 1 给出了信息量计算的流程。首先利用 UNL-VRM 对 DPC 多角度观测进行前向模拟, 计算出相应的偏振量, 组成三种不同的观测向量, 并进行  $L_p$  和 DOLP 关于状态向量的雅可比矩阵传递计算<sup>[26]</sup>。之后, 结合 DPC 设备的定标误差、气溶胶和地表参数的先验估计误差, 利用式 (5) 和式 (6), 计算三种情况下气溶胶各参数的信息量和后验误差, 最后对三种不同情况下的结果进行对比分析。

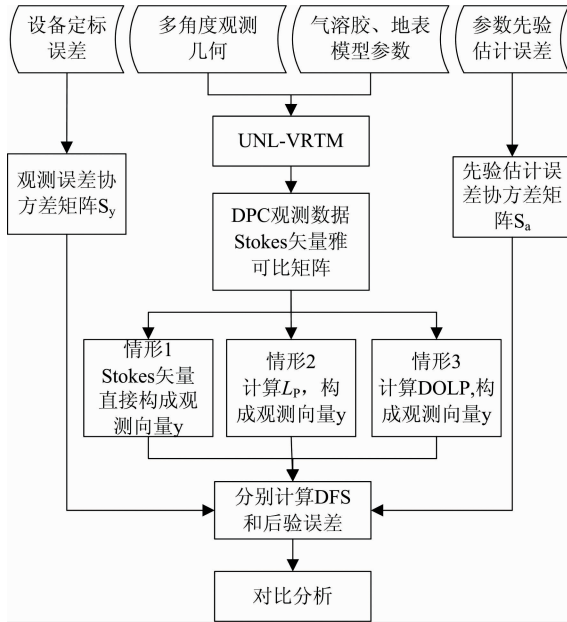


图 1 信息量分析流程

Fig. 1 The Flowchart of information content analysis

## 3 模型参数设置

### 3.1 DPC 偏振测量误差

在信息量计算过程中, 需要对观测误差和模型参数的先验估计误差进行设定。测量误差主要来自于设备的定标误差, 因此本研究仅考虑传感器定标误差。DPC 已经完成在轨辐射定标测试, 各波段强度辐射在轨辐射定标误差如表 2 所示。

对于偏振测量, DPC 采用偏振盒定标的方法对 DOLP

进行实验室定标, 绝对误差小于 0.02。定标后的 DOLP 测量误差可以用式 (7) 描述

$$\epsilon_{\text{DOLP}} = 0.01 + 0.01 \times \text{DOLP} \quad (7)$$

进一步, 可以得到偏振辐亮度  $L_p$  的绝对误差

$$\epsilon_{L_p} = L_p \frac{\epsilon_I}{I} + I \epsilon_{\text{DOLP}} \quad (8)$$

其中,  $\epsilon_I$  表示强度的绝对辐射定标误差,  $\frac{\epsilon_I}{I}$  为相对误差。式 (8) 右边两项分别描述了辐射定标和偏振定标的不确定性。

表 2 DPC 各波段在轨辐射定标误差<sup>[27]</sup>  
Table 2 Calibration error for each band of DPC

波段	相对误差/%
443	5.4
490	4.8
565	2.1
670	2.7
865	2.5

### 3.2 气溶胶、地表模型参数及先验估计误差

气溶胶模型分模态参数及先验估计误差设置如表 3, 其中, 粒子谱分布参数采用相对误差, 复折射指数参数采用绝对误差。地表模型参数如表 4 所示, 地表类型为植被覆盖的暗地表, 归一化的植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 为 0.6。计算信息量时, 状态向量  $\mathbf{x}$  包含全部气溶胶参数, 地表模型参数作为非反演参数参与计算。

表 3 气溶胶模型参数及误差<sup>[18]</sup>  
Table 3 The aerosol model parameters and corresponding errors

参数	值	相对误差/%	参数	值	绝对误差
$r_{\text{eff}}^f / \mu\text{m}$	0.21	80	$m_r^f$	1.44	0.15
$r_{\text{eff}}^c / \mu\text{m}$	1.90	80	$m_{\text{eff}}^c$	1.55	0.15
$v_{\text{eff}}^f$	0.25	80	$m_f^f$	0.011	0.01
$v_{\text{eff}}^c$	0.41	80	$m_f^c$	0.003	0.005

表 4 植被地表模型参数及误差<sup>[18]</sup>  
Table 4 The surface model parameters and corresponding errors

参数	值	误差
$f_{\text{iso}}(\lambda)$	0.032 5, 0.034 7, 0.073 7, 0.039 5, 0.380 9	0.042 5, 0.049 5, 0.077 7, 0.091 7, 0.079 2
$k_1$	0.668	80%
$k_2$	0.087	80%
$C$	6.57	80%

### 3.3 多角度观测几何

DPC 能够对同一目标进行多次成像, 经过严格的几何校正和配准, 实现 9~12 个角度的观测。图 1 给出了前向模拟采用的四组 DPC 多角度观测几何。其中, 观测目标区域为我国中纬度的北京地区, 太阳位置分别取春分、夏至、秋分和

冬至四个节气,代表不同的太阳高度情况。

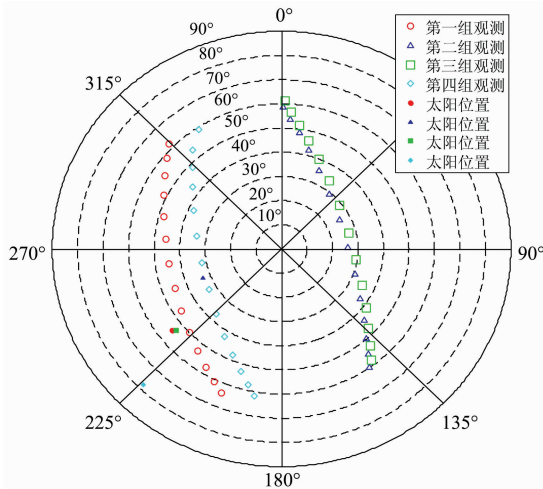


图 2 DPC 多角度观测几何

Fig. 2 The DPC observation geometries adopted in the forward simulation

## 4 结果与讨论

针对两种典型气溶胶类型:城市污染型气溶胶(细模态气溶胶占主导,  $FMF_V=0.8$ )和沙尘型气溶胶(粗模态气溶胶占主导,  $FMF_V=0.2$ ),在不同气溶胶光学厚度下(AOD从0.1到2.0变化),开展多角度观测模拟,得到两种气溶胶类型在不同AOD下的仿真观测数据。最后根据信息量计算方法,分别计算出气溶胶各参数的DFS和后验估计误差。

### 4.1 信息量对比分析

三种不同偏振量反演情况下气溶胶参数总DFS随AOD的变化情况如图3所示。(1)从三种偏振量的对比看,由于Stokes矢量包含了完整的偏振信息,因此气溶胶参数总DFS明显高于线偏振度和偏振辐亮度两种情况。三种不同偏振量对应的总DFS均值分别为7.5, 5.2和6.1。线偏振度信息量高于偏振辐亮度的主要原因是线偏振度作为相对量具有更高的定标精度,且线偏振度中包含了强度的信息。(2)随着气溶胶含量的增加,观测包含的气溶胶信息量逐渐增加。表明高AOD条件下更容易进行气溶胶参数的遥感。AOD小于1时,信息量增长较快。AOD从0.1增加到1.0,三种偏振量对应的总DFS分别增加了27%, 56%和57%。AOD大于1时,信息量增长变慢,并逐渐趋于饱和,表明观测包含的气溶胶信息量存在上限。(3)粗模态气溶胶含量增加后,信息量的增加较为显著,因此,相同观测下,粗模态主导气溶胶类型的信息量比细模态主导类型平均高出1.7个DFS。

平均核矩阵A的对角线元素为各状态参数的DFS,图4采用柱状图的形式给出了不同偏振量反演时各参数的平均DFS。图中气溶胶光学厚度为0.5,误差条为不同观测几何下对应参数信息量的标准方差。由图可知,气溶胶各参数间的信息量差异显著。(1)细模态气溶胶体积柱浓度、复折射指数实部和有效半径三个参数的平均DFS分别为0.89, 0.97和0.96,显著高于复折射指数虚部( $DFS=0.43$ )和有效

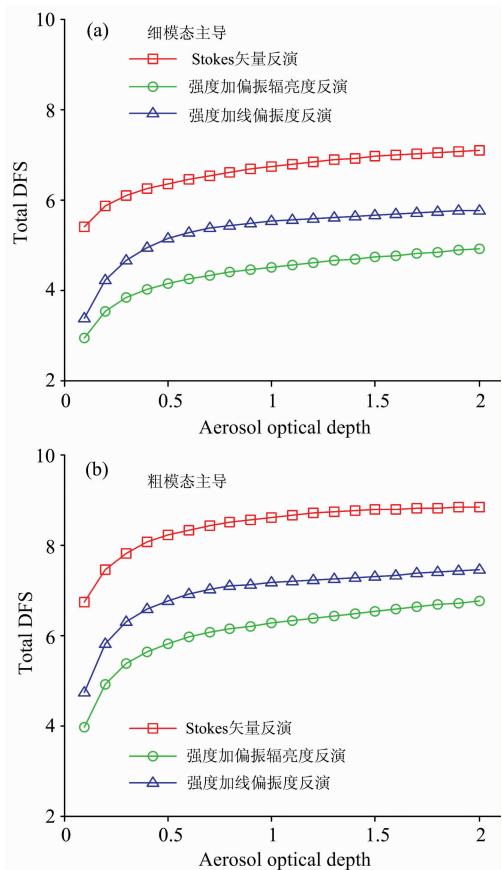


图 3 采用不同偏振量反演时气溶胶总信息量随 AOD 的变化

Fig. 3 The aerosol total DFS as function of AOD

方差( $DFS=0.5$ )两个参数,表明观测中包含这两个参数的信息量较少,即观测对这两个参数不敏感。(2)对于细模态主导气溶胶类型,粗模态参数信息量普遍低于0.5,表明粗模态参数较难通过反演得到。而对于粗模态主导气溶胶类型,随着粗粒子含量增加,信息量显著提高,体积柱浓度、复折射指数实部和有效半径的平均DFS分别达到了0.76, 0.9和0.95,表明这三个参数能够得到较好的反演。(3)三种偏振量对比看,采用不包含偏振方向的偏振辐亮度和线偏振度反演,各参数信息量普遍有所下降,其中复折射指数虚部和有效方差信息量下降明显。同时,相对于偏振辐亮度,采用线偏振度反演时这两个的信息量显著升高。以上情况表明这两个参数对于偏振方向和测量误差较为敏感,增加偏振方向信息和提高测量精度能够有效提高这两个参数的可反演性。另外,从图中误差棒的范围可知,观测几何是影响观测信息量的重要因素<sup>[19]</sup>。

### 4.2 后验误差对比分析

根据式(6),影响后验误差的因素包括反演参数的先验估计误差,模型参数误差和观测误差。观测对某个参数越敏感,信息量越充足,则对该参数的约束越强,反演结果的不确定性越小。图5中灰色底柱的高度表示参数的先验估计误差,灰色底柱可见部分为后验误差相对先验误差的减少量,表明观测对该参数反演不确定性的改善情况。由图可知:

(1)采用 Stokes 矢量反演时各参数的后验误差最小,采用偏振辐亮度反演时普遍误差较大。后验误差减少量的趋势与信息量的结果一致。由于偏振辐亮度和线偏振度不包含偏振方向,导致两种情况下各参数的后验误差相对于 Stokes 矢量反演时分别增加了 67.6%和 65.5%。(2)三种偏振量反演情况下,细模态气溶胶体积柱浓度的平均后验误差分别为 18.2%, 38.4%和 33%,粗模态气溶胶体积柱浓度的平均后验误差分别为 50.6%, 80.5%和 67.3%。表明现有 DPC 多角度偏振观测对于粗模态气溶胶含量的反演不确定性仍然较大。(3)复折射指数的实部经过观测约束后,细、粗模态的平均误差分别为 1.6%和 4.9%,是反演不确定性最小的参数。而虚部的不确定性是所有参数中最大的,细、粗模态的后验估计误差分别为 64.5%和 129.6%。一方面,复折射指数虚

部与气溶胶化学成分有关,由于气溶胶化学成分的复杂性导致参数自身的先验估计误差较大。另一方面,虚部反应了气溶胶的吸收性,而气溶胶吸收对偏振的贡献较弱,因此,该参数反演难度较大。(4)细、粗模态有效方差的后验误差相对先验估计下降不明显,采用偏振辐亮度或线偏振度反演对有效方差的结果影响不大。同样的结论也适用于粗模态有效半径。对于细模态有效半径,采用偏振辐亮度反演时比线偏振度的后验误差低,与图 4 中的信息量结果一致。这是由于在 DPC 观测模式和观测波段下,细模态气溶胶是主要的偏振贡献源,因而偏振对细模态有效半径参数较敏感,相对于偏振辐亮度,线偏振度中包含强度信息,使得线偏振度对该参数的敏感性有所下降。

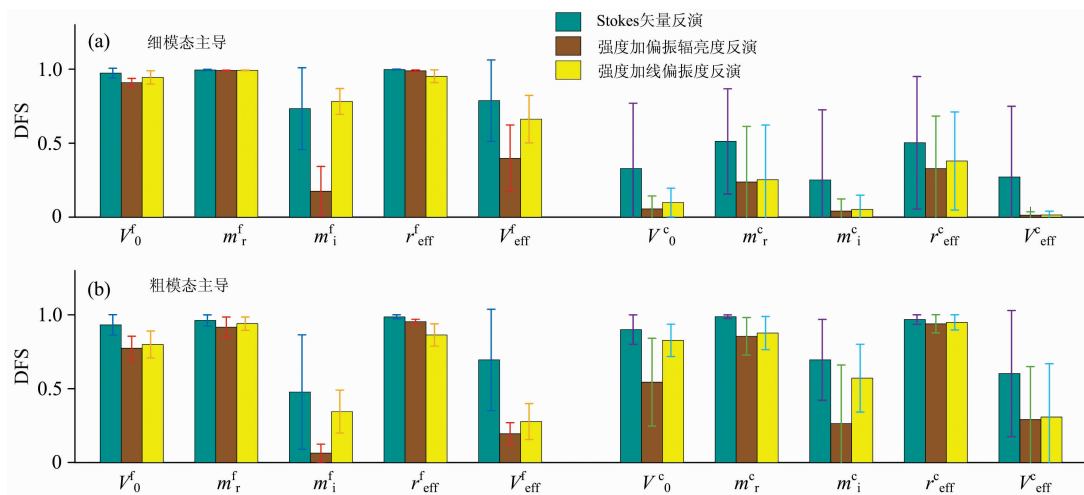


图 4 不同偏振量反演情况下气溶胶各参数信息量

Fig. 4 The DFS of aerosol parameters using different polarization quantities

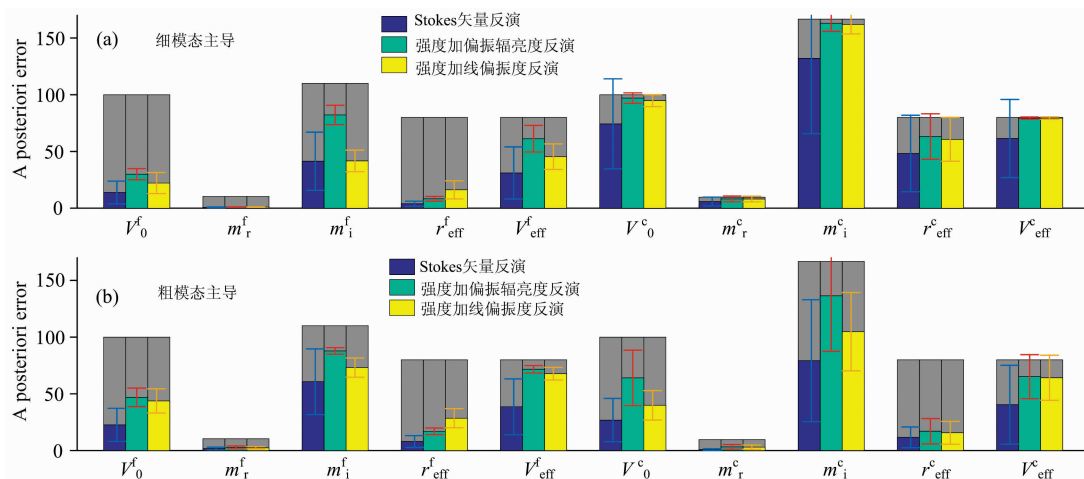


图 5 不同偏振量反演情况下气溶胶各参数的后验误差

Fig. 5 The a posteriori error of aerosol parameters using different polarization quantities

## 5 结 论

卫星偏振遥感中, Stokes 矢量偏振分量、偏振辐亮度和线偏振度三种不同偏振量包含的观测信息不同, 且受定标精度的影响, 三种偏振量的测量误差不同, 因此, 使用不同偏振量反演会导致反演精度存在差异。针对此问题, 基于 OE 反演框架, 针对高分五号 DPC 传感器的多角度偏振观测, 利用信息量分析方法量化研究了三种偏振量对气溶胶参数反演的影响。主要结论如下:

(1) 三种不同偏振量反演情况下, 气溶胶总 DFS 均值分别为 7.5, 5.2 和 6.1。表明 Stokes 矢量包含的信息量最高, 其次是线偏振度, 偏振辐亮度的信息量最低。因此在偏振反演中, 应考虑优先使用 Stokes 矢量反演。当 AOD 从 0.1 增加到 1.0, 三种偏振量对应的总 DFS 分别增加了 27%, 56%

和 57%。AOD 大于 1.0 后, 信息量增长趋于平缓。表明气溶胶含量是影响气溶胶参数反演的重要因素。

(2) DPC 偏振测量包含的信息量不足以支撑全部气溶胶参数的反演。其中, 细模态气溶胶体积柱浓度、复折射指数实部和有效半径在三种偏振量反演情况下平均 DFS 大于 0.85, 能够较好的反演得到。粗模态气溶胶参数的反演与气溶胶类型有关, 细模态体积比减小时, 粗模态气溶胶参数信息量显著提高。两种气溶胶模态的复折射指数虚部和有效方差均较难反演得到。

(3) 采用偏振辐亮度和线偏振度反演情况下, 气溶胶各参数的后验误差比采用 Stokes 矢量反演分别平均增加 67.6% 和 65.5%。表明偏振方向信息显著影响气溶胶参数的反演精度, 其中细模态体积柱浓度和有效半径两个参数受到的影响最大。在全部气溶胶参数中, 复折射指数的实部反演不确定性最小, 虚部的后验误差最大。

## References

- [ 1 ] Waquet F, Cairns B, Knobelspiesse K, et al. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114: D01206.
- [ 2 ] Xu F, Van Harten G, Diner D J, et al. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2017, 122: 7004.
- [ 3 ] Dubovik O, Li Z, Mishchenko M I, et al. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2019, 224: 474.
- [ 4 ] Gu X, Tong X. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Magazine*, 2015, 3(3): 113.
- [ 5 ] LI Zhao-zhou, QIE Li-li, XIE Yi-song, et al(李照洲, 伽丽丽, 谢一淞, 等). *Journal of Atmospheric and Environmental Optics (大气与环境光学学报)*, 2019, 14(1): 18.
- [ 6 ] XIE Yi-song, LI Zheng-qiang, HOU Wei-zhen, et al(谢一淞, 李正强, 侯伟真, 等). *Aerospace Shanghai(上海航天)*, 2019, 36(S2): 219.
- [ 7 ] Wu L, Hasekamp O, Van Diedenhoven B, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(6): 2625.
- [ 8 ] Jeong U, Kim J, Ahn C, et al. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(1): 177.
- [ 9 ] Dubovik O, Herman M, Holdak A, et al. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(5): 975.
- [ 10 ] Hou W, Li Z, Wang J, et al. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(4): 2215.
- [ 11 ] Dubovik O, King M D. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D16): 20673.
- [ 12 ] Wei Y, Li Z, Zhang Y, et al. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2020, 246: 106931.
- [ 13 ] Dubovik O, Lapyonok T, Litvinov P, et al. *GRASP: A Versatile Algorithm for Characterizing the Atmosphere*. *SPIE Newsroom*, 2014.
- [ 14 ] Chen X, Yang D, Cai Z, et al. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 183.
- [ 15 ] Chen X, Wang J, Liu Y, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 163.
- [ 16 ] Hou W, Li Z, Song C, et al. *Proc SPIE 11338, AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology*, 2019, 11338: 113380V.
- [ 17 ] Hou W Z, Li Z Q, Zheng F X, et al. *Retrieval of Aerosol Microphysical Properties Based on the Optimal Estimation Method: Information Content Analysis for Satellite Polarimetric Remote Sensing Measurements*. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2018, XLII-3, 533.
- [ 18 ] Li Z, Hou W, Hong J, et al. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 21.
- [ 19 ] ZHENG Feng-xun, HOU Wei-zhen, LI Zheng-qiang(郑逢勋, 侯伟真, 李正强). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2019, 68(4): 40701.
- [ 20 ] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D5): 4913.
- [ 21 ] Xu X, Wang J, Zeng J, et al. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(14): 7079.
- [ 22 ] Li Z, Li K, Li L, et al. *Applied Optics*, 2018, 57(5): 1011.
- [ 23 ] Rodgers C D. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. *World Scientific*, 2000.
- [ 24 ] Wang J, Xu X, Ding S, et al. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 146(Supplement C): 510.
- [ 25 ] Hou W, Wang J, Xu X, et al. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2016, 178(Supplement C): 400.
- [ 26 ] Xu X, Wang J. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(14): 7059.
- [ 27 ] CHEN Fei-nan, HUANG Chan, HONG Jin, et al. (陈斐楠, 黄 禅, 洪 津, 等). *Aerospace Shanghai(上海航天)*, 2019, 36(S2): 126.

# Effect Analysis of Using Different Polarization Quantities in Aerosol Retrieval From Satellite Observation

ZHENG Feng-xun<sup>1</sup>, ZHU Jia-yi<sup>2</sup>, HOU Wei-zhen<sup>3</sup>, LI Zheng-qiang<sup>3\*</sup>

1. College of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China
2. Jiangsu North Huguang Opto-electronics Company, China North Industries Group Corporation Limited, Wuxi 214035, China
3. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract** Polarimetry is one of the most promising types of remote sensing for improved characterization of atmospheric aerosol. As an important polarization data source in the world currently, the Directional Polarimetric Camera (DPC) onboard Gaofen-5 satellite can provide measurements of the Stokes vector, the polarization radiance ( $L_p$ ), and degree of linear polarization (DOLP). The calibration accuracy of these polarization quantities will affect the retrieval error of aerosol parameters, and the corresponding impacts need to be analyzed quantitatively. For this purpose, the degree of freedom for signal (DFS) and the posterior error for aerosol model parameters are calculated based on the optimal estimation inversion framework and information content analysis theory. The results show that the information contained in the Stokes vector is the highest, followed by DOLP and  $L_p$ . The corresponding total aerosol DFS are 7.5, 6.1, and 5.2, respectively. The imaginary part of the complex refractive index ( $m_i^f$ ) and the effective variance ( $v_{\text{eff}}^f$ ) reduce significantly when using  $L_p$  in the retrieval. This indicates that the two parameters are sensitive to the polarization direction and measurement error. The average DFS of the fine-mode columnar volume concentration ( $V_0^f$ ), the real part of the complex refractive index ( $m_r^f$ ), and the effective radius ( $r_{\text{eff}}^f$ ) are larger than 0.85, which can be well retrieved from DPC multiangle polarization observation. The inversion of coarse-mode aerosol parameters has high uncertainties, which is related to the aerosol type. Compared with adopting the Stokes vector in the retrieval, the posterior error of aerosol parameters increase 67.6% and 65.5% on average for adopting  $L_p$  and DOLP, respectively. The fine-mode columnar volume concentration ( $V_0^f$ ) and effective radius ( $r_{\text{eff}}^f$ ) are most affected. Evidently, the polarization direction has great value to improve the retrieval of aerosol. Among all the aerosol parameters, the posterior error of the real part of complex refractive index ( $m_r^f$ ) is the smallest, and the imaginary part ( $m_i^f$ ) has the highest inversion uncertainty.

**Keywords** Gaofen-5; Polarimetric remote sensing; Aerosol; Information content analysis; Optimal estimation inversion

(Received Jul. 31, 2020; accepted Dec. 8, 2020)

\* Corresponding author