

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

郑逢勋 侯伟真 李正强

Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angle dependence and a posteriori error

Zheng Feng-Xun Hou Wei-Zhen Li Zheng-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 040701 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20181682

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181682>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析

Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera

物理学报. 2017, 66(10): 100701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.100701>

基于多角度偏振载荷数据的中国典型地物偏振特性研究

Polarized properties of typical surface types over China based on the multi-angular polarized remote sensing measurements

物理学报. 2015, 64(22): 227801 <https://doi.org/10.7498/aps.64.227801>

一种通用的卫星导航信号码时延估计误差评估方法

Universal evaluation criteria for code delay estimation error of satellite navigation signals

物理学报. 2017, 66(12): 129101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.129101>

一种基于最优频段的X射线脉冲星累积轮廓时延估计方法

Time delay estimation method of X-ray pulsar observed profile based on the optimal frequency band

物理学报. 2016, 65(11): 119701 <https://doi.org/10.7498/aps.65.119701>

分振幅型全Stokes同时偏振成像系统波片相位延迟误差分析

Phase delay error analysis of wave plate of division-of-amplitude full Stokes simultaneous polarization imaging system

物理学报. 2019, 68(2): 024203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181553>

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*

郑逢勋¹⁾²⁾ 侯伟真¹⁾³⁾ 李正强^{1)3)†}

1) (中国科学院遥感与数字地球研究所, 国家环境保护卫星遥感重点实验室, 北京 100101)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (中国科学院遥感与数字地球研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

(2018年9月10日收到; 2018年11月12日收到修改稿)

多角度偏振相机 (directional polarimetric camera, DPC) 随高分五号卫星已经成功发射并持续获取全球观测数据. 针对 DPC 在陆地气溶胶反演领域的应用需求, 本研究基于多参数最优化估计反演框架, 引入信息量和后验误差分析工具, 讨论了 DPC 观测信息量对角度的依赖, 给出了地表和气溶胶参数的后验误差, 并分析了后验误差的影响因素. 研究表明: 1) 卫星观测信息量随观测角度个数的增加显著提升, DPC 多角度观测比单角度观测的总 DFS (degree of freedom for signal) 平均提高了 5.45; 2) 气溶胶反演比地表更依赖于卫星观测几何, 散射角覆盖范围越大, 观测包含的气溶胶信息量越多; 3) 反演参数的后验误差随观测角度个数的增加显著降低, 而气溶胶模型误差对后验误差的影响并不显著. 总体来说, 观测误差是影响反演结果不确定性的主要因素. 本研究对 DPC 多角度偏振观测的反演能力以及反演不确定性进行了系统的定量评估, 为 DPC 在轨测试及反演算法开发提供参考.

关键词: 多角度偏振相机, 最优化估计反演, 信息量分析, 后验误差

PACS: 07.07.Df, 92.20.Bk, 92.70.Bc, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.68.20181682

1 引言

气溶胶是影响整个地球系统辐射平衡中最不确定的因素之一^[1]. 获取满足全球或区域气候系统模型精度需求的气溶胶物理、光学特性需要更为全面的气溶胶观测数据, 例如多角度偏振卫星观测^[2-4]. POLDER (polarization and directionality of the earth's reflectances) 是国际上具备在轨多角度偏振测量能力的传感器^[5-8], 该卫星在 2004—2013 年间提供了大量全球范围的观测数据. 与 POLDER 相比, 我国高分 5 号卫星平台搭载的多

角度偏振相机 (directional polarimetric camera, DPC) 在多项指标上有所突破^[9,10]. 高分 5 号卫星已经于 2018 年 5 月成功发射, 在接下来的若干年中, DPC 将为全球气候变化、污染传输和气溶胶特性研究等领域提供重要数据, 是继 POLDER 之后全球多角度偏振观测数据的重要来源. 顾行发等^[11]针对 DPC 在轨定标方法开展了相关研究, 文献^[12-14]针对 DPC 航空观测数据开展了地表反射率模型的相关研究, Cheng 等^[15]开展了 DPC 航空数据的气溶胶反演研究. 在 DPC 卫星发射后, 迫切需要对多角度偏振观测系统的气溶胶反演能力开展定量

* 国家重点研发计划 (批准号: 2016YFE0201400)、中国科学院科技服务网络计划 (STS) 区域重点项目 (批准号: KFJ-STG-QYZD-022)、遥感科学国家重点实验室开放基金 (批准号: OFSLRSS201710) 和国家自然科学基金 (批准号: 41671367, 41505022, 41871269) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lizq@radi.ac.cn

化的评估.

研究表明, 对于采用多角度观测模式的卫星传感器, 有效观测角度个数及对应的观测几何会引起观测信息量的较大变化^[16–19], 另外, 卫星反演依赖于一定的先验知识, 而先验误差会进一步影响反演的不确定性^[20]. Li 等^[10]针对 DPC 传感器提出了多参数最优化估计反演框架, 该框架基于最优估计理论^[21], 采用改进的地表反射率模型, 联合多角度的辐射强度和偏振观测进行光谱气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 等参数的反演. 在此基础上, 为了系统地理解 DPC 的气溶胶反演能力, 需要考虑以下几个方面的问题: 1) 观测角度个数和观测几何对气溶胶反演的影响; 2) 测量误差对反演的影响; 3) 气溶胶和地表模型的先验估计误差对反演的影响.

针对上述问题, 本研究基于最优化估计反演理论框架, 引入信息量分析工具, 从仿真和误差的角度系统分析了 DPC 观测信息量对观测角度个数的依赖, 多角度观测地表和气溶胶参数的理论反演误差, 以及观测角度个数、观测误差和气溶胶模型误差对反演误差的影响. 通过联合多角度强度和偏振观测数据, 对 DPC 的气溶胶和地表参数反演能力以及反演不确定性进行定量评估, 为 DPC 反演算法的发展提供参考.

2 多角度偏振卫星观测及矢量辐射传输模型

DPC 采用 512×512 有效像元的探测器, 地面幅宽达到 1850 km. 通过沿轨多次成像, DPC 实现对同一目标多达 12 个角度的观测. 同时, DPC 采用滤光片–偏振片组合的方式, 提供 5 个波段的强度观测以及 3 个波段的偏振测量. DPC 基本观测参数如表 1 所列 (P 表示偏振测量通道).

表 1 DPC 传感器的基本参数

Table 1. Basic characteristics of DPC sensor.

设备参数	值
观测角度个数	≤ 12
波段/nm	443, 490(P), 565, 670(P), 763, 765, 865(P), 910
相应带宽/nm	20, 20, 20, 20, 10, 40, 40, 20
观测量	I, Q, U
辐射定标误差	$\leq 5\%$
偏振定标误差	≤ 0.02

经过严格的几何校正和配准, DPC 提供的 L1 级产品包含归一化 Stokes 矢量^[22]的前三个分量 I, Q 和 U . I 为总的辐射强度, Q 和 U 描述了光相对于主平面 (由观测方向和太阳位置构成的平面) 的偏振状态. 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辐亮度 L_p 进行反演^[23–26], 其定义为:

$$L_p = \sqrt{Q^2 + U^2}, \quad (1)$$

相应地, 卫星观测的表观反射率和表观偏振反射率可以由下式计算得到:

$$\begin{cases} r^{\text{TOA}} = \pi I / \mu_0, \\ r_p^{\text{TOA}} = \pi L_p / \mu_0, \end{cases} \quad (2)$$

其中 μ_0 为太阳天顶角的余弦.

采用线性化的矢量辐射传输模型 UNL-VRTM (unified linearized vector radiative transfer model)^[27]对 DPC 多角度偏振观测进行模拟. UNL-VRTM 在 VLIDORT (vector linearized discrete ordinate radiative transfer model)^[28]的基础上进行开发, 增加了 linearized Mie, linearized T-matrix, Rayleigh 散射以及基于 HITRAN (high-resolution transmission molecular absorption database) 数据库的 line-by-line (LBL) 气体吸收计算模块, 形成了开源且易用的辐射传输模型. UNL-VRTM 能够仿真 TOA (top of atmosphere) 归一化的 Stokes 矢量, 同时计算出 I, Q 和 U 对模型参数的雅可比矩阵 (Jacobian matrix), 该模型已经在许多研究中得到应用和验证^[29–33].

3 研究方法

3.1 地表模型

对于卫星偏振观测, 本研究所采用的地表模型由强度和偏振两部分的贡献构成^[16]:

$$\mathbf{R}(\mu_0, \mu_v, \phi, \lambda) = r(\lambda) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \rho(C, NDVI) \mathcal{F}(\gamma, n), \quad (3)$$

其中 \mathbf{R} 为地表反射率矩阵; μ_v 为观测天顶角的余弦; ϕ 为相对方位角; $r(\lambda)$ 为双向反射率分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF); ρ 为 Maignan 等^[34]提出的与观测几何相

关的半经验参数模型函数, 包含一个自由参数 C 和归一化的植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 参数; \mathcal{F} 为菲涅耳矩阵, 依赖于观测几何 γ 和复折射指数 n . 通常情况下, 与波长无关的地表双向偏振反射率函数 (bidirectional polarized reflectance distribution function, BPDF) 可以简单描述为

$$r_p = \rho \mathcal{F}_{1,2}, \quad (4)$$

进一步, 对于和波长相关的 $r(\lambda)$, 采用 Litvinov 等 [35] 提出的改进的核驱动 BRDF 模型:

$$r(\mu_0, \mu_v, \phi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) [1 + k_1 f_{\text{geom}}(\mu_0, \mu_v, \phi) + k_2 f_{\text{vol}}(\mu_0, \mu_v, \phi)], \quad (5)$$

其中三个核函数 f_{iso} , f_{geom} 和 f_{vol} 分别代表各向同性散射、几何光学散射和体散射, k_1 和 k_2 是两个与波长无关的系数, 描述了地表反射率的各向异性.

3.2 气溶胶模型

采用球形粒子假设的双峰对数正态分布函数来描述气溶胶粒子谱:

$$\frac{dV}{d\ln r} = \sum_{i=1}^2 \frac{V_0^i}{\sqrt{2\pi\ln\sigma_g^i}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_V^i)^2}{2\ln^2\sigma_g^i}\right], \quad (6)$$

其中 i 表示气溶胶模态, $i=1$ 和 $i=2$ 分别为细模态和粗模态; r_V 和 σ_g 分别为体积谱几何中值半径 (单位为 μm) 和标准差. 为了和前向模型采用的参数一致, 采用有效半径 r_{eff} 和有效方差 v_{eff} 来代替 (6) 式中的 r_V 和 σ_g 作为输入. 二者的转换关系为:

$$\begin{cases} r_{\text{eff}} = r_V \exp\left(-\frac{1}{2}\ln^2\sigma_g\right), \\ v_{\text{eff}} = \exp(\ln^2\sigma_g) - 1. \end{cases} \quad (7)$$

为方便描述, 下文中以上角标 f 和 c 区分气溶胶细模态和粗模态, 相应地, 气溶胶总体积柱浓度为 $V_0 = V_0^f + V_0^c$, 细模态柱体积比 $\text{FMF}_V = V_0^f / V_0$. 气溶胶体积柱浓度是与波长无关的物理量, 可以通过 MIE 散射计算得到气溶胶光谱 AOD 参数. 复折射指数是影响气溶胶散射和吸收特性的重要参数, 假设气溶胶复折射指数与波长无关, 分别用 m_1^f , m_1^c 和 m_2^c 表示细、粗模态气溶胶复折射指数的实部和虚部.

3.3 最优化估计模型

为了对 DPC 反演能力进行系统性的定量评

估, 引入最优化估计理论中的两个评价指标: 自由度 (degree of freedom for signal, DFS) 和后验误差 (posteriori error). 其中, DFS 是对测量中包含的目标信息的定量描述, DFS 越高, 观测包含的目标信息越充分, 通常, 当某个参数的 DFS 大于 0.5 时, 可以认为该参数能够通过观测反演得到 [36]. 总 DFS 则描述了观测系统的整体能力, 是基于最优化估计反演框架对卫星观测能力总的定量化评价. 后验误差又称为理论反演误差, 描述了反演结果的不确定性. 这两个指标是定量分析卫星传感器对气溶胶遥感观测能力的有力工具, 下面给出其定义和具体描述.

卫星观测系统可以用形式简单的前向模型进行描述:

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \boldsymbol{\epsilon}, \quad (8)$$

其中, \mathbf{y} 为观测向量, 由卫星传感器观测的强度和偏振辐射量构成; \mathbf{x} 为状态向量, 由待反演的地表和气溶胶参数构成; \mathbf{b} 为非状态向量, 由非反演的地表或气溶胶参数构成; \mathbf{F} 为描述状态量和观测量之间物理关系的前向模型, 即大气辐射传输过程; $\boldsymbol{\epsilon}$ 是经验误差项. 假设误差遵循高斯概率分布, 基于贝叶斯理论, 则反演结果向量 $\hat{\mathbf{x}}$ 可以描述为:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_a + (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K} \mathbf{x}_a), \quad (9)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}$ 是对反演参数统计意义上的最优估计, 也称为后验估计; \mathbf{x}_a 和 \mathbf{S}_a 分别为状态向量 \mathbf{x} 的先验估计和误差协方差矩阵; \mathbf{S}_ϵ 是包含测量误差和前向模型误差在内的误差协方差矩阵; \mathbf{K} 称为雅可比矩阵或权重矩阵, 描述了前向模型对状态向量的敏感程度, 其元素 $K_{i,j}$ 表示第 i 个观测量对第 j 个状态量的偏导, 即 $K_{i,j} = \partial \mathbf{F}_i / \partial \mathbf{x}_j$.

后验估计对状态参数的偏导数称为平均核矩阵, 描述了反演结果对真实状态的敏感程度, 定义为

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{x}} = (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K}, \quad (10)$$

\mathbf{A} 是归一化的矩阵, 对角元素 $A_{i,i}$ 即为第 i 个状态参数的 DFS, 而观测系统总的 DFS 是矩阵 \mathbf{A} 的对角元素之和, 即矩阵 \mathbf{A} 的迹.

误差项 $\boldsymbol{\epsilon}$ 包含了观测误差和前向模型误差, 假设误差相互独立, 则误差协方差矩阵 \mathbf{S}_ϵ 可以表示成

$$\mathbf{S}_\epsilon = \mathbf{S}_y + \mathbf{K}_b \mathbf{S}_b \mathbf{K}_b^T, \quad (11)$$

其中 \mathbf{S}_y 描述了传感器的测量误差, 主要由卫星传

传感器的信噪比和定标误差等因素决定; 右侧第二项描述了先验误差 (气溶胶或地表模型误差) 经过前向辐射传输计算后传递到模拟观测的误差, 其中 S_b 为非状态向量误差协方差矩阵, 描述了模型参数先验估计的不确定性, K_b 为模拟观测对非状态矢量的雅可比矩阵. 最终, 后验误差协方差矩阵 \hat{S} 可以表示为:

$$\hat{S} = (S_a^{-1} + K^T S_\epsilon^{-1} K)^{-1}. \quad (12)$$

假设每一次测量相互独立, 同时模型参数之间是不相关的^[37], 则 S_y , S_a 和 S_b 均为对角矩阵, 从而 \hat{S} 对角元素的平方根即为对应参数的后验误差.

4 多角度偏振仿真

4.1 观测几何

图 1 为基于 DPC 多角度观测模式提取的四组典型观测几何, 每一组观测包含 12 个观测角度, 具体由对应的观测天顶角 (θ_v) 和相对方位角 (ϕ) 所组成的极坐标来表示, $\phi = 0^\circ$ 处的实心标识符分别为四组观测对应的太阳天顶角 (θ_0).

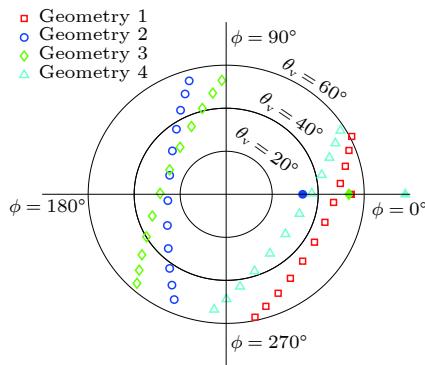


图 1 研究采用的 DPC 多角度观测几何

Fig. 1. Multi-angle observation geometries adopted in the simulation, information content analysis and a posteriori error analysis. The solid circle, diamond, square and triangle with $\phi = 0^\circ$ represent the corresponding position of the Sun for Geometry1-4, respectively.

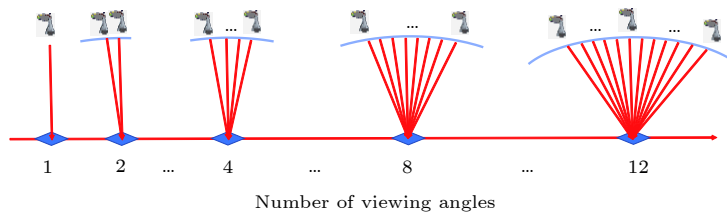


图 2 不同观测角度个数的观测示意图

Fig. 2. Illustrations of observation scenarios with different number of viewing angles.

为了分析观测角度数量对反演的影响, 按照观测天顶角由小到大对每一组观测中的 12 个角度进行排序, 然后依次增加观测角度个数, 从而形成包含不同观测角度个数的观测模式, 具体如图 2 所示.

对应地, 各组观测在不同的观测角度个数下散射角的分布范围如图 3 所示, 其中第 2 和第 3 组观测覆盖的散射角范围较小, 第 1 和第 4 组观测覆盖的散射角范围较大, 同时更靠近后向散射区域. 四组观测的散射角范围分别为 $[116.68^\circ, 173.62^\circ]$, $[107.72^\circ, 121.62^\circ]$, $[82.23^\circ, 109.78^\circ]$ 和 $[92.58^\circ, 145.82^\circ]$.

4.2 观测向量及观测误差

DPC 的一组多角度观测数据包含不同观测几何、不同观测波段的强度和偏振观测值:

$$y = [I, L_p]^T, \quad (13)$$

式中的 I 和 L_p 分别为强度和偏振观测构成的向量:

$$\begin{cases} I = [I_{\lambda_1}^{v_1}, \dots, I_{\lambda_1}^{v_N}, I_{\lambda_2}^{v_1}, \dots, I_{\lambda_2}^{v_N}, \dots, I_{\lambda_5}^{v_1}, \dots, I_{\lambda_5}^{v_N}]^T, \\ L_p = [L_{p\lambda_2}^{v_1}, \dots, L_{p\lambda_2}^{v_N}, L_{p\lambda_4}^{v_1}, \dots, L_{p\lambda_4}^{v_N}, L_{p\lambda_5}^{v_1}, \dots, L_{p\lambda_5}^{v_N}]^T, \end{cases} \quad (14)$$

其中, $v_1 \dots v_N$ 分别表示第 1 到第 N 个观测角度 ($N \leq 12$), $\lambda_1 \dots \lambda_5$ 分别对应 DPC 传感器的 443, 490, 565, 670 和 865 nm 通道. DPC 具备 12 个角度的观测能力, 因此一组观测最多可包含 $12 \times (5 + 3) = 96$ 个观测量.

强度和偏振作为两种不同的观测量, 其定标精度也有所不同, 因此需要对二者的观测误差分别进行考虑. DPC 辐射强度测量的相对不确定性在 3% 到 5% 之间, 这里按照上限 5% 设定, 即 $\frac{\epsilon_I}{I} = 0.05$, ϵ_I 表示绝对定标误差; 对于偏振测量, DPC 采用实验室偏振盒定标的方法, 表 1 中的偏振定标精度为线偏振度 (degree of linear polarization, DOLP) 的最大绝对误差, 为了更准确描述偏振测

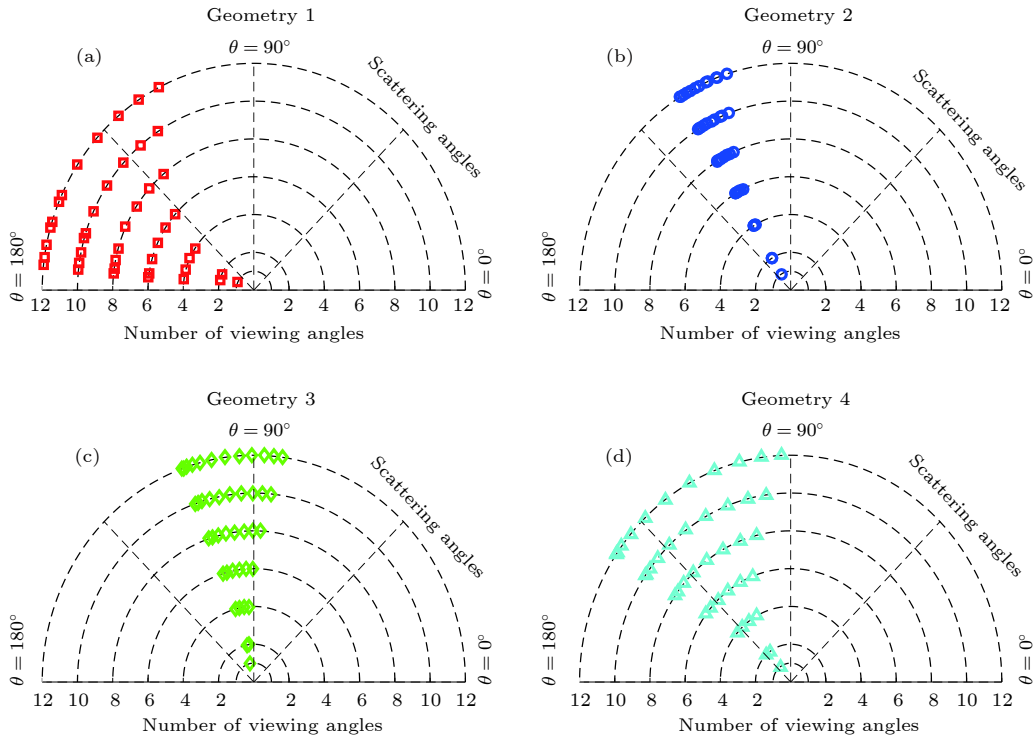


图 3 四组观测在不同观测角度个数下的散射角分布

Fig. 3. Distribution of the range of scattering angle corresponding to the geometries in Fig. 1.

量误差, 用下式来描述线偏振度的不确定性:

$$\epsilon_{\text{DOLP}} = 0.01 + 0.01 \times \text{DOLP}, \quad (15)$$

这里, 线偏振度定义为 $\text{DOLP} = \frac{L_p}{I}$. 因此, 可以得到偏振辐亮度的绝对误差为

$$\epsilon_{L_p} = L_p \frac{\epsilon_I}{I} + I \epsilon_{\text{DOLP}}, \quad (16)$$

其中右边两项分别描述了辐射定标不确定性和偏振定标不确定性. 假设观测误差不随波段和观测角度变化, 即观测误差与观测模式无关, 则 S_y 可以写成以下形式:

$$S_y = \begin{pmatrix} S_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & S_{L_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_I^2 e_I & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \epsilon_{L_p}^2 e_{L_p} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

其中, S_I 和 S_{L_p} 分别表示强度和偏振观测的误差协方差矩阵, e_I 和 e_{L_p} 分别表示和 I , L_p 具有相同维度的单位对角矩阵.

4.3 气溶胶和地表模型参数及先验估计误差

表 2 列出了状态向量 x 和非状态向量 b 的组成情况, 为了分析所有气溶胶和地表参数的可反演性, 将信息量分析过程分为两种情况: 一是将气溶胶和地表的参数全部视为状态参量, 即没有非状态参量; 二是将气溶胶的模型参数 (包括复折射指

表 2 状态向量和非状态向量的参数组成

Table 2. State vector and non-state vector elements for different scenarios.

符号	参数名称	情形1情形2	
		x	b
V_0^f, V_0^c	气溶胶细、粗模态体积柱浓度 / ($\mu\text{m}^3, \mu\text{m}^2$)	✓	✓
$r_{\text{eff}}^f, r_{\text{eff}}^c$	气溶胶细、粗模态有效半径 / (μm)	✓	✓
$v_{\text{eff}}^f, v_{\text{eff}}^c$	气溶胶细、粗模态有效方差	✓	✓
m_1^f, m_1^c	气溶胶细、粗模态复折射指数实部	✓	✓
m_i^f, m_i^c	气溶胶细、粗模态复折射指数虚部	✓	✓
$f_{\text{iso}}(\lambda_1), \dots, f_{\text{iso}}(\lambda_5)$	地表BRDF朗伯项参数	✓	✓
k_1, k_2	地表BRDF几何项和体积项参数	✓	✓
C	地表BPDF参数	✓	✓

数、有效半径和有效方差) 视为非状态参量.

误差协方差矩阵 S_a 和 S_b 由对应参数的先验估计误差构成, 可以描述为:

$$\begin{cases} S_a = \text{diag} \left(\left[\epsilon_{x_1}^2, \dots, \epsilon_{x_{M_1}}^2 \right]^T \right) \\ S_b = \text{diag} \left(\left[\epsilon_{b_1}^2, \dots, \epsilon_{b_{M_2}}^2 \right]^T \right) \end{cases}, \quad (18)$$

其中 $\text{diag}(\dots)$ 表示构造一个对角矩阵, 由向量元素构成矩阵的主对角元素. M_1 和 M_2 分别表示反

演参数和非反演参数的数量, 第一种情况 M_1 和 M_2 分别为 18 和 0, 第二种情况 M_1 和 M_2 分别为 10 和 8.

本研究中, 气溶胶模型参数采用地基 AERONET 多年的观测统计数据^[38]; BRDF 参数中, $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 取自 USGS 和 ASTER 的地表反射率数据库^[39,40], 对

应的误差来自基于数据库地表反射率变化范围的统计; k_1 和 k_2 参数采用 Litvinov 等^[35,41]的研究; BPDF 参数 C 来自 Maignan 等^[34]的研究. 表 3 列出了参数的取值及相应的误差, 其中, 气溶胶 m_r 参数、作为状态量时的 m_i 参数以及地表 $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 参数为绝对误差, 其他参数为相对误差.

表 3 气溶胶和地表模型参数及其先验估计误差

Table 3. A priori value of the aerosol and surface model parameters and corresponding errors adopted in the simulation.

气溶胶模型 ¹					
	$V_0^f/\mu\text{m}^3\cdot\mu\text{m}^{-2}$	$V_0^c/\mu\text{m}^3\cdot\mu\text{m}^{-2}$	$V_0/\mu\text{m}^3\cdot\mu\text{m}^{-2}$	FMF _V	AOD(550 nm)
细粒子主导	0.0745(100%)	0.0186(100%)	0.093	0.8	0.5
粗粒子主导	0.0493(100%)	0.197(100%)	0.246	0.2	0.5
	m_r	m_i	$r_{\text{eff}}/\mu\text{m}$	v_{eff}	
细模态	1.44(0.15, 0.025)	0.011(0.01, 50%)	0.21(80%, 15%)	0.25(80%, 15%)	
粗模态	1.55(0.15, 0.04)	0.003(0.005, 50%)	1.90(80%, 35%)	0.41(80%, 35%)	
地表模型 ²					
	$f_{\text{iso}}(\lambda)$	k_1	k_2	C	NDVI
裸土	0.0705(0.0215), 0.1006(0.0224), 0.1720(0.0466), 0.2427(0.0207), 0.3253(0.2119)	0.547(80%)	0.158(80%)	6.9(80%)	0.03
植被	0.0325(0.0425), 0.0347(0.0495), 0.0737(0.0777), 0.0395(0.0917), 0.3809(0.0792)	0.668(80%)	0.087(80%)	6.57(80%)	0.62

¹气溶胶模型参数 m_r , m_i , r_{eff} , v_{eff} 括号内的值分别为该参数作为 x 和 b 时的误差; ²地表模型参数 $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 的值依次对应 443, 490, 565, 670 和 865 nm.

气溶胶分为细粒子主导 (fine-dominated) 和粗粒子主导 (coarse-dominated) 两种典型类型, 分别对应城市污染型和沙尘型气溶胶^[42,43]; 地表分为植被和裸土两种类型, 分别对应卫星观测中的暗地表和亮地表情况. 表 2 中的气溶胶体积柱浓度对应 550 nm 的 AOD 为 0.5, 为轻度污染天气情况.

4.4 卫星观测仿真

根据 4.1 节中的观测几何, 基于 4.2 和 4.3 节的模型参数设置, 利用 UNL-VRM 前向模型对 DPC 多角度观测进行前向模拟仿真, 本节描述了 DPC 强度和偏振观测的仿真结果以及地表模型误差对 TOA 观测的影响.

4.4.1 DPC 强度观测仿真

Litvinov 等^[35]的研究表明, 改进的 BRDF 模型误差小于 2%, 造成 TOA 总反射率的不确定性为 4%—5%, 其中裸土地表的不确定性略大于植被地表. 在实际的反演中, 由于地表的先验知识难以精确获取, 很多情况下无法准确判断地表状态, 特别是混合像元等情况. 因此, 在模型误差的基础上, 地表先验估计的不确定性也会造成 TOA 反射率

的误差, 先验不确定性具体表现为不恰当的模型参数估计. 我们基于改进的 BRDF 模型, 通过对参数 k_1 , k_2 参数引入误差, 分析先验估计误差对地表反射率和表观反射率的影响.

图 4 为模拟的地表反射率 (r^{surf}) 和表观反射率 (r^{TOA}), 以及参数 k_1 参数叠加 10% 相对误差所引起的 r^{surf} 和 r^{TOA} 的误差情况. 其中, 图 4(a)—(e) 和图 4(f)—(j) 分别对应植被和裸土地表类型在不同波段的结果, 每个子图又包含 4 组观测的对比. 模拟采用了细粒子主导的气溶胶类型, $\text{AOD}_{550\text{ nm}} = 0.2$.

由图 4 可知, 1) 受到瑞利散射和气溶胶的影响, 在 443 和 490 nm 波段, 表观反射率和地表反射率的差异较大, 而在 565, 670 和 865 nm 波段, 表观反射率和地表反射率的差异明显减小. 植被和裸土地表表观反射率波段间的特征仍然存在. 2) 参数 k_1 10% 的误差会导致平均 5.6% 的地表反射率的误差, 受程辐射的影响, 表观反射率的平均误差降至 4.65%. 表观反射率最大存在 6.8% 的误差, 发生在裸土地表 865 nm 波长处. 3) 误差的传递并未表现出对卫星观测几何较大的依赖, 植被地表的不确定性和对应的 TOA 误差略小于裸土地

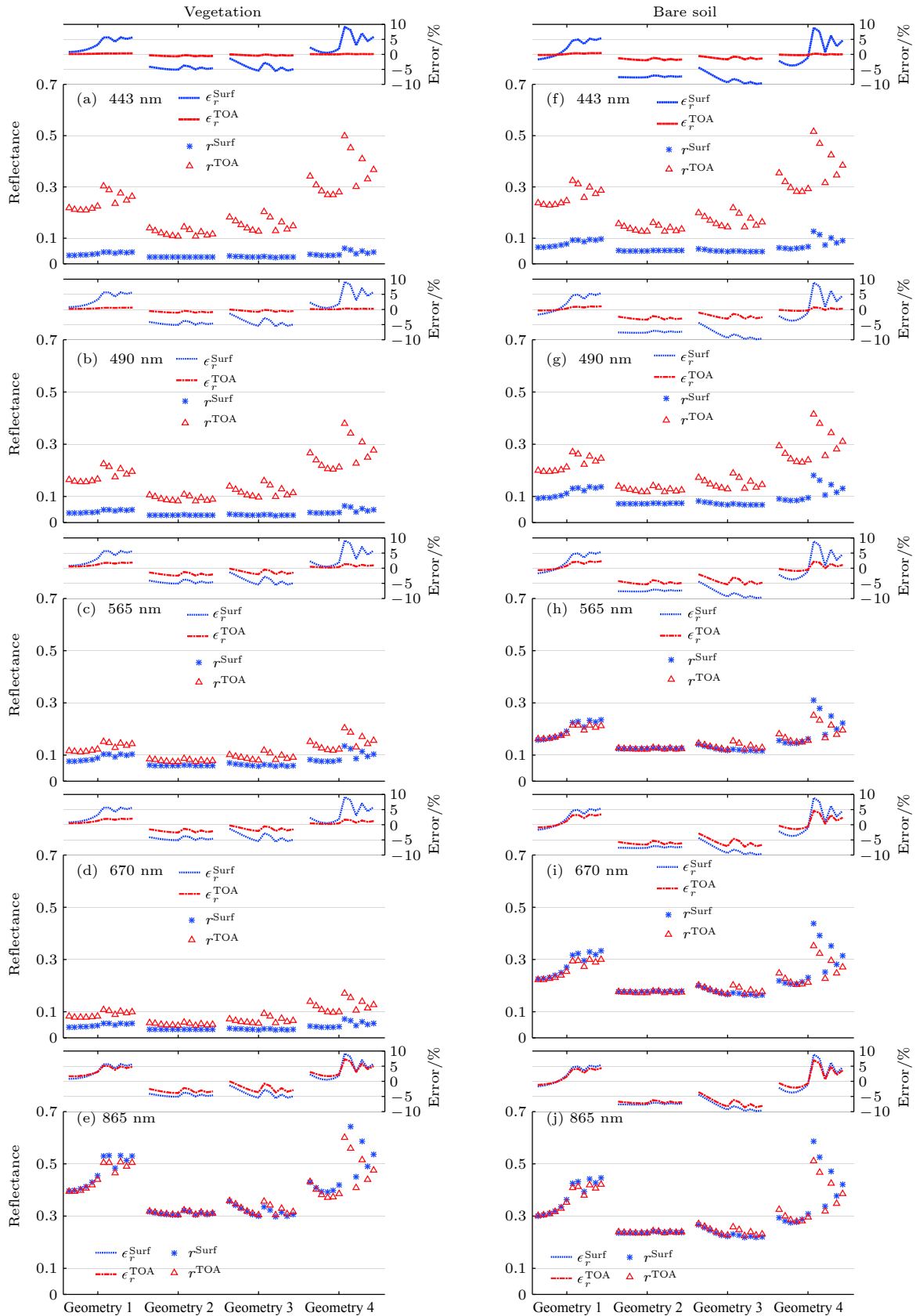


图 4 不同观测几何下的地表反射率、表观反射率以及地表模型参数误差对表观反射率的影响 (a)–(e) 植被地表; (f)–(j) 裸土地表
 Fig. 4. Contribution of surface reflectance to TOA reflectance at 443, 490, 565, 670 and 865 nm, as well as the influence of BRDF parameter error to TOA reflectance for vegetation ((a)–(e)) and bare soil ((f)–(j)) surface. The horizontal axis of each case is arranged by scattering angle.

表, 这一点与 Litvinov 等的研究相一致^[35]. 另外, 结合图 3 可知, 较大的表观反射率误差主要发生在散射角变化较大的观测情形 (Geometry 1 和 4).

4.4.2 DPC 偏振观测仿真

基于 BPDF 模型进一步模拟了 DPC 多角度偏振观测. 仿真采用细粒子主导气溶胶类型, $AOD_{550\text{ nm}} = 0.2$. 图 5 的下半部分为四组观测几何下植被地表的偏振反射率 (r_p^{Surf}) 及三个偏振波段 (490, 670 和 865 nm) 的表观偏振反射率 (r_p^{TOA}). 图 5 的上半部分为参数 C 叠加 10% 相对误差引起的 r_p^{Surf} 和 r_p^{TOA} 的变化情况.

由图 5 可以发现: 1) 地表偏振反射率对 TOA 的偏振贡献较小, 表观偏振反射率主要来自于气体分子和气溶胶的偏振贡献. 同时, 偏振反射率对观测几何具有较强的依赖性, 不同的观测角度偏振反射率存在较大的差异. 2) 参数 C 10% 的相对误差会引起地表偏振反射率 0.7×10^{-3} 的差异, 然而这一误差传递到 TOA 后, 会降低 2 个数量级. 490, 670 和 865 nm 的表观偏振反射率误差分别为 0.54×10^{-5} , 0.36×10^{-5} 以及 0.33×10^{-5} .

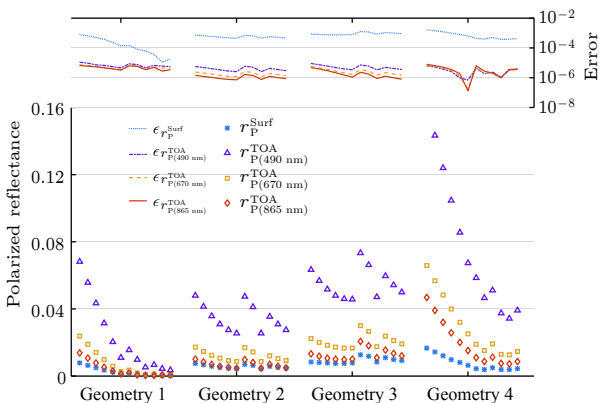


图 5 不同观测几何下植被地表偏振反射率和表观偏振反射率, 以及 10% 的参数不确定性对二者的影响
Fig. 5. Contribution of polarized reflectance to TOA polarized reflectance for vegetation surface at 490, 670 and 865 nm, as well as the influence of BPDF parameter error to TOA polarized reflectance.

5 结果与分析

5.1 信息量分析

5.1.1 信息量对观测角度的依赖性

针对不同气溶胶和地表类型, 在轻度污染条件下 ($AOD_{550\text{ nm}} = 0.5$) 计算 4.3 节全部参数视为状

态参量情况下的 DFS. 图 6 采用盒须图的形式给出了总 DFS 随观测角度个数的变化情况, 每个盒须图包含中值 (盒中实线)、25% 值 (盒底), 75% 值 (盒顶) 以及数据最大值 (须顶) 和最小值 (须底). 由图 6 可以得到以下结论.

1) 总的 DFS 随观测角度数量的增加显著提升. 图 6(a) 中, 观测角度个数从 1 增加到 12, 气溶胶总 DFS 增加了 5.9 (从 3.3 增至 9.2), 地表总 DFS 增加了 2.7 (从 3.8 增至 6.5). 根据信息量分析理论, 多角度观测比单角度可以额外提供 5—6 个气溶胶参数和 3 个地表参数的反演约束. 四组观测平均而言, 多角度观测信息量比单角度提高了 5.45 个 DFS (从 6.75 增至 12.2), 理论上相当于多反演 5—6 个参数. 这表明多角度观测对气溶胶反演具有重要提升作用.

2) 信息量随观测角度数量的增加并非呈现线性增长. 图 6(d) 中, 气溶胶信息量前 9 个角度增加了 3.2 (从 3.0 增至 6.2), 后 3 个角度仅增加了 0.4; 图 6(h) 中, 地表信息量前 9 个角度增加了 3.6, 而后 3 个角度同样仅增加了 0.4. 这是由于随着观测量的增加, 有效观测信息逐渐趋于饱和.

3) 多角度观测下, 卫星的观测几何不同时, 气溶胶信息量呈现较大差异. 图 6(a) 中, 气溶胶总 DFS 为 9.2, 而图 6(b) 中, 总 DFS 为 4.4, 即信息量相差 4.8 个 DFS. 由此可见, 气溶胶参数反演对卫星的观测几何有很强的依赖性. 结合图 3 可知, 卫星观测的散射角覆盖范围越大, 对气溶胶反演越有利. 相对于气溶胶, 地表信息量并未表现出对观测几何较强的依赖, 4 组观测下地表总 DFS 的平均差异仅为 0.5. 这主要是由于地表参数 $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 与观测角度无关, 同时, TOA 观测对地表偏振相对不敏感, 因此, 随着观测角度数量的增加, 地表信息量的增长主要发生在参数 k_1 和 k_2 上.

总的来说, DPC 多角度观测包含的气溶胶信息量平均为 6.4 个 DFS, 地表信息量平均为 6.2 个 DFS. 因此, 理论上 DPC 多角度测量能够约束超过 12 个参数的反演. 另外, 由图 6 中误差棒的范围可知, 相对于地表, 气溶胶参数的反演精度更容易受到气溶胶和地表类型的影响.

5.1.2 信息量受气溶胶和地表类型的影响程度

图 7 给出了多角度观测下各状态参数的信息量情况, 其中图 7(a) 为两种类型气溶胶信息量的对比 (采用植被地表); 图 7(b) 为两种地表信息量

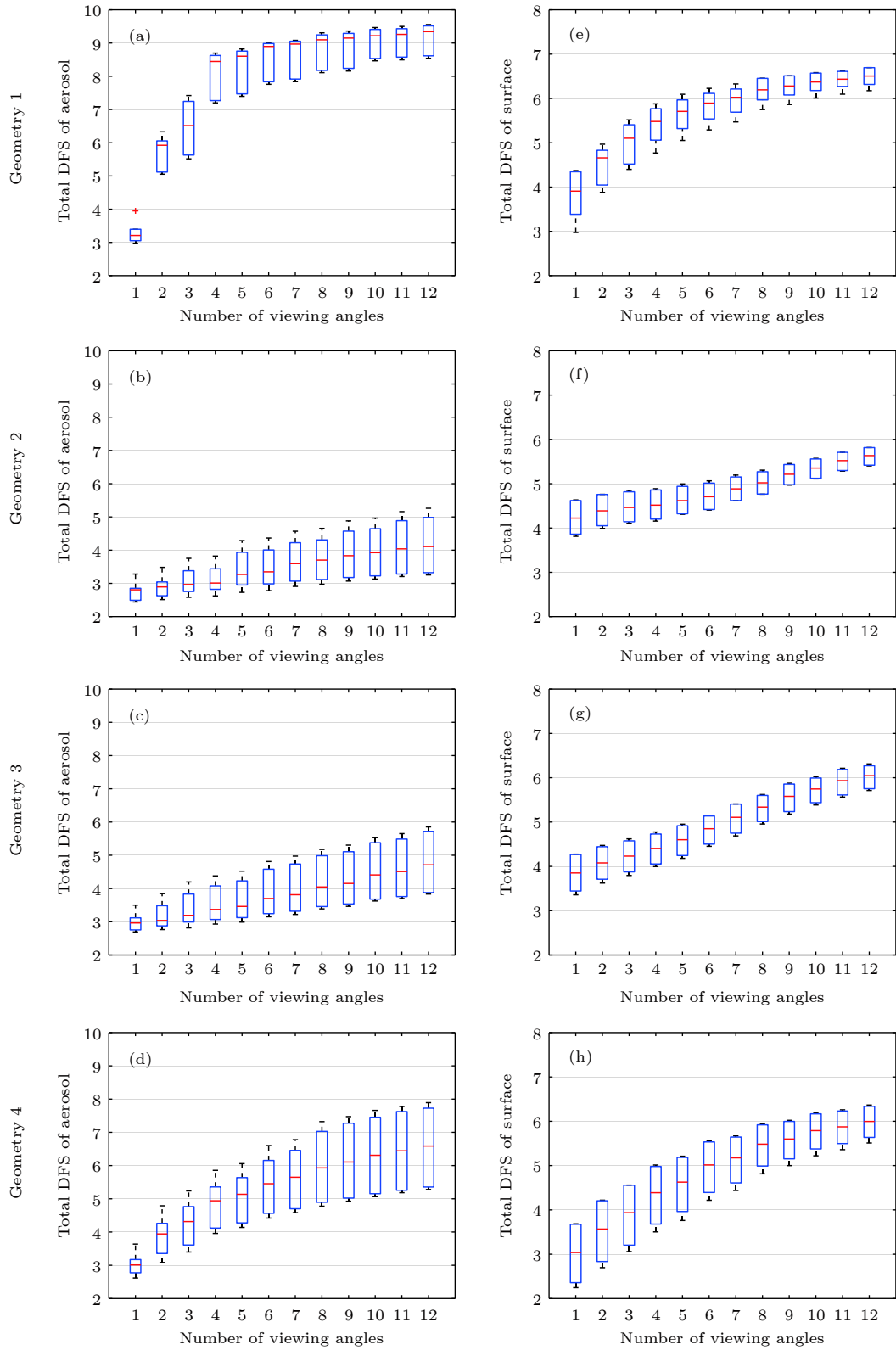


图 6 气溶胶和地表参数的总信息量随观测角度数量的变化情况 ((a)—(d)) 气溶胶参数; ((e)—(h)) 地表参数

Fig. 6. The total DFS of aerosol((a)—(d)) and surface((e)—(h)) parameters as functions of number of viewing angles in terms of surface type(vegetation and bare soil) and aerosol type (fine-dominated and coarse-dominated) with $AOD_{550\text{ nm}} = 0.5$. Quantities in each box-whisker include the median (dash in the box), the 25th and 75th percentiles (box), and the minimum and maximum (whiskers) for each number of viewing angles bin.

的对比 (采用细粒子主导气溶胶类型), 图中各柱子的高度及相应误差棒分别对应四组观测几何的 DFS 均值和标准差, 由图 7 可以得到以下结论.

1) 气溶胶信息量主要集中在体积柱浓度、复折射指数实部和有效半径三个参数上. V_0^f , m_r^f 和 r_{eff}^f 在两种气溶胶类型下的 DFS 均超过 0.9; V_0^c , m_r^c 和 r_{eff}^c 在粗粒子主导类型下的 DFS 分别为 0.8, 0.95 和 0.9, 而在细粒子主导类型下 DFS 仅为 0.2, 0.35 和 0.4, 表明粗模态体积柱浓度的反演与气溶胶类型有关, 在细粒子主导类型下反演存在一定困难; 其他气溶胶参数中, 细粒子主导类型下的 ν_{eff}^f 和粗粒子主导类型下的 ν_{eff}^c 的 DFS 在 0.5 左右, 信息量依赖于观测几何; 复折射指数虚部的信息量较少, 因此反演难度较大.

2) BRDF 模型参数的 DFS 均大于 0.5, $f_{\text{iso}}(\lambda)$

在 670 和 865 nm 两个波段的 DFS 超过了 0.9, BPDF 模型参数 C 的 DFS 在 0.5 左右. 这表明, 多角度观测能够很好地提取地表参数信息, 进而提高气溶胶的反演能力.

3) 地表参数误差棒的范围显著小于气溶胶参数, 表明地表反演受观测几何影响相对较小, 而气溶胶反演更依赖于观测角度; 参数 k_1 和 k_2 的 DFS 误差棒范围高于其他地表参数, 表明这两个参数对卫星观测几何的依赖性相对更强.

5.2 后验误差分析

5.2.1 反演参数的后验误差

针对 4.3 节第二种情况, 即气溶胶模型参数作为非反演参数, 计算了多角度观测下各状态向量的后验误差. 图 8(a) 为两种气溶胶类型的体积柱浓

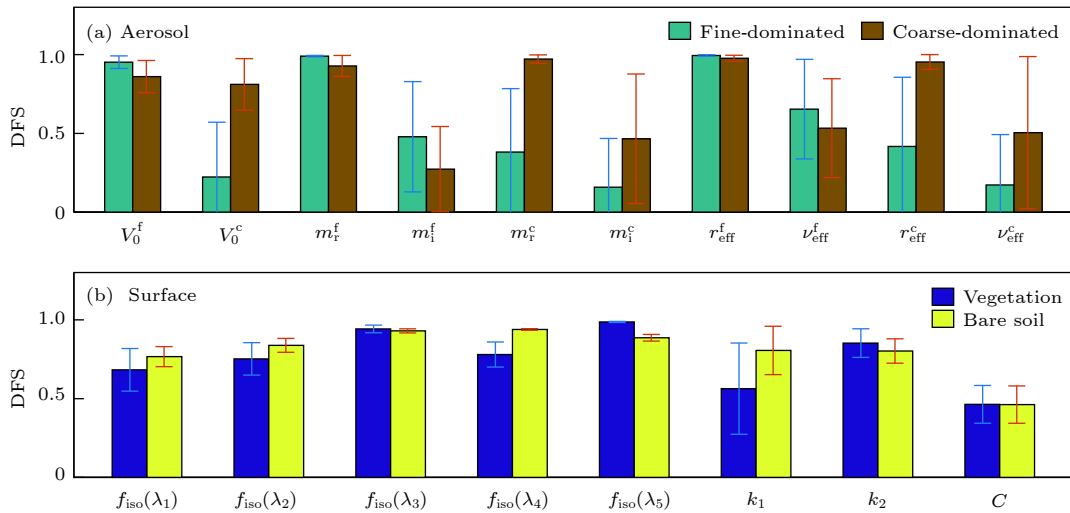


图 7 不同观测几何下气溶胶和地表各参数的信息量 (a) 气溶胶; (b) 地表

Fig. 7. The DFS of aerosol and surface parameters under condition of 12 viewing angles ($AOD_{550\text{ nm}} = 0.5$): (a) Aerosol; (b) surface. Each histogram and error bar are the mean value and standard deviation of different geometries.

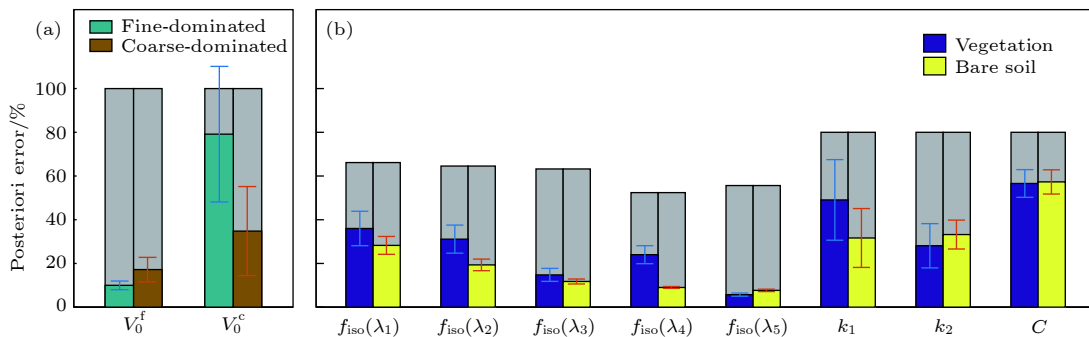


图 8 多角度观测下气溶胶和地表参数的后验误差 (灰色底柱为先验估计误差)

Fig. 8. The posteriori error of retrieved aerosol parameters (a) and surface parameters (b). The histogram and error bars are the mean and standard deviation of different geometries (Geometry 1-4). Both (a) and (b) are calculated under condition of 12 viewing angles ($AOD_{550\text{ nm}} = 0.5$). The gray histogram means the priori estimate error.

度后验误差的对比 (采用植被地表类型), 图 8(b) 为两种地表类型的地表参数后验误差对比 (采用细粒子主导气溶胶类型). 图中各柱状图及误差棒分别对应四种观测的均值和标准差, 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.

由图 8(a) 可知, V_0^f 的平均后验误差为 13.6%, 相对于 100% 的先验估计误差显著降低, 细粒子主导和粗粒子主导气溶胶类型的 V_0^c 的后验误差分别为 79.1% 和 34.9%, 表明细粒子主导类型的 V_0^c 有较大的反演不确定性; 由图 8(b) 可知, $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 的后验误差相对先验误差整体下降明显, 5 个波段平均下降了 41.2%, 其中 865 nm 波段的后验误差降至 10%, 这是由于该波段地表反射率较高, 观测包含的地表信息较多; k_1 和 k_2 的后验误差明显高于 $f_{\text{iso}}(\lambda)$, 表明地表反射率各向异性参数的反演不

确定性仍然较高; 地表偏振反射率参数 C 的后验误差为 57%, 降低了 23%, 反演不确定性比较高, 这是由于地表偏振反射率对 TOA 的贡献很小.

5.2.2 观测角度个数对后验误差的影响

图 9 给出了气溶胶和地表各参数后验误差随观测角度个数的变化情况, 计算采用第 1 组观测几何, 曲线和误差棒分别表示两种地表和细粒子主导气溶胶类型的后验误差的均值和标准差. 由图 9 可以得出以下结论.

1) 随着观测角度数量的增加, 气溶胶参数的后验误差显著降低, 其中 V_0^f 的后验误差从 34.3% 降至 8.8%, V_0^c 的后验误差从 78.3% 降至 20.7%; 地表参数 k_1 和 k_2 的后验误差分别从 80% 和 70% 降至 30% 和 25%, 降低同样非常明显; 然而, $f_{\text{iso}}(\lambda)$ 的后验误差随着观测角度个数的增加并未出

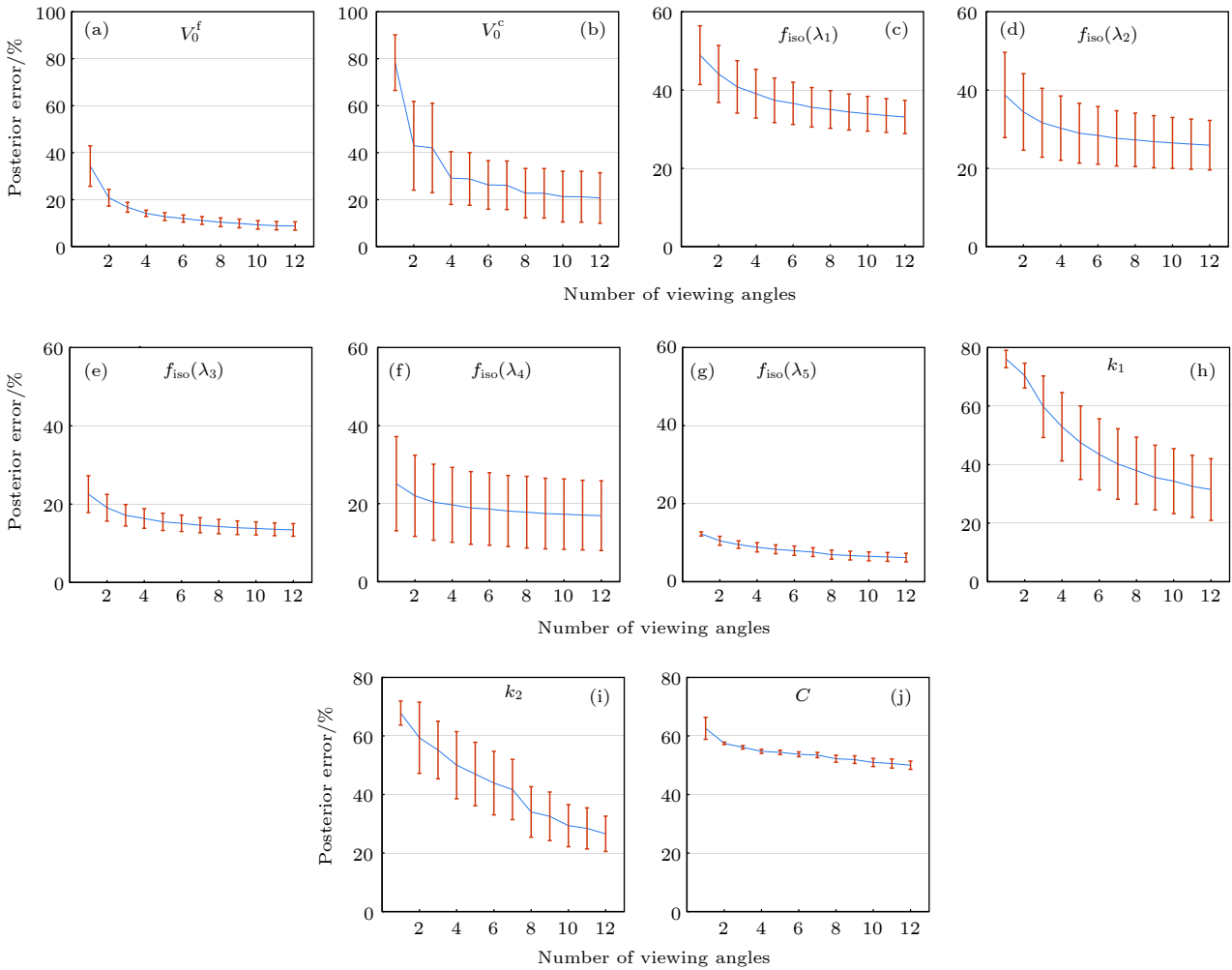


图 9 地表和气溶胶参数的后验误差随观测角度数量的变化情况

Fig. 9. The posterior error of retrieved aerosol and surface parameters as a function of number of viewing angles ($AOD_{550\text{ nm}} = 0.5$). The curve and the error bar are the mean value and standard deviation of different aerosol and surface type, respectively.

现显著的下降,表明该参数的反演对观测角度的个数并不敏感;参数 C 的后验误差仅从 60% 降至 50%,表明观测对参数 C 的敏感性仍显不足.

2) 从误差棒的范围可以看出,气溶胶 V_0^c 参数、地表 k_1 和 k_2 参数的后验误差受地表和气溶胶类型影响较大,而气溶胶 V_0^c 、670 和 865 nm 波长的 $f_{iso}(\lambda)$ 以及参数 C 的后验误差受地表和气溶胶类型影响较小.

5.2.3 观测不确定性对后验误差的影响

图 10 给出了气溶胶和地表参数的后验误差随观测误差的变化情况,计算采用第 1 组观测几何,并考虑了总的观测误差变化和仅偏振观测误差变化两种情况,分别如图中的实线和虚线所示. 图中的曲线和相应的误差棒分别表示两种地表和气溶

胶类型的后验误差的均值和标准差. 由图 10 可以看出,气溶胶 V_0^f 的后验误差随观测误差的增加从 1% 增至 11.6%,基本和观测误差的变化一致,略高于观测误差; V_0^c 的后验误差从 3.2% 增至 24.4%; 443, 490 和 670 nm 波段的 $f_{iso}(\lambda)$ 受观测误差影响非常显著,而 565 和 865 nm 波段受影响相对较小; k_1 和 k_2 后验误差分别从 3.9%, 3.6% 增至 41.1% 和 33.7%; 地表 BPDF 模型参数 C 从 12.2% 增至 53.3%. 另外,由误差棒范围可知, V_0^f , 565 和 870 nm 波段的 $f_{iso}(\lambda)$ 以及参数 C 受地表类型和气溶胶类型的影响较小. 由图 10 中的虚线可以看出,偏振测量误差主要影响的是气溶胶参数的反演精度,气溶胶 V_0^f 和 V_0^c 的后验误差随观测误差的增加分别从 1%, 3.2% 增至 8.56% 和 16.66%,而偏振观测误差变化对地表参数反演的影响较小.

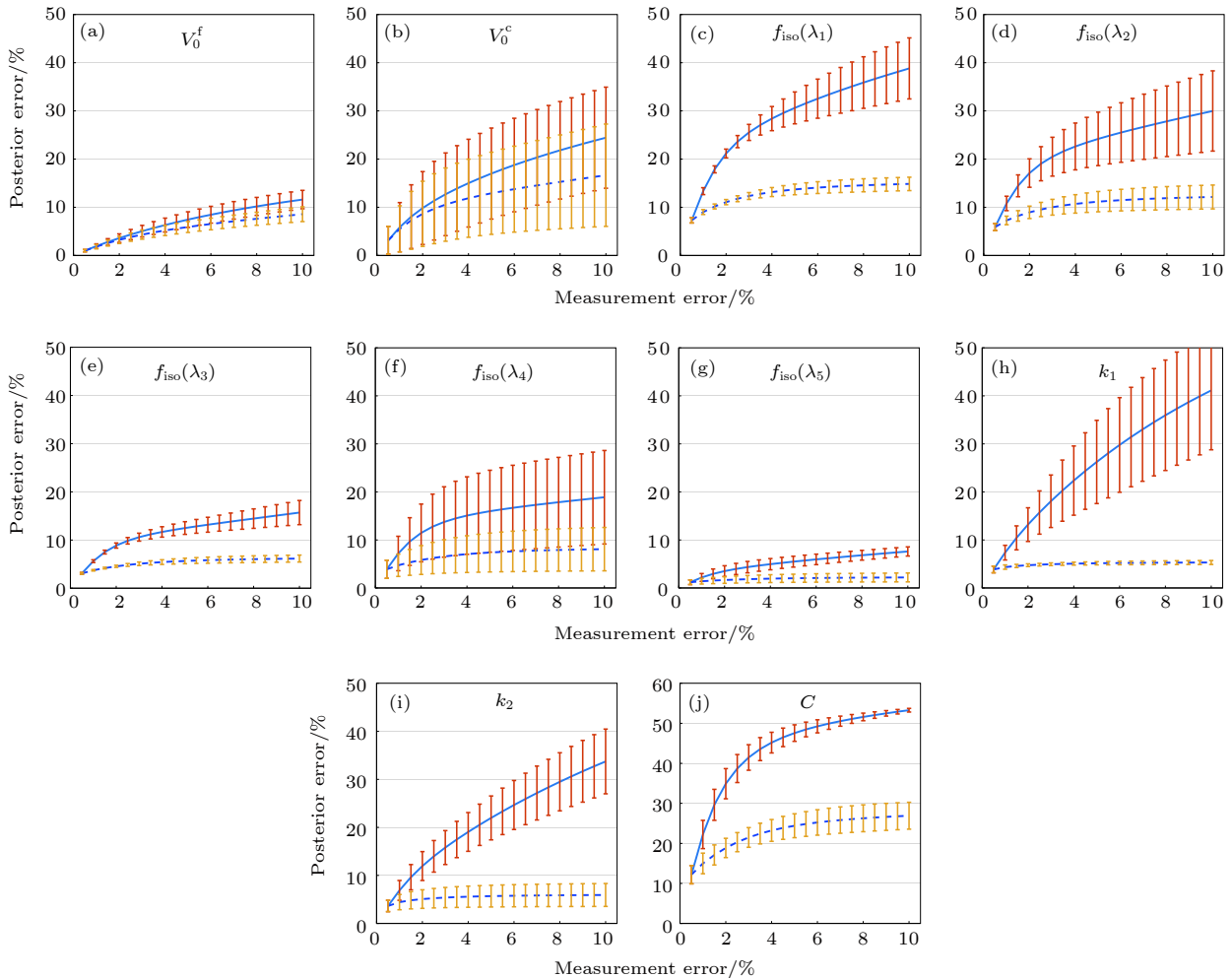


图 10 地表和气溶胶参数的后验误差随观测误差的变化情况

Fig. 10. The posterior error of retrieved aerosol and surface parameters as a function of measurement error ($AOD_{550\text{ nm}} = 0.5$). The solid line and the error bar are the mean value and standard deviation of different aerosol and surface type, respectively. The dash line denotes the contribution from polarized observation error.

5.2.4 气溶胶模型不确定性对后验误差的影响

卫星气溶胶反演算法需要基于一定的先验知识, 例如, AOD 反演需要假定气溶胶类型. 然而, 先验知识往往存在一定的误差. 4.3 节假设气溶胶模型参数已知 (包括气溶胶复折射指数和粒子谱分布参数), 并给出了相应的不确定性, 本节分析后验误差随气溶胶模型参数估计误差的变化情况, 结果

如图 11 所示. 计算中, 气溶胶模型参数误差从 1% 到 100% 变化. 由图 11 可知, 随着模型参数误差的增大, 气溶胶 V_0^c 的后验误差从 15% 增至 40%, 是受气溶胶模型参数不确定性影响最大的参数; 地表参数后验误差受气溶胶模型参数不确定性的影响较小, 其中参数 k_1 和 k_2 受影响相对较大一些, 后验误差分别从 35% 和 15% 增至 40% 和 25%.

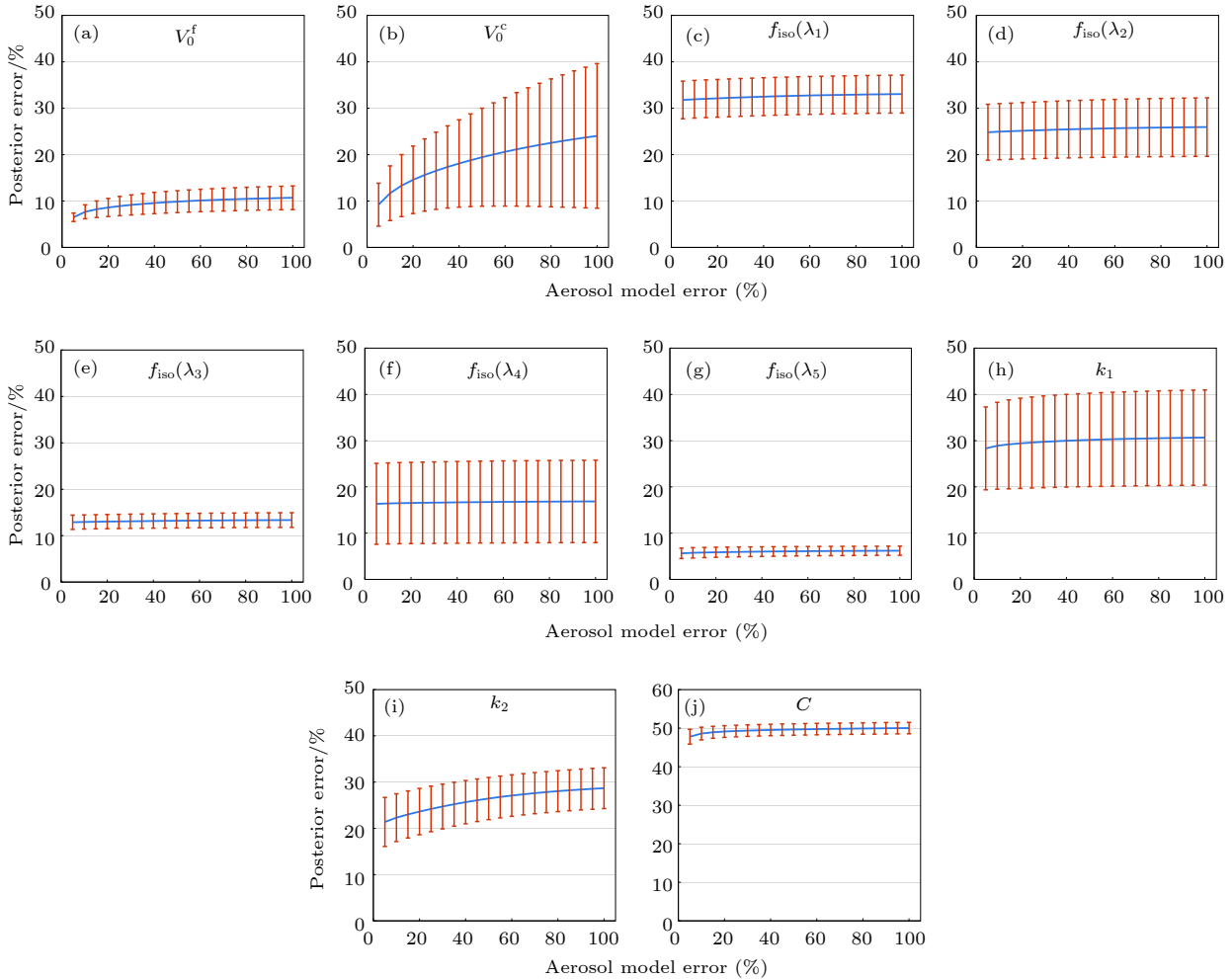


图 11 地表和气溶胶参数的后验误差随气溶胶模型误差的变化情况

Fig. 11. The a posteriori error of retrieved aerosol and surface parameters as a function of aerosol model error ($AOD_{550\text{ nm}} = 0.5$). The curve and the error bar are the mean value and standard deviation of different aerosol and surface type, respectively.

6 结 论

本文针对 DPC 气溶胶反演需求, 基于多参数最优估计反演框架, 模拟了 DPC 多角度偏振观测, 分析了观测信息量对观测角度数量和观测几何的依赖性, 给出了气溶胶和地表参数后验误差以及

后验误差随观测角度个数、观测误差和气溶胶模型误差的变化情况, 通过引入信息量和后验误差分析工具, 定量化系统评估了 DPC 陆地气溶胶反演能力, 为 DPC 在轨测试、反演算法的发展以及后续卫星传感器的设计提供参考. 得到以下主要结论.

1) 卫星观测信息量随观测角度个数的增加显著提升, 气溶胶参数后验误差随着观测角度个数的

增加显著降低. 观测角度个数从 1 增加到 12, 气溶胶和地表总 DFS 平均提高了 5.45(从 6.75 增至 12.2), 气溶胶 V_0^f 和 V_0^c 的后验误差分别降低了 86.4% 和 57.6%, 表明 DPC 多角度观测对气溶胶反演具有重要提升作用.

2) 气溶胶反演表现出对卫星观测几何较强的依赖性. 相同观测角度个数下, 不同观测几何会引起气溶胶信息量 4—5 个 DFS 的差异, 散射角覆盖范围越宽, 观测包含的信息量就越多.

3) 多角度观测下, 气溶胶体积柱浓度、复折射指数实部和有效半径参数的信息量较高, 具有较好的可反演性. 其中, V_0^f , m_r^f 和 r_{eff}^f 在两种气溶胶类型下平均 DFS 均大于 0.9; V_0^c , m_r^c 和 r_{eff}^c 在粗粒子主导类型下平均 DFS 均大于 0.8, 而在细粒子主导气溶胶类型下平均 DFS 均低于 0.5, 表明粗模态气溶胶反演存在一定的不确定性.

4) 影响气溶胶参数反演误差的因素中, 气溶胶模型不确定性对后验误差的影响并不显著, 而观测不确定性是影响后验误差的主要因素. 当观测误差从 5% 增加到 10%, 气溶胶 V_0^f 和 V_0^c 后验误差将分别增加 4.15% 和 7.44%.

参考文献

- [1] IPCC 2014 Climate Change 2014: Synthesis Report (Geneva: IPCC Secretariat) pp2–8
- [2] Diner D J, Chipman R A, Beaudry N, Cairns B, Food L D, Macenka S A, Cunningham T J, Seshadri S, Keller C 2005 *Enabling Sensor and Platform Technologies for Spaceborne Remote Sensing* (Bellingham: Spie-Int Soc Optical Engineering) pp88–96
- [3] Hasekamp O P, Landgraf J 2007 *Appl. Opt.* **46** 3332
- [4] Mishchenko M I, Geogdzhayev I V, Cairns B, Carlson B E, Chowdhary J, Laci A A, Liu L, Rossow W B, Travis L D 2007 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **106** 325
- [5] Herman M, Deuzé J L, Marchand A, Roger B, Lallart P 2005 *J. Geophys. Res.* **110** D10S02
- [6] Tauré D, Bréon F M, Deuzé J L, Dubovik O, Ducos F, François P, Goloub P, Herman M, Lifermann A, Waquet F 2011 *Atmos. Meas. Tech.* **4** 1383
- [7] Kokhanovsky A A, Breon F M 2012 *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **9** 928
- [8] Waquet F, Cornet C, Deuzé J L, Dubovik O, Ducos F, Goloub P, Herman M, Lapyonok T, Labonnote L C, Riedi J, Thieuleux F, Vanbauce C 2013 *Atmos. Meas. Tech.* **6** 991
- [9] Gu X F, Tong X D 2015 *IEEE Geosci. Remote Sens. M* **3** 113
- [10] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, Zheng F X, Luo D G, Wang J, Gu X F, Qiao Y L 2018 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **218** 21
- [11] Gu X F, Chen X F, Cheng T H, Li Z Q, Yu T, Xie D H, Xu H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 070702 (in Chinese) [顾行发, 陈兴峰, 程天海, 李正强, 余涛, 谢东海, 许华 2011 物理学报 **60** 070702]
- [12] Xie D H, Gu X F, Cheng T H, Yu T, Li Z Q, Chen X F, Chen H, GUO J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 077801 (in Chinese) [谢东海, 顾行发, 程天海, 余涛, 李正强, 陈兴峰, 陈好, 郭婧 2012 物理学报 **61** 077801]
- [13] Gu X F, Cheng T H, Xie D H, Li Z Q, Yu T, Chen H 2011 *Atmos. Environ.* **45** 6607
- [14] Xiang K S, Cheng T H, Gu X F, Guo H, Chen H, Wang Y, Wei X, Bao F W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 227801 (in Chinese) [相坤生, 程天海, 顾行发, 郭红, 陈好, 王颖, 魏曦, 包方闻 2015 物理学报 **64** 227801]
- [15] Cheng T H, Gu X F, Xie D H, Li Z Q, Yu T, Chen X F 2011 *Remote Sens. Environ.* **115** 1643
- [16] Dubovik O, Herman M, Holdak A, Lapyonok T, Tanré D, Deuzé J L, Ducos F, Sinyuk A, Lopatin A 2011 *Atmos. Meas. Tech.* **4** 975
- [17] Wu L H, Hasekamp O, Van Diedenhoven B, Cairns B 2015 *Atmos. Meas. Tech.* **8** 2625
- [18] Chen X, Yang D X, Cai Z N, Liu Y, Spurr R J D 2017 *Remote Sens.* **9** 183
- [19] Hasekamp O P, Litvinov P, Butz A 2011 *J. Geophys. Res.* **116** D14204
- [20] Mishchenko M, Yatskiv Y, Videen G 2005 *Photopolarimetry in Remote Sensing* (Dordrecht: Springer Netherlands) pp65–106
- [21] Rodgers C D 2000 *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice* (Singapore: World Scientific) pp13–99
- [22] Wendisch M, Yang P (translated by Li Z Q, Li L, Hou W Z, Xu H) 2014 *Theory of Atmospheric Radiative Transfer* (Beijing: Higher Education Press) pp55–58 (in Chinese) [Wendisch M, Yang P 著(李正强, 李莉, 侯伟, 许华译)2014 大气辐射传输原理(北京: 高等教育出版社)第55—58页]
- [23] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, Goloub P, Herman M, Lafrance B, Maignan F, Marchand A, Nadal F, Perry G, Tanré D 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 4913
- [24] Waquet F, Goloub P, Deuzé J L, Léon J F, Auriol F, Verwaerde C, Balois J Y, François P 2007 *J. Geophys. Res.* **112** D11214
- [25] Xu F, Dubovik O, Zhai P W, Diner D J, Kalashnikova O V, Seidel F C, Litvinnov P, Bovchaliuk A, Garay M J, Van Harten G, Davis A B 2016 *Atmos. Meas. Tech.* **9** 2877
- [26] Zhang Y, Li Z Q, Qie L L, Zhang Y, Liu Z H, Chen X F, Hou W Z, Li K T, Li D H, Xu H 2016 *Remote Sens.* **8** 417
- [27] Wang J, Xu X G, Ding S G, Zeng J, Spurr R, Liu X, Chance K, Mishchenko M 2014 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **146** 510
- [28] Spurr R J D 2006 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **102** 316
- [29] Xu X G, Wang J 2015 *J. Geophys. Res.* **120** 7059
- [30] Xu X G, Wang J, Zeng J, Spurr R, Liu X, Dubovik O, Li L, Li Z Q, Mishchenko M I, Siniuk A, Holben B N 2015 *J. Geophys. Res.* **120** 7079
- [31] Hou W Z, Wang J, Xu X G, Reid J S, Han D 2016 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **178** 400
- [32] Hou W Z, Wang J, Xu X G, Reid J S 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **192** 14
- [33] Chen X, Wang J, Liu Y, Xu X G, Cai Z N, Yang D, Yan C X, Feng L 2017 *Remote Sens. Environ.* **196** 163
- [34] Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, Bouvier M 2009 *Remote Sens. Environ.* **113** 2642
- [35] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B 2011 *Remote Sens.*

- Environ.* **115** 781
- [36] Hou W Z, Li Z Q, Wang J, Xu X G, Goloub P, Qie L L 2018 *J. Geophys. Res.* **123** 2215
- [37] Dubovik O, King M D 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 20673
- [38] Dubovik O, Holben B, Eck T F, Smirnov A, Kaufman Y J, King M D, Tanré D, Slutsker I 2002 *J. Atmos. Sci.* **59** 590
- [39] Clark R N, Swayze G A, Wise R A, Livo K E, Hoefen T M, Kokaly R F, Sutley S J 2007 USGS Digital Spectral Library splib06a (Reston, VA: U. S. Geological Survey) Data Series 231
- [40] Baldridge A M, Hook S J, Grove C I, Rivera G 2009 *Remote Sens. Environ.* **113** 711
- [41] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B, Mishchenko M 2010 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **111** 529
- [42] Li Z Q, Xu H, Li K T, Li D H, Xie Y S, Li L, Zhang Y, Gu X F, Zhao W, Tian Q J, Deng R R, Su X L, Huang B, Qiao Y L, Cui W Y, Hu Y, Gong C L, Wang Y Q, Wang X F, Wang J P, Du W B, Pan Z Q, Li Z Z, Bu D 2018 *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **99** 739
- [43] Waquet F, Cairns B, Knobelspiesse K, Chowdhary J, Travis L D, Schmid B, Mishchenko M I 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D01206

Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angle dependence and a posteriori error*

Zheng Feng-Xun¹⁾²⁾ Hou Wei-Zhen¹⁾³⁾ Li Zheng-Qiang^{1)3)†}

1) (*State Environment Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*)

(Received 10 September 2018; revised manuscript received 12 November 2018)

Abstract

Data from the directional polarimetric camera (DPC) instrument onboard Chinese Gaofen-5 satellite dedicated to aerosol monitoring have been available recently. By measuring the spectral, angular and polarization properties of the radiance at the top of atmosphere (TOA), a DPC provides the aerosol optical depths (AODs) as well as partial microphysical aerosol properties. In order to evaluate the capability and the retrieval uncertainty of DPC sensor systematically, the information content and a posteriori error analysis are applied to the synthetic data of DPC multi-angle observation in this paper, which inherits from the optimal estimate theoretical framework. The forward simulation is conducted by the unified linearized vector radiative transfer model (UNL-VRM), and the Jacobians of four Stokes elements with respect to aerosol and surface model parameters can be obtained simultaneously. Firstly, the error influences of surface parameter on the TOA measurements are simulated. The results indicate that a 10% relative error of parameter k_1 in the improved BRDF model results in about 4.65% error of the TOA reflectance, while the error of TOA polarized reflectance caused by the same error of parameter C in BPDF model is negligibly small. Secondly, the multi-angle dependence of total information content in DPC measurements is investigated. It is shown that the information content increases significantly with the number of viewing angles, especially for the measurements of the first 9 angles. The DPC multi-angle observation can provide extra 5 degrees of freedom for signal (DFS) for the retrieval of aerosol and surface parameters, in which the retrieval of aerosol parameters is more sensitive to observation geometries than the retrieval of surface parameters in most cases. In addition, the total aerosol DFS increases with the range extension of scattering angle under the same number of viewing angles. After that, the DFS of each retrieved aerosol and surface parameter are given. For the aerosols, the volume concentration, real-part refractive index and effective radius show a high DFS (greater than 0.8). For the surfaces, the mean DFS of each parameter is greater than 0.5, which indicates the well capability of DPC in the surface retrieval. Finally, the a posteriori error of each aerosol, surface parameter and corresponding vary with the number of viewing angles, and the observation error and aerosol model error are discussed. The a posteriori error decrease significantly with the number of viewing angles, and the influence of the aerosol model error on the a posteriori error is not remarkable. In general, the observation error is the main influence factor on the uncertainty of the inversion results.

Keywords: directional polarimetric camera, optimal estimation inversion, information content analysis, a posteriori error

PACS: 07.07.Df, 92.20.Bk, 92.70.Bc, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.68.20181682

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2016YFE0201400), the Science and Technology Service Network Initiative (STS) Project of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. KFJ-STQYZD-022), the Open Fund of State Key Laboratory of Remote Sensing Science, China (Grant No. OFSLRSS201710), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41671367, 41505022, 41871269).

† Corresponding author. E-mail: lizq@radi.ac.cn