

光学学报

基于星载偏振交火模式的气溶胶层高被动遥感 成像反演信息量分析

顾浩然^{1,2}, 李正强^{2,3*}, 侯伟真^{2,3**}, 刘振海⁴, 伽丽丽², 李殷娜^{2,3}, 郑杨², 史正^{2,3}, 许华^{2,3}, 洪津⁴,
麻金继¹, 陈震霆⁵

¹安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241000;

²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;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴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, 安徽 合肥 230031;

⁵昆明学院信息工程学院, 云南 昆明 650214

摘要 为探究高精度偏振扫描仪(POSP)在偏振交火模式下紫外波段对气溶胶层高(ALH)的探测能力,基于最优估计理论和信息量分析方法,分析了紫外和近紫外波段模拟仿真数据对ALH的灵敏度,并进一步讨论了不同观测组合对ALH信息量和后验误差的影响。研究结果表明:拓展的紫外波段是卫星遥感ALH反演的重要信息源,进一步增加380 nm偏振探测后,ALH的信息自由度(DFS)提高了0.06~0.26,同时后验误差降低了5~30个百分点;联合近紫外410 nm探测信息后,ALH反演后验误差额外降低了7~10个百分点,尤其增加了标高 H 较低时ALH的反演信息量;观测信息对标高的敏感度随着卫星观测散射角的增大而逐渐降低;粗模态主导的气溶胶、裸土地表相较于细模态主导的气溶胶、植被地表来说提供的ALH信息量更少。总体来说,虽然ALH信息量受到气溶胶类型影响表现出了一些差异,但是不同气溶胶类型间ALH信息量受地表类型和偏振测量等的影响通常是相似的。

关键词 大气光学; 偏振扫描仪; 气溶胶层高; 偏振遥感; 信息量分析

中图分类号 TP721 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221036

1 引言

气溶胶垂直分布是决定气溶胶如何影响地球能量收支平衡、大气边界层结构、地表空气质量和大气能见度的基本因素。烟雾和尘埃等吸收性气溶胶的垂直分布会影响空气温度分布,从而影响边界层和对流层的大气稳定性^[1]。近年来,近地表颗粒物($PM_{2.5}$)污染也引起了全社会的广泛关注,星载 $PM_{2.5}$ 瞬时遥感方法(PMRS)不依赖于大气化学模式,可以大范围获取近地面 $PM_{2.5}$ 瞬时遥感结果,气溶胶层高(ALH)是驱动PMRS所需的关键参数^[2-3]。此外,利用化学传输模型(CTM)模拟烟羽高度也需要垂直方向上烟雾和灰尘颗粒的排放分布(模拟火灾产生的烟雾气溶胶)^[4]。因此,ALH的估算对遥感和大气模拟研究都具有重要意义。

卫星遥感能够在全局范围内测量气溶胶高度信息。使用主动遥感[如星载激光雷达(CALIOP)]可以

测量每个垂直层的后向散射,从而根据后向散射比得出详细的气溶胶消光系数剖面^[5]。然而,该技术受到雷达空间覆盖范围的限制。相比之下,被动遥感测量虽然不能达到与雷达相同的精度或分辨率,但是利用紫外线(UV)、可见光/近红外(VNIR)和热红外(TIR)波段观测的被动遥感技术可以达到更大的空间覆盖率和更高的时间分辨率以反演ALH^[6]。Chen等^[7]利用信息量分析方法,论证了偏振多角度卫星利用氧气吸收波段被动反演ALH的可能。然而,针对被动遥感反演,利用UV波段来对ALH进行反演的研究相对较少^[8]。

我国目前正在发展自己的偏振卫星传感器。高分五号02星(GF 5-02)于2021年9月7日成功发射,其搭载的高精度偏振扫描仪(POSP)是有效载荷之一,具备近紫外和短波红外的探测优势^[9-10]。与搭载在同一卫星平台的大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)配合可以实现偏振交火(PCF)协同观测,是现阶段气溶

收稿日期: 2022-04-26; 修回日期: 2022-06-28; 录用日期: 2022-08-01; 网络首发日期: 2022-08-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金(41925019)、国家自然科学基金(41871269, 42175148)、云南省地方联合基金(202001BA070001-090)、云南省李正强专家工作站(202205AF150031)

通信作者: *lizq@radi.ac.cn; **houwz@radi.ac.cn

胶遥感综合能力最强的星载探测方案之一^[11]。目前该卫星载荷仍处于在轨测试阶段,迫切需要开展双偏振载荷组合对气溶胶反演能力的定量化评估。

本文基于偏振交火工作模式,通过 DPC 反演获取气溶胶和地表参数。结合 POSP 传感器的观测几何与测量误差,利用线性化矢量辐射传输模式 (UNL-VRTM) 进行前向模拟。通过紫外 (380 nm) 和近紫外波段 (410 nm) 的模拟仿真数据对 ALH 进行了初步的灵敏度研究,并进一步评估了偏振测量对 ALH 反演的影响。对于灵敏度研究,引入了信号自由度 (DFS) 和后验误差两个评价指标。通过假设地表类型、气溶胶模型、先验误差和不同观测几何系统地分析和讨论了 POSP 对 ALH 的探测能力,为后续基于 POSP 的 ALH 反演算法开发提供了理论依据。

2 研究方法

信息量分析方法可以有效获取卫星传感器或地面测量对目标参量的一阶解析值,已被证明可对不同类型传感器的反演能力进行定量化评价,同时为实际的反演提供理论和方法支撑^[12-15]。该方法基于 Rodgers^[16]提出的最优估计 (OE) 理论,2.1 节中简要回顾了该理论,并在 2.2 节中介绍了该方法在本研究中的应用及技术路线。

2.1 最优化估计理论

为了对 POSP 紫外波段 ALH 的反演能力进行系统性定量评价,引入最优化估计理论中的两个评价指标:DFS 和后验误差^[17]。根据最优估计理论,由 n 个待反演参数组成的状态向量 x 与包含 m 个测量值的观测向量 y 的关系可以通过一个简化的前向模型来表达,即

$$y = F(x, b) + \epsilon, \quad (1)$$

式中: b 为非状态向量,包含那些 x 未包含的参数但定量地影响大气层顶 (TOA) 测量; $F(\cdot)$ 为前向模型; ϵ 为由观测噪声和前向模型不确定性综合造成的经验误差项。

平均核矩阵由后验误差对状态参数的偏导数组成,描述了反演结果对真实状态的敏感程度,定义为

$$A = \frac{\partial \hat{x}}{\partial x} = (K^T S_\epsilon^{-1} K + S_a^{-1})^{-1} K^T S_\epsilon^{-1} K, \quad (2)$$

式中: S_a 为先验估计的误差协方差矩阵; K 为雅可比矩阵,表示 $F(x)$ 对于 x 的偏导数,描述了前向模型对状态向量的敏感程度; \hat{x} 为反演推断的估计值; S_ϵ 为包含测量误差和前向模型误差在内的误差协方差矩阵,一般定义为

$$S_\epsilon = S_y + K_b S_b K_b^T, \quad (3)$$

式中: S_y 为传感器测量误差协方差矩阵; S_b 为非状态向量的误差协方差矩阵; K_b 为 y 对于 b 的雅可比矩阵。

归一化矩阵对角元素 $A_{i,i}$ 对应第 i 个状态参数的 DFS, DFS 为 0 表示观测信息不包含该反演参数的任

何信息,参数对应的 DFS 为 1 则表示反演结果完全反映了真实状态。通常情况下,当某个参数的 DFS 大于 0.5 时,可以认为该参数有可能通过观测来反演得到^[18]。

后验误差又被称为理论反演误差,描述了反演结果的不确定性,是由观测误差等所引起的理论上的统计误差。后验误差协方差矩阵可以定义为

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

假设模型不同参数之间不相关,则 S_a 和 S_b 均为对角矩阵,对应参数的后验误差等于 \hat{S} 对角元素的平方根。

2.2 偏振卫星观测与矢量辐射传输模型

对于偏振卫星来说,卫星观测可以通过归一化的 Stokes 矢量描述,定义为

$$I = [I \quad Q \quad U \quad V]^T, \quad (5)$$

式中: I 为总的辐射强度; Q 为平行或垂直于参考平面的线偏振度强度; U 为与参考平面成 45° 角的线偏振度的强度; V 为圆偏振强度。在实际反演中,通常将偏振辐亮度 L_p 或线偏振度 (DOLP) 用于气溶胶反演研究中,可以在一定程度上消除绝对定标的影响。二者的表达式为

$$\begin{cases} L_p = \sqrt{Q^2 + U^2} \\ D_{OLP} = L_p / I \end{cases}. \quad (6)$$

相应地,卫星观测到的表观反射率和表观偏振反射率可以定义为

$$\begin{cases} R^{TOA} = \pi I / \mu_0 \\ R_p^{TOA} = \pi L_p / \mu_0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: μ_0 为太阳天顶角的余弦值。

采用 UNL-VRTM 作为前向模型对卫星观测进行正演模拟。UNL-VRTM 在 VLIDORT (vector linearized discrete ordinate radiative transfer model)^[19] 模型基础上进行开发,耦合了线性化的 Mie 散射 (球形粒子) 和 T-matrix (非球形粒子) 模块^[20], 以及一些易于使用的地表模型,包括双向反射分布函数 (BRDF) 和双向偏振反射分布函数 (BPDF) 等^[21-22]。通过设定观测几何和对应的模型参数能够模拟地基、空基和天基仿真 TOA 所观测条件下归一化的 Stokes 矢量,同时计算出 Stokes 参数 I 、 Q 、 U 和 V 对模型参数的雅可比矩阵信息,即

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial x} & \frac{\partial Q}{\partial x} & \frac{\partial U}{\partial x} & \frac{\partial V}{\partial x} \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

进一步地,线偏振度对状态矢量各分量的雅可比计算公式为

$$\frac{\partial D_{OLP}}{\partial x} = -\frac{D_{OLP}}{I} \frac{\partial I}{\partial x_i} + \frac{Q}{I \sqrt{Q^2 + U^2}} \frac{\partial Q}{\partial x_i} + U \frac{\partial U}{\partial x_i}. \quad (9)$$

UNL-VRTM 提供的雅可比矩阵模拟计算能力也为信息量分析提供了很好的支持。图 1 给出了本研究

中的信息量分析流程。首先,利用 UNL-VRTM 结合 DPC 反演参数与 POSP 观测几何进行前向模拟,计算出相应的偏振量 DOLP,将其与总的辐射强度 I 组成观测向量,并进行 DOLP 关于状态向量 x 的雅可比矩阵

结果计算。然后,结合 POSP 设备的定标误差和参数先验估计误差,利用式(2)和式(4)分别计算不同气溶胶、地表、观测几何条件下 ALH 的信息量和后验误差,并根据结果进行敏感性分析。

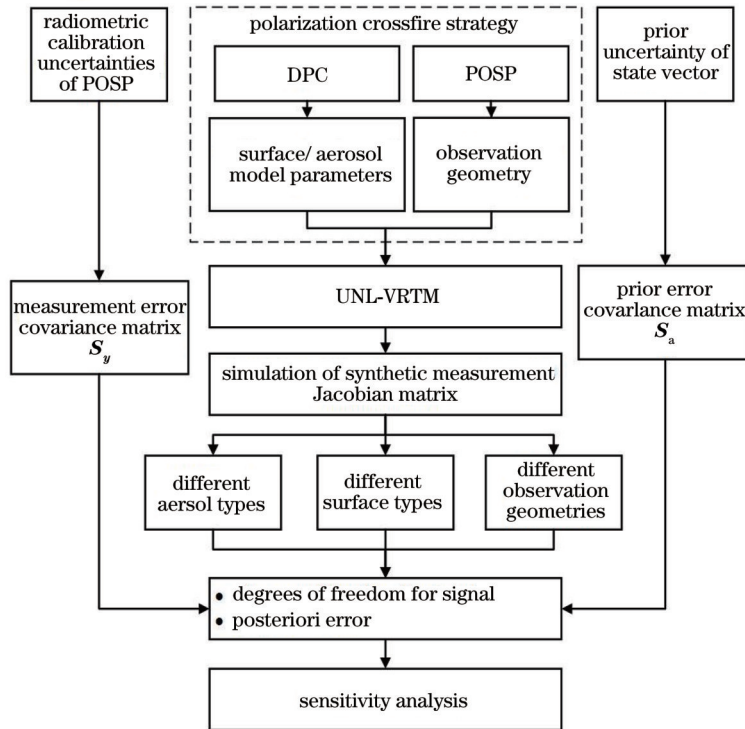


图 1 信息量分析流程

Fig. 1 Flowchart of information content analysis

3 传感器和模拟假设

本研究针对 POSP 进行模拟, POSP 具备近紫外和短波红外的探测能力, 可进行 380 nm 和 410 nm 波段的偏振观测。本章主要描述了偏振交火模式下 POSP 的工作模式与主要参数, 给出了前向模拟所需的基本假设(气溶胶模型、地表模型、先验和观测误差协方差矩阵等)。同时, 为分析偏振测量和波段联合反演在 ALH 反演中的作用, 结合不同观测场景设计了对比方案。

3.1 POSP 传感器特性与观测几何模拟

POSP 是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的一种高精度偏振探测仪, 将其搭载于卫星上进行对地观测, 可获取地表和大气的大角度、多光谱和偏振辐射数据信息^[23-24]。POSP 上配置有星上辐射和偏振定标器, 用于监视辐射定标器衰变的比值辐射计, 通过在轨周期性星上定标, 实现了 POSP 辐射和偏振精度的在轨保持。为与多角度偏振成像仪(DPC)进行偏振交火, 采用穿轨扫描的探测方式, 探测谱段范围覆盖 380~2250 nm^[25]。偏振交火工作模式则是 DPC 和 POSP 在同一个卫星平台上进行的精确组合和匹配, 可以几乎同时覆盖重合的观测区域。该方案基于 DPC 的较高分辨率的原始图像进行几何精度校正, 实

现 POSP 和 DPC 之间的视场匹配处理。然后, 对 DPC 图像进行正弦投影和多角度匹配, 将 POSP 几何校正数据投影到与 DPC 相同的网格上。通过这种方式将生成 PCF 的数据集与 DPC 单独测量相比, 将联合偏振测量扩展到紫外与近紫外波段, 通道中心位于 380 nm 和 410 nm, 以便用于 ALH 反演。两个偏振载荷的参数设置如表 1 所示, 其中 POSP 的 VNIR 和短波红外(SWIR)通道辐射强度测量的相对不确定性不同, 分别为 5% 与 6%^[26-28]。

为了分析 ALH 信息量对观测几何的依赖性, 结合 POSP 视场角($-50^{\circ} \sim 50^{\circ}$)的单角度观测模式, 模拟出两组典型的观测几何(太阳天顶角 θ_0 分别为 40° 和 60°), 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, 如图 2(a)所示。不同的半径对应观测天顶角 θ_v 从 0° 变化至 60° , 以 20° 为步长。圆圈则表示对应的方位角 ϕ 从 0° 变化至 360° 。太阳位置的方位角为 0° , $\phi=0^{\circ}$ 时也表示观察者和太阳在同一方向, 在主平面的同一侧, $\phi=180^{\circ}$ 则表示其在主平面的相反方向和侧面。相应地, 图 2(b)根据观测几何绘制了散射角 Θ , 散射角范围覆盖 $90^{\circ} \sim 140^{\circ}$, 以 5° 为步长。

3.2 模拟假设

除传感器配置外, UNL-VRTM 中还需要输入大

表 1 传感器的基本参数
Table 1 Basic parameters of sensors

Equipment parameter	DPC	POSP
Central wavelength	443 nm, 490 nm, 565 nm, 670 nm, 763 nm, 765 nm, 865 nm, 910 nm	380 nm, 410 nm, 443 nm, 490 nm, 670 nm, 865 nm, 1380 nm, 1610 nm, 2250 nm
Elements of Stokes vector	I, Q, U	I, Q, U
Instrument FOV	$(\pm 50^\circ) \times (\pm 50^\circ)$	$-50^\circ-50^\circ$
Polarization calculation error	0.020	0.005
Radiance calculation error	5%	5% (VNIR), 6% (SWIR)
Number of viewing angles	15	1

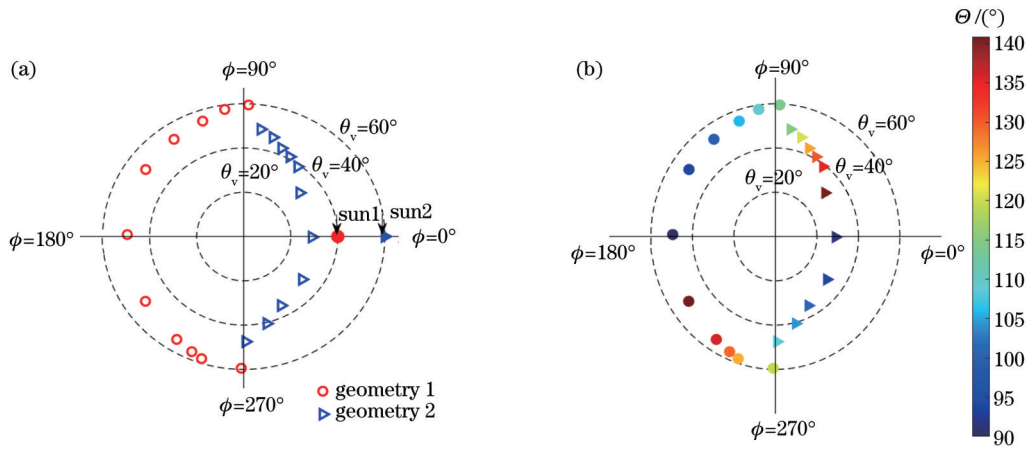


图 2 研究采用的 PSOP 观测几何。(a) 观测几何；(b) 散射角分布

Fig. 2 PSOP observation geometry used in research. (a) Observation geometry; (b) scattering angle distribution

气预处理文件、气溶胶特性和地表反射率等,用以模拟 TOA 归一化的 Stokes 矢量。3.2.1~3.2.3 节分别描述了研究所使用的气溶胶模型、ALH 和地表模型,并在 3.2.4 节描述了将模拟应用于 ALH 信息量分析时,相应的先验误差和观测误差协方差矩阵。

3.2.1 气溶胶模型

卫星观测中大气的信息主要来自于气体分子、水汽、云和气溶胶的散射和吸收,其中气溶胶的散射和吸收与气溶胶微物理特性直接相关。与 Hou 等^[13]研究类似,在模拟中使用了代表城市污染型气溶胶(细模态主导)和沙尘型气溶胶(粗模态主导)两个典型气溶胶模型,以测试气溶胶类型对 ALH 信息量的影响。为方便描述,下文分别以上标 f 和 c 区分气溶胶细模态和粗模态。采用双峰对数正态分布来描述基于球形粒子假设的气溶胶尺度分布,函数形式为

$$\frac{dZ}{d\ln r} = \sum_{i=1}^2 \frac{Z^{(i)}}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g^{(i)}} \exp\left[-\frac{\ln r - \ln r_v}{2\ln^2 \sigma_g^{(i)}}\right], \quad (10)$$

式中: i 为气溶胶模态, $i=1$ 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; Z 为气溶胶总体积柱浓度; r 为气溶胶粒子半径。因此,本研究采用有效半径 r_{eff} 和有效方差 v_{eff} 代替式(10)中的 r_v 和 σ_g 作为 UNL-VRTM 前向模拟的输入参数,二者的转化关系为

$$\begin{cases} r_{\text{eff}} = r_v \exp\left(-\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_g\right) \\ v_{\text{eff}} = \exp(\ln^2 \sigma_g) - 1 \end{cases} \quad (11)$$

相应地,气溶胶总体积柱浓度 V_0 (单位为 $\mu\text{m}^3 \cdot \mu\text{m}^{-2}$)和细模态柱体积比 F_{MFV} 可定义为

$$\begin{cases} V_0 = V_0^f + V_0^c \\ F_{\text{MFV}} = V_0^f / V_0^c \end{cases} \quad (12)$$

复折射指数是描述气溶胶粒子对光的吸收和散射作用的参数,为复数形式。实部可表示气溶胶粒子对光的散射作用,虚部可表示气溶胶粒子对光的吸收作用。相应地,波长 λ 处的气溶胶光学厚度(AOD)^[29]可以表示为

$$\tau_a(\lambda) = \tau_a^f(\lambda) + \tau_a^c(\lambda) = \frac{3V_0^f}{4r_{\text{eff}}^f} Q_{\text{ext}}^f(\lambda) + \frac{3V_0^c}{4r_{\text{eff}}^c} Q_{\text{ext}}^c(\lambda), \quad (13)$$

式中: Q_{ext} 为消光效率因子; τ_a^f 和 τ_a^c 分别为细模式 AOD 和粗模式 AOD。相应地, 光学细粒子比 FMF 可以表示为

$$F_{\text{MF}}(\lambda) = \tau_a^f(\lambda) / \tau_a^c(\lambda). \quad (14)$$

表 2 和图 3 中分别给出了前向模拟所使用的气溶胶微物理参数和不同气溶胶类型的体积谱分布曲线。其中, m_r 和 m_i 分别为气溶胶复折射指数的实部和虚部。这些参数是根据 Ge 等^[30] 的研究, 由多角度偏振传感器 DPC 反演获取的。

表 2 气溶胶模型参数

Table 2 Aerosol model parameters

Scenario	m_r (550 nm)	m_i (550 nm)	$r_{\text{eff}} /$ μm	v_{eff}	F_{MFV}
Fine-dominated	0.549	0.003	0.21	0.5036	0.8
Coarse-dominated	1.434	0.011	1.90	0.1915	0.2

在输入这些气溶胶微物理参数后, 利用 Mie 散射代码模拟得到对应的散射相函数矩阵, 即

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ P_{21} & P_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} \\ 0 & 0 & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中: $P_{12} = P_{21}$; $P_{34} = P_{43}$; P_{11} 描述了强度的变化关系, 即散射的强度相函数; P_{12} 描述了偏振状态的变化, 即偏

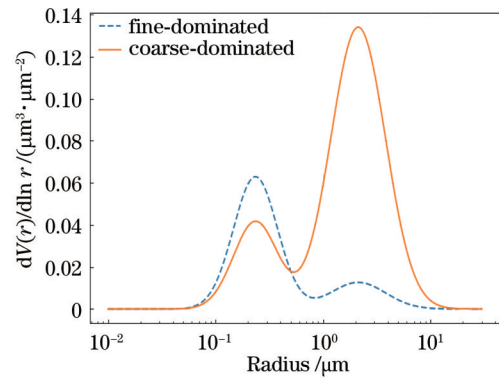


图 3 气溶胶体积谱分布

Fig. 3 Aerosol volume size distribution

振散射相函数。散射相函数如图 4 所示, 描述了两种模式气溶胶的气溶胶散射相函数曲线随散射角的变化。图 4(a) 和图 4(b) 表明: 粗模式在较大散射角 ($\phi > 140^\circ$) 和较小散射角 ($\phi < 30^\circ$) 时表现出较强的散射特性; 当散射角处于 $30^\circ \sim 140^\circ$ 时, 粗模式和细模式的散射强度基本相当。图 4(c) 和图 4(d) 表明, 细模式气溶胶的偏振相函数贡献集中在 $10^\circ \sim 90^\circ$ 之间, 且高于粗模式。出现该现象的原因是受到不同模式下气溶胶粒子散射特性的影响和不同散射角下卫星观测对 ALH 的敏感度不同。

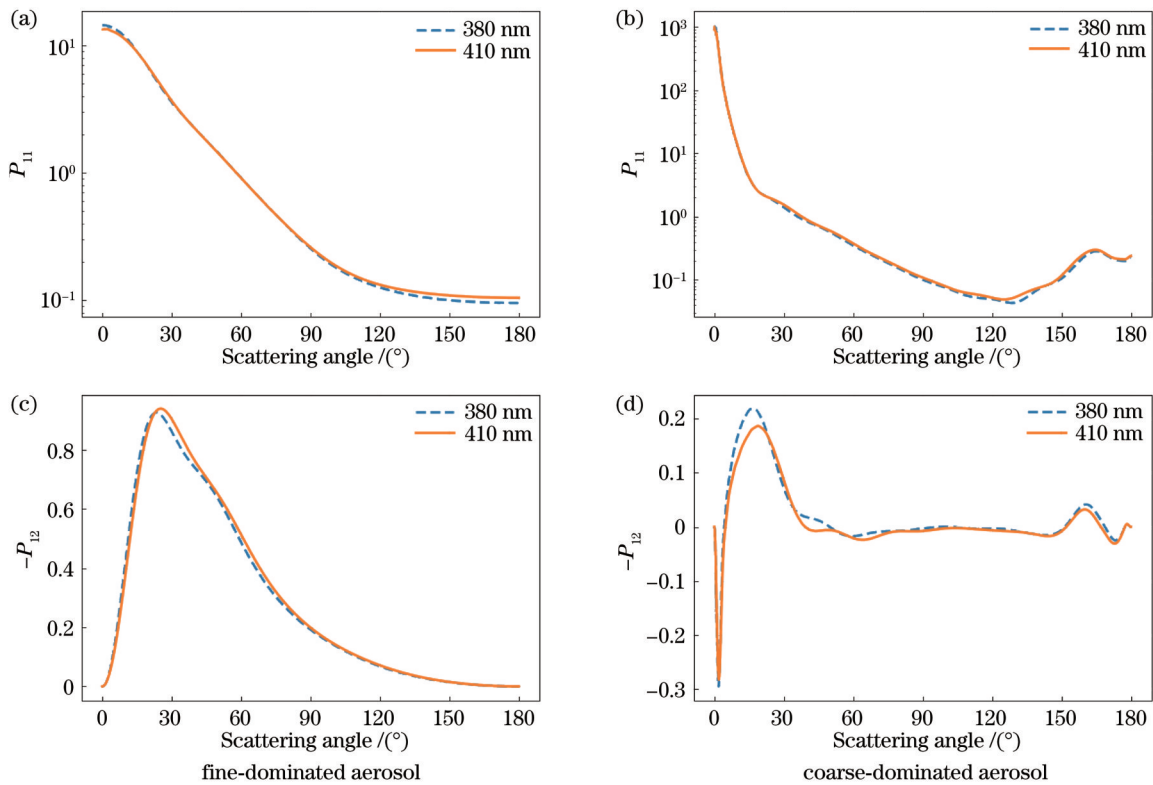


图 4 散射相函数和偏振散射相函数随散射角的变化。(a)(b) 散射相函数; (c)(d) 偏振散射相函数

Fig. 4 Scattering phase function and polarized scattering phase function varying with scattering angle. (a)(b) Scattering phase function; (c)(d) polarized scattering phase function

3.2.2 标高模型

在模拟中,假设气溶胶消光垂直剖面遵循指数递减函数,可以描述为

$$\int_{T_{OA}}^z \tau(z) dz = \tau_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad (16)$$

式中: τ_0 为柱状气溶胶光学厚度; H 为气溶胶标高参数; z 为太阳光传输的物理路径; T_{OA} 为大气层顶高度。在本研究中仅选择气溶胶标高参数 H 作为反演参量,并将其他气溶胶模型相关参数(V_0^f 、 V_0^c 等)视为非状态参量。

3.2.3 地表模型

由于ALH信息受到下垫面反射率的严重影响,故考虑表面反射率和偏振的真实表示是十分重要的。许多研究表明^[31-32],表面反射率的偏振分量在数量上很少,但相当重要。本研究采用UNL-VRTM中耦合的地表反射率的内核驱动BRDF模型,可以描述为

$$\rho_s(\mu_0, \mu_v, \phi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) \left[1 + k_1 f_{geom}(\mu_0, \mu_v, \phi) + k_2 f_{vol}(\mu_0, \mu_v, \phi) \right], \quad (17)$$

式中: μ_v 为观测天顶角的余弦值;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 为两个与波长 λ 无关的权重系数,描述了地表反射率的各向异性。

对于地表偏振反射,本研究采用的是基于归一化植被指数(NDVI, I_{NDV})的BPDF模型,可以描述为

$$R_p^s(\mu_0, \mu_v, \phi) = \frac{C \exp(-\tan \gamma) \exp(-I_{NDV})}{4(\mu_0 + \mu_v)} F_{1,2}(\gamma, n_i), \quad (18)$$

式中: $F_{1,2}(\gamma, n_i)$ 为非涅耳矩阵的偏振分量; n_i 为地表的复折射指数; γ 为与观测几何有关的镜面反射角; C 为唯一的自由参数^[31]。在本研究中,植被地表的BRDF和BPDF参数根据Hou等^[13]的研究,基于DPC的BRDF结果利用光谱重建方法获得^[33-34],这里不再进行进一步讨论。具体参数如表3所示。

之前的研究表明,裸土比植被具有更强的偏振信号,这导致对TOA而言,DOLP的贡献度更大^[35]。为了比较不同地表类型对ALH信息量的影响,在考虑偏振地表的情况下,分别在裸土和植被地表上进行了前向模拟。在植被地表下,380 nm波段地表反射率和偏振地表反射率随观测几何角度的变化如图5所示。

表3 地表模型参数

Table 3 Surface model parameters

Surface type	$f_{iso}(\lambda)$	k_1	k_2	C	I_{NDV}
Vegetation	0.0186 (380 nm), 0.0190 (410 nm)	0.158	0.547	6.57	0.62
Bare soil	0.0293 (380 nm), 0.0313 (410 nm)	0.087	0.668	6.90	0.03

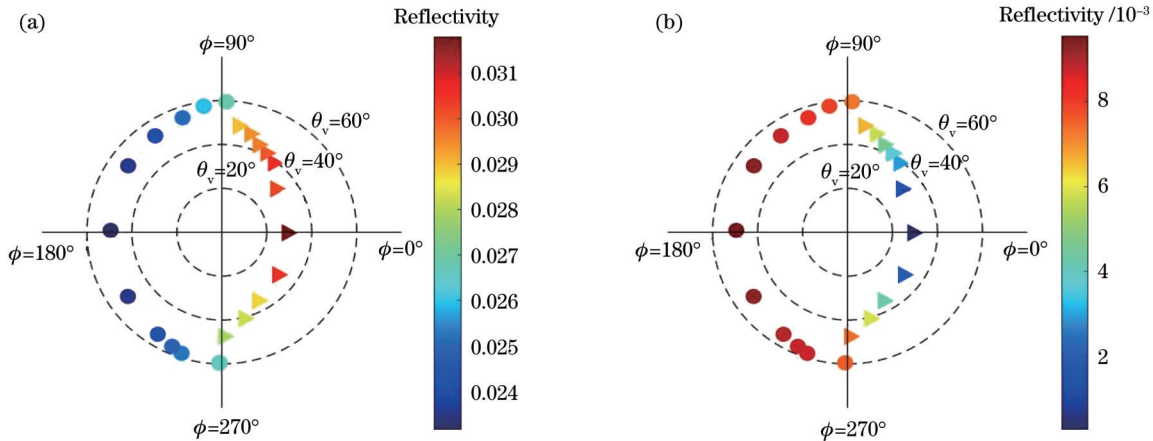


图5 地表模拟结果随观测几何角度变化。(a) BRDF;(b) BPDF

Fig. 5 Surface simulation results varying with observation geometry angle. (a) BRDF; (b) BPDF

3.2.4 协方差矩阵

如第2章所述,利用UNL-VRTM模拟了卫星观测几何下ALH的反演。分别用下标 λ_1 、 λ_2 表示对应的波段(380 nm、410 nm),则POSP偏振观测下的测量 y 可以定义为

$$y = [I_{\lambda_1} \quad I_{\lambda_2} \quad D_{OLP, \lambda_1} \quad D_{OLP, \lambda_2}]^T. \quad (19)$$

对于紫外和近紫外波段的ALH信息量分析,状态

向量仅包含气溶胶标高参数 H ,即

$$x = [H]^T. \quad (20)$$

气溶胶参数和地表反射率均通过DPC观测利用反演算法获取,非状态向量可以描述为

$$b = [V_0^f \quad V_0^c \quad \rho_s(\lambda_1) \quad \rho_s(\lambda_2)]^T, \quad (21)$$

式中: $\rho_s(\lambda_1)$ 和 $\rho_s(\lambda_2)$ 分别代表380 nm波段和410 nm波段处BRDF反射率值。相应地,状态与非状态向量

的雅可比矩阵为

$$K = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{\lambda_1}}{\partial H} & \frac{\partial I_{\lambda_2}}{\partial H} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_1}}{\partial H} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_2}}{\partial H} \end{bmatrix}^T, \quad (22)$$

$$K_b = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{\lambda_1}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial I_{\lambda_1}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial I_{\lambda_1}}{\partial \rho_s(\lambda_1)} & \frac{\partial I_{\lambda_1}}{\partial \rho_s(\lambda_2)} \\ \frac{\partial I_{\lambda_2}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial I_{\lambda_2}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial I_{\lambda_2}}{\partial \rho_s(\lambda_1)} & \frac{\partial I_{\lambda_2}}{\partial \rho_s(\lambda_2)} \\ \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_1}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_1}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_1}}{\partial \rho_s(\lambda_1)} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_1}}{\partial \rho_s(\lambda_2)} \\ \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_2}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_2}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_2}}{\partial \rho_s(\lambda_1)} & \frac{\partial D_{\text{OLP},\lambda_2}}{\partial \rho_s(\lambda_2)} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

此处默认 I_{λ_1} 和 D_{OLP,λ_1} 与 $\rho_s(\lambda_2)$ 不相关,故偏导为 0,而 I_{λ_2} 和 D_{OLP,λ_2} 与 $\rho_s(\lambda_1)$ 的情况类似。将先验误差协方差矩阵设置为 1.5 km,即

$$S_a = [\sigma_H^2], \quad (24)$$

式中: σ_H 为标高参数 H 先验值的协方差。

通过 DPC 反演获取的非状态向量会存在一定的误差,研究假设粗模态体积柱浓度 V_0^c 和细模态体积柱浓度 V_0^f 的先验误差为 20%,地表模型先验误差为 100%,对应协方差矩阵 S_b 为

$$S_b = \text{diag}\left(\left[\begin{array}{cccc} [\Delta V_0^f]^2 & [\Delta V_0^c]^2 & [\Delta \rho_s(\lambda_1)]^2 & [\Delta \rho_s(\lambda_2)]^2 \end{array}\right]\right), \quad (25)$$

式中: $\Delta \rho_s(\lambda_1)$ 为 380 nm 波段 BRDF 反射率参数的误差; $\Delta \rho_s(\lambda_2)$ 为 410 nm 波段 BRDF 反射率参数的误差; ΔV_0^c 为粗模态体积柱浓度参数误差; ΔV_0^f 为细模态体积柱浓度误差; $\text{diag}(\cdot)$ 为一个构造对角矩阵的函数。

作为观测误差的一部分,卫星测量误差包括仪器观测过程中的系统误差和随机误差。经过实验室定标后,对于 POSP 辐射强度测量的相对不确定性在 VNIR 波段中不大于 5%,这里按照上限 5% 设定,即 $\epsilon/I = 0.05$,其中 ϵ 为绝对误差,将偏振测量的绝对误

差定为 0.005。如果忽略不同通道 (380 nm 波段和 410 nm 波段) 之间的相关性和辐射与偏振测量之间的相关性,POSP 的测量误差 S_{y_0} 可以被定义为对角矩阵,即

$$S_{y_0} = \text{diag}\left(\left[\begin{array}{cccc} (\Delta I_{\lambda_1})^2 & (\Delta I_{\lambda_2})^2 & (\Delta D_{\text{OLP},\lambda_1})^2 & (\Delta D_{\text{OLP},\lambda_2})^2 \end{array}\right]\right). \quad (26)$$

然而,结合 POSP 的工作模式和 ALH 反演的实际情况,应该将 380 nm 波段和 410 nm 波段测量信息之间的相关性也考虑在内。结合实际观测统计数据, $y_1 \sim y_4$ 分别代表了 380 nm 波段和 410 nm 波段辐射和偏振测量,其相关系数如表 4 所示。

表 4 380 nm 波段和 410 nm 波段 POSP 观测测量相关性

Table 4 POSP observable correlation in 380 nm and 410 nm

Observable	y_1	y_2	y_3	y_4
y_1 (radiance at 380 nm)	1.00	0.99	0.27	0.23
y_2 (radiance at 410 nm)	0.99 (c_1)	1.00	0.23	0.18
y_3 (polarization at 380 nm)	0.27 (c_2)	0.23 (c_4)	1.00	0.99
y_4 (polarization at 410 nm)	0.23 (c_3)	0.18 (c_5)	0.99 (c_6)	1.00

因此,考虑以上相关性系数矩阵 c , $c_1 \sim c_6$ 分别为不同测量之间的相关系数, $\epsilon_1 \sim \epsilon_4$ 分别为两个波段的强度和偏振测量误差 (ΔI_{λ_1} 、 ΔI_{λ_2} 、 $\Delta D_{\text{OLP},\lambda_1}$ 和 $\Delta D_{\text{OLP},\lambda_2}$)。由此可以得到实际上观测误差协方差矩阵 S_y 的定义为

$$S_y = \begin{bmatrix} \epsilon_1^2 & c_1 \epsilon_1 \epsilon_2 & c_2 \epsilon_1 \epsilon_3 & c_3 \epsilon_1 \epsilon_4 \\ c_1 \epsilon_1 \epsilon_2 & \epsilon_2^2 & c_4 \epsilon_2 \epsilon_3 & c_5 \epsilon_2 \epsilon_4 \\ c_2 \epsilon_1 \epsilon_3 & c_4 \epsilon_2 \epsilon_3 & \epsilon_3^2 & c_6 \epsilon_3 \epsilon_4 \\ c_3 \epsilon_1 \epsilon_4 & c_5 \epsilon_2 \epsilon_4 & c_6 \epsilon_3 \epsilon_4 & \epsilon_4^2 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

3.3 实验场景

基于上述 POSP 传感器特性和模拟假设,在 UNL-VRM 中对紫外和近紫外波段不同观测几何下的强度和偏振观测进行模拟,得到的仿真结果和雅可比结果如图 6 和图 7 所示。

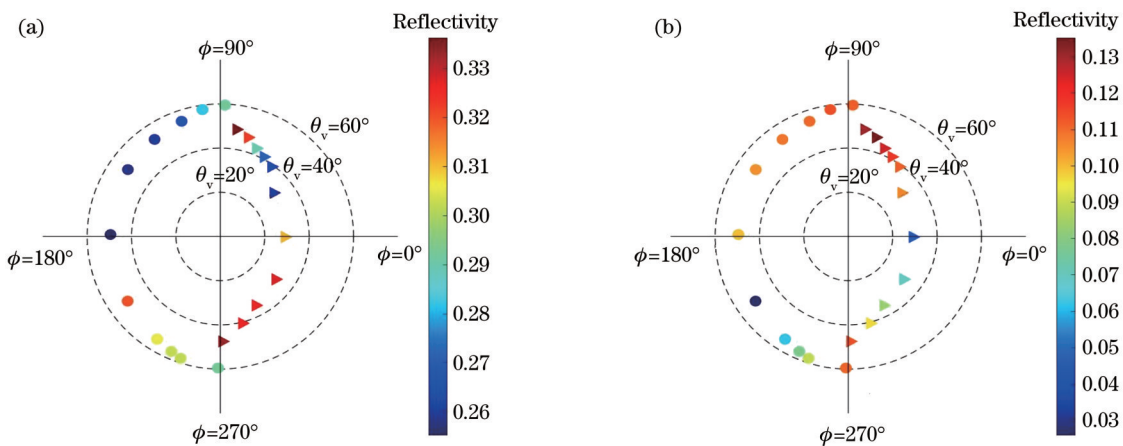


图 6 仿真结果随观测几何角度变化。(a) 表观反射率; (b) 表观偏振反射率

Fig. 6 Simulation result varying with observation geometry angle. (a) Apparent reflectivity; (b) apparent polarized reflectivity

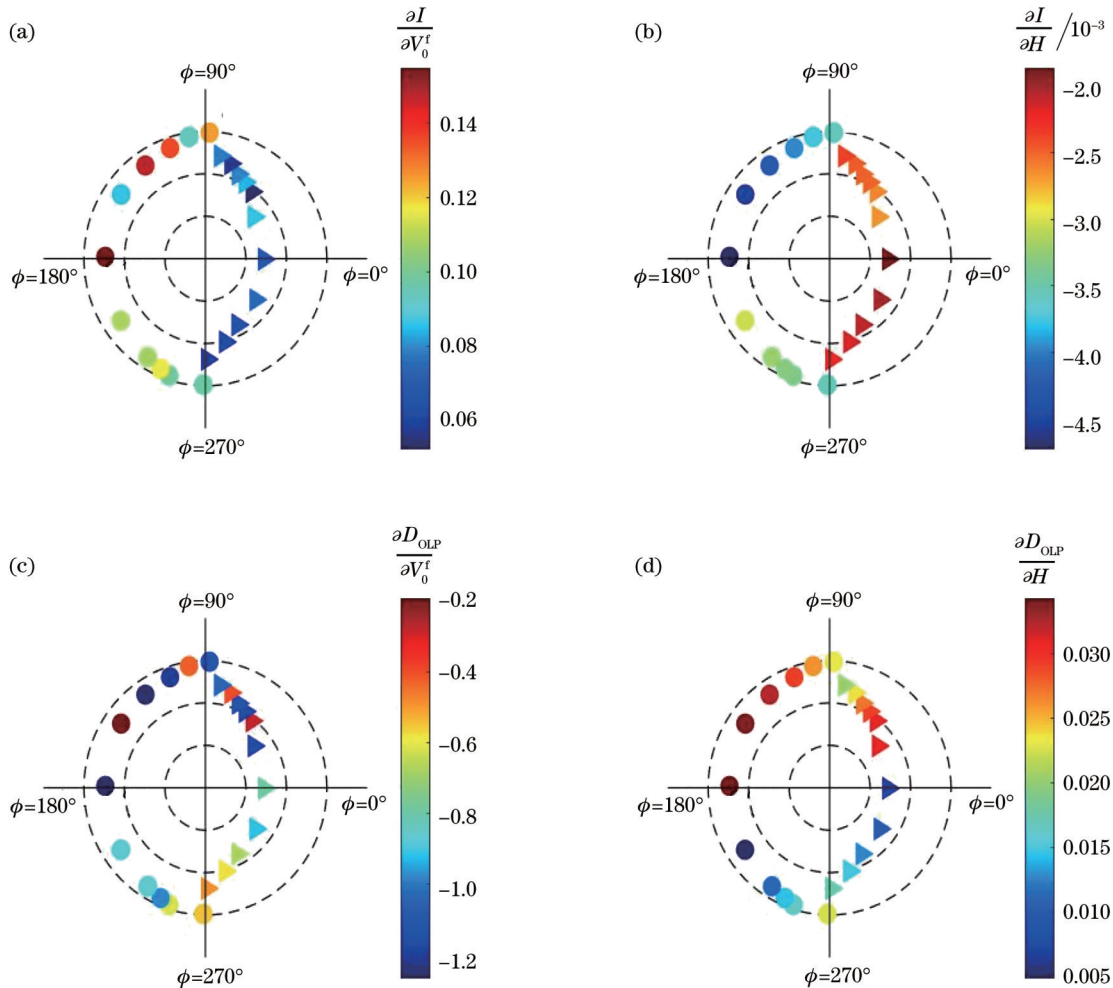


图 7 雅可比结果随观测几何角度的变化。(a) $\frac{\partial I}{\partial V_0^t}$; (b) $\frac{\partial I}{\partial H}$; (c) $\frac{\partial D_{OLP}}{\partial V_0^t}$; (d) $\frac{\partial D_{OLP}}{\partial H}$

Fig. 7 Jacobian result varying with observation geometry angle. (a) $\frac{\partial I}{\partial V_0^t}$; (b) $\frac{\partial I}{\partial H}$; (c) $\frac{\partial D_{OLP}}{\partial V_0^t}$; (d) $\frac{\partial D_{OLP}}{\partial H}$

为了比较偏振测量与波段联合反演在 ALH 反演中的作用,本研究定义了 6 种不同场景,如表 5 所示。

表 5 数值模拟方案

Table 5 Numerical simulation schemes

Scheme	380-nm radiance	380-nm polarization	410-nm radiance	410-nm polarization
A-I	✓	✗	✗	✗
A-IP	✓	✓	✗	✗
V-I	✗	✗	✓	✗
V-IP	✗	✗	✓	✓
AV-I	✓	✗	✓	✗
AV-IP	✓	✓	✓	✓

方案 A-I(或 V-I)仅包括 380 nm 波段(或 410 nm 波段)的强度测量,而 A-IP(或 V-IP)表示包括 380 nm 波段(或 410 nm 波段)的强度和线偏振度(DOLP)测量。类似地,方案 AV-I 包括 380 nm 和 410 nm 波段的强度测量,方案 AV-IP 则包括了两个波段的所有测量。以上 6 种方案对应了偏振交火模式下 POSP 载荷在紫外和近紫外波段探测气溶胶标高的所有观测方

案。因此,方案 A-I 和 AV-IP 就分别代表了紫外波段纯强度观测与联合偏振多波段观测结果。对于每种情况,计算不同观测几何下 ALH 的 DFS 和后验误差。在接下来的分析中,先在 4.1 节中分析以上不同方案中强度和偏振观测所包含的信息量。此外,在 4.2 节中通过比较不同情况下的 ALH 后验误差,进一步分析每种类型(偏振测量、多波段联合等)对 ALH 反演的影

响,如可以通过比较方案 A-I 和 A-IP 之间的反演误差来分析 380 nm 波段偏振测量对 ALH 反演的影响。同样地,紫外与近紫外波段联合反演的影响可以从方案 A-I、AV-I 和 AV-IP 之间的差异中得出。

4 结果与分析

4.1 信息量对比分析

4.1.1 ALH 信息量对观测几何的依赖性

根据 Ding 等^[36]的研究,气溶胶散射对 ALH 反演有着重要的影响。然而,事实上瑞利散射和气溶胶散射都取决于卫星观测几何所决定的散射角大小。因此,TOA 测量对 H 值的灵敏度会随着观测几何的变化

而变化。先分析了太阳天顶角 $\theta_0=40^\circ$ 下,观测信息对 H 的敏感度(由雅可比结果量化)与散射角的变化关系,如图 8(a)、(b)所示。可以发现,随着散射角度的增大,相应的灵敏度逐渐降低。换句话说,卫星观测几何的散射角越小,强度观测值 I 对 H 的敏感度越高。结合图 8(c)、(d)可知,虽然不同观测角度下灵敏度值仍受到气溶胶类型、AOD 和 H 值的影响,但是敏感度随散射角的变化趋势保持不变,这一点与 Chen 等^[7]的研究一致。为进一步探究 POSP 对 ALH 的反演能力,后续分析和图表仅针对一个固定的观测几何($\theta_0=40^\circ$ 和 $\Theta=90^\circ$ 情况下)。

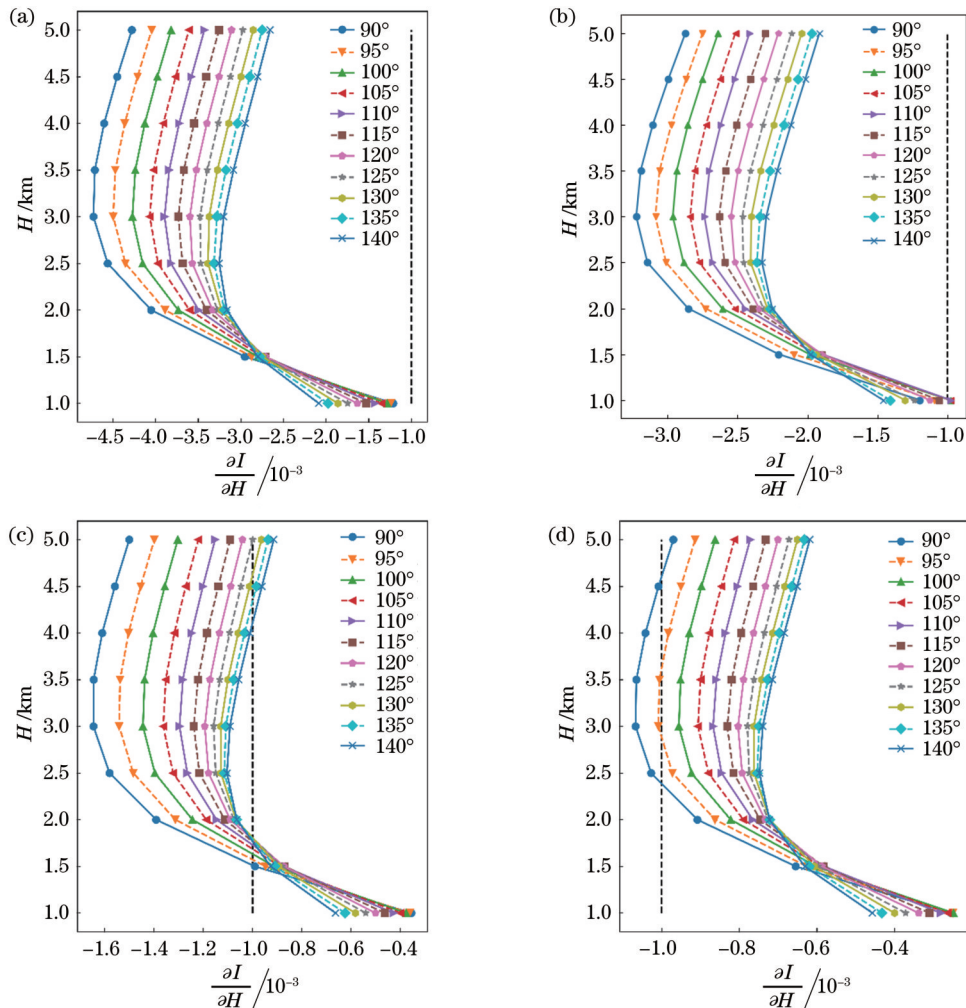


图 8 不同观测几何下植被表面上强度观测雅可比结果随 H 变化的示意图。(a) 细模式主导下的 AOD 为 0.8; (b) 粗模式主导下的 AOD 为 0.8; (c) 细模式主导下的 AOD 为 0.2; (d) 粗模式主导下的 AOD 为 0.2

Fig. 8 Jacobian result of vegetation surface intensity observation varying with H under different observation geometries. (a) Fine-dominated AOD of 0.8; (b) coarse-dominated AOD of 0.8; (c) fine-dominated AOD of 0.2; (d) coarse-dominated AOD of 0.2

4.1.2 ALH 信息量受气溶胶和地表类型的影响

为比较不同气溶胶和地表反射率条件对 ALH 反演的作用,研究选取方案 A-I 与方案 AV-IP,即对比了 380 nm 波段仅包含强度信息和同时包含两个波段所有测量信息两种情况。表 6 总结了这两个方案在不同

条件下 ALH 的 DFS,此时 AOD 为 0.8(550 nm)、 H 为 3 km。

研究发现:在假设气溶胶和地表参数已知(存在一定误差)的情况下,除了在沙尘型气溶胶裸土地表上纯强度观测 DFS 较低(0.45)外,其余几种气溶胶和地表

表 6 A-I 与 AV-IP 方案下参数 H 的 DFS
Table 6 DFS of H at A-I and AV-IP schemes

Surface type	Aerosol scenario	A-I	AV-IP
Bare soil	Fine-dominated	0.60	0.81
	Coarse-dominated	0.45	0.79
Vegetation	Fine-dominated	0.71	0.83
	Coarse-dominated	0.60	0.80

条件下, A-I 和 AV-IP 两种方案的测量值都具有较多的 ALH 信息量, 其 DFS 值均不低于 0.6; 在裸土地表上, H 的 DFS 相较 A-I 方案下植被地表下降了 0.11~0.15, 这是因为 $H=3$ km 时裸土地表在 380 nm 波段下的强度雅可比结果低于植被地表, 对 ALH 信息相对不敏感。

由 UNL-VRTM 模拟的观测值 $[I \ D_{OLP}]^T$ 相对于 ALH 参数 H 的雅可比结果如图 9 所示。其中, F-AOD 代表细模态主导下的气溶胶光学厚度, C-AOD 代表粗模态下气溶胶光学厚度。由图 9(d) 可以看出, 在 410 nm 波段裸土地表条件下 DOLP 对参数 H 的敏感性并不是最低的, 但这种改善仅仅减少了在 AV-IP 方案下植被和裸土地表之间的信息量差异。即使 AV-IP 方案联合了 410 nm 波段的测量信息, 参数 H 在裸土地表上的 DFS 仍然低于植被地表。一般来说, 地表反射率对 A-I 和 AV-IP 情况下 ALH 信息量的影响大于气溶胶光学模型, 这也是引起裸土地表上信息量较少的主要原因。

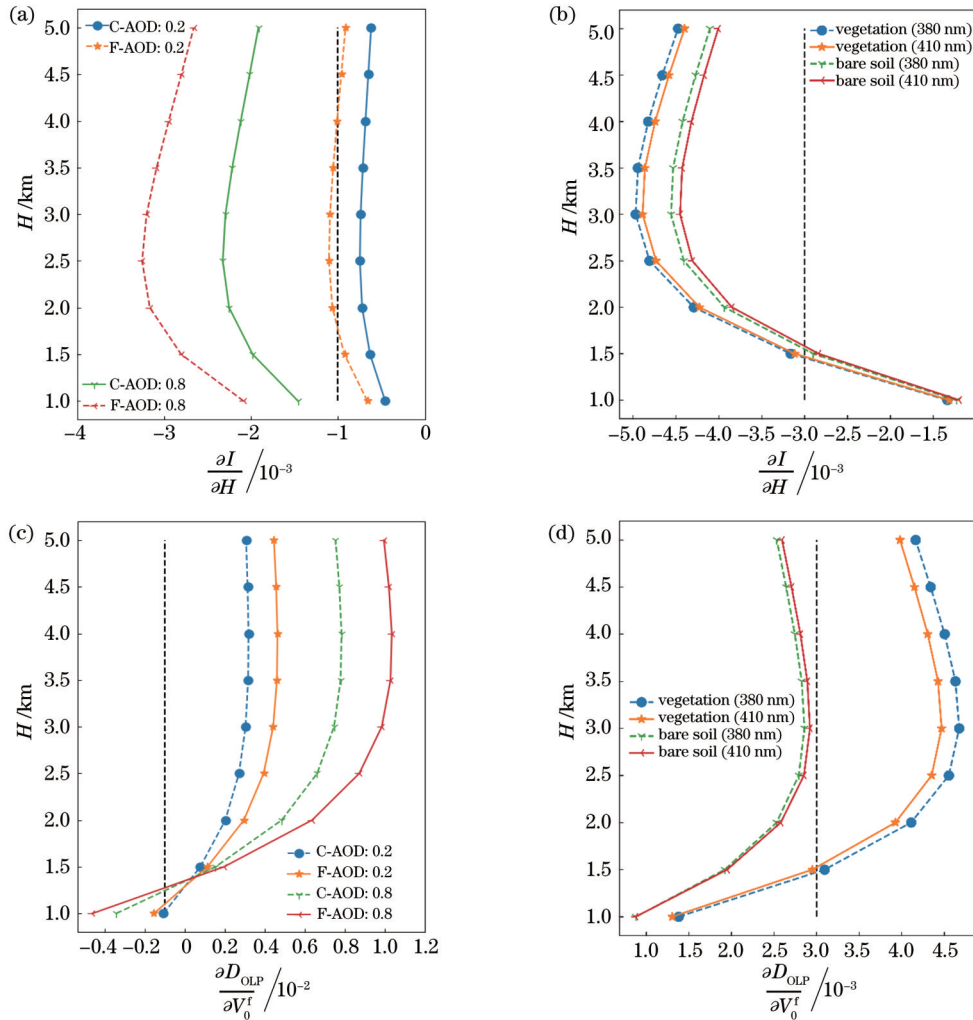


图 9 不同气溶胶与植被地表条件下雅可比模拟结果。(a)(c)不同气溶胶条件;(b)(d)不同地表条件

Fig. 9 Jacobi simulation results under different aerosol and vegetation surface conditions. (a)(c) Different aerosol conditions; (b)(d) different surface conditions

气溶胶条件对 ALH 信息量的影响如图 10 所示。无论何种气溶胶条件下, 植被地表上由 A-I 和 AV-IP 两种测量方案造成的 DFS 差异均小于裸土地表, 如图 10(b) 所示。相比之下, 裸土地表上 AOD 引起的 DFS 差异较大, 最高达到了 0.63。当 AOD 由 0.2 增加至 0.8 时, 两种测量方案的 DFS 差异减小, AOD 为 0.8 时 DFS

的差异最小但仍高于 0.1, 如图 10(a) 所示。由图 10 可知, 裸土地表上由 AOD 变化造成的 DFS 差异相对较大。图 10 中折线对应太阳天顶角为 40° 时 ALH 的 DFS, 阴影区域显示了太阳天顶角从 40° 变化到 60° 时的 DFS 范围。随着太阳天顶角的变化, 不同光程长度导致的 DFS 差异在裸土地表上要大于植被地表, 且均小于

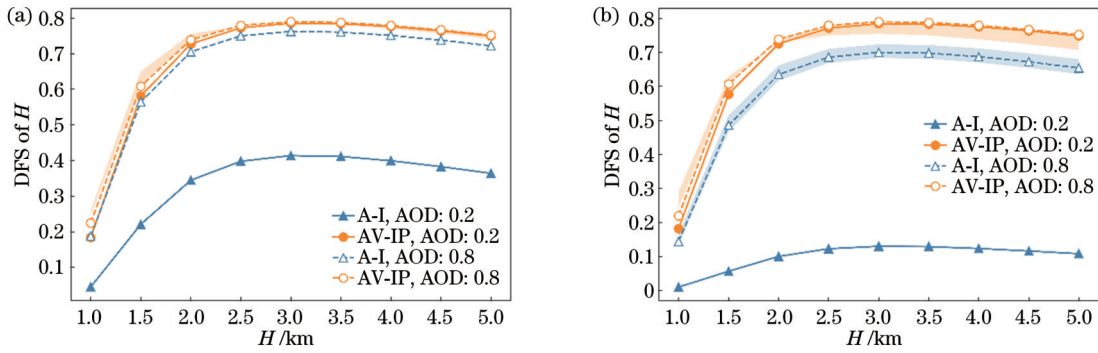


图 10 不同地表条件下的信息量结果分析。(a)植被地表;(b)裸土地表

Fig. 10 Analysis of information content results under different surface conditions. (a) Vegetation; (b) bare soil

0.1。此处只显示了细模态主导的气溶胶结果,粗模态主导气溶胶类型结果相似但值较小,故不再显示。

4.1.3 ALH信息量受偏振观测与多波段联合反演的影响

根据表5中所列出的6种实验场景,以及与表6相同的观测几何、气溶胶模型和地表模型参数设置,图11采用直方图的形式展示了6种场景ALH的DFS。

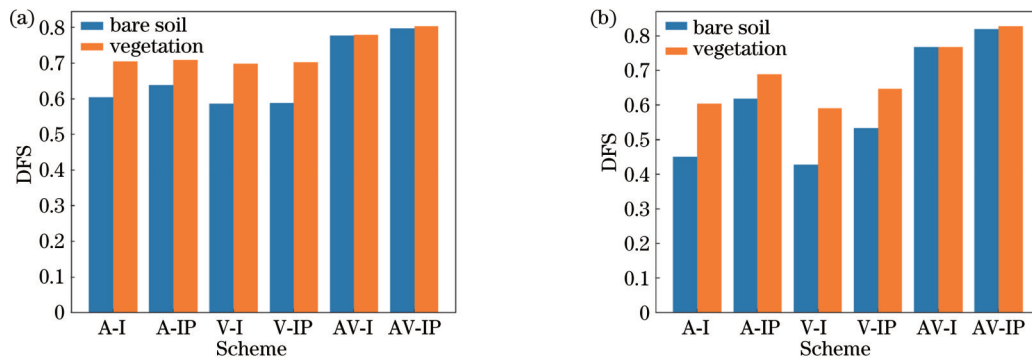


图 11 不同场景下 ALH 信息量。(a)细模态主导;(b)粗模态主导

Fig. 11 ALH information under different scenarios. (a) Fine-dominated; (b) coarse-dominated

4.2 后验误差分析

4.1节分析了假设条件下,POSP传感器通过强度与偏振观测反演ALH参数的潜在能力。本节将在相同先验误差情况下分析不同场景下的后验误差,以进一步分析每种类型(偏振测量、多波段联合)对ALH参数反演的影响程度。为方便比较,本研究将后验误差描述为其与状态向量中标高参数 H 真实值的百分比,与3.2.4节中讨论的先验误差协方差矩阵中假定的百分比先验误差类似。

4.2.1 气溶胶模型参数对ALH后验误差的影响

图12采用盒须图的形式给出了标高参数 H 后验误差随气溶胶模型参数(AOD、 H)的变化情况,每个盒子代表AOD从0.1变化至1.0时的后验误差范围。其中,数据中值(盒中实线)、最大值(须顶)和最小值(须底)对应的三个AOD与图12(c)、(d)中显示的折线相对应。在相同的先验误差情况下,较小的后验误差对应较大的观测信息量(DFS)。总体上来看,由图

总体上来看,对于纯强度观测,由于AV-I相较A-I方案添加了410 nm波段的强度观测信息,故其ALH的DFS提高了0.06~0.31。类似地,由于AV-IP方案同时包括了380 nm波段和410 nm波段的全部测量信息,故其ALH的信息量提高了0.12~0.34。由此可见,随着多波段测量信息与偏振信息约束的加入,ALH的DFS得到了显著提升。

12(a)、(b)中异常值(小圆圈)表示的AOD为0.1除外,标高参数 H 的后验误差随着 H 值和AOD的增大而减小。然而,不同AOD条件下的后验误差表现出显著差异。后验误差的范围增加意味着AOD较小时标高参数 H 的信息量在边界层中较少,但当AOD增大时,信息量显著增多,尤其是当 H 在2~3 km范围内时。当 $H > 3$ km时,信息量则随着 H 的增加而相对减少。

4.2.2 偏振测量对ALH后验误差的影响

图13比较了方案A-I和A-IP(增添380 nm偏振通道后)在粗细模态主导的气溶胶条件下ALH的后验误差随 H 的变化,并说明向380 nm波段强度测量添加偏振信息可以在多大程度上降低ALH的后验误差。图13(a)~(f)中的每个盒子代表AOD值从0.1增加至1.0时后验误差或后验误差减少的统计信息。研究发现,随着标高参数 H 的增加,A-I和A-IP情况下ALH的后验误差从90%大幅降低到50%左右,表明对流层

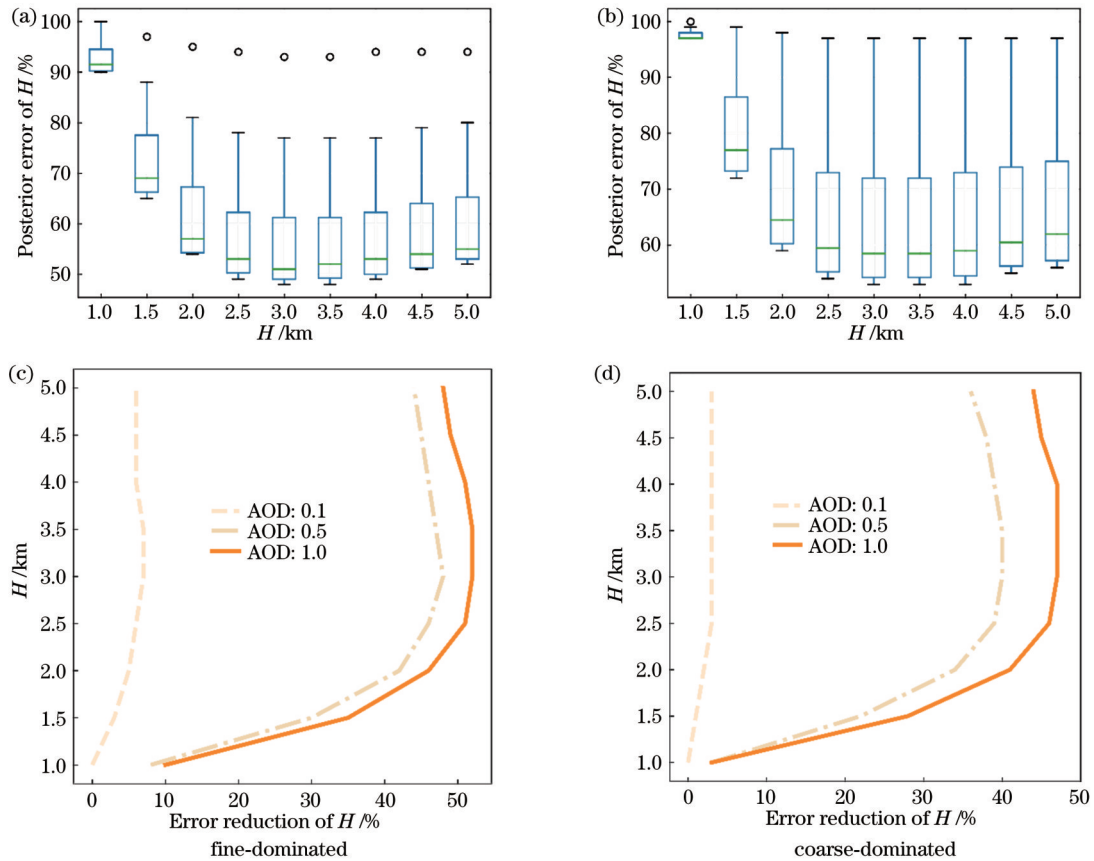


图 12 380 nm 波段后验误差随气溶胶模型参数的变化。(a)(b)后验误差;(c)(d)后验误差降低值

Fig. 12 Posterior error varying with aerosol model parameters at 380 nm band. (a)(b) Posterior error; (c)(d) reduction value of posterior error

中部包含更多的标高信息,如图 13(a)~(d)所示。对于不同地表类型, H 的后验误差在裸土地表上更大,即使添加 DOLP 测量也无法改变这种情况。对于不同的气溶胶类型, H 的后验误差在粗模态主导条件下更大,表明 POSP 强度和偏振测量对于粗模态气溶胶标高信息的反演误差仍然较大。由图 13(e)、(f)可以看出,增加了偏振测量后,ALH 反演的后验误差可以降低 5~30 个百分点。这种误差降低在植被地表上随着 H 值的变化并不明显,而对于裸土地表,这种误差降低随着 H 值的增大而显著增加。综上所述,添加偏振测量对 ALH 反演起到了较好的约束效果。当气溶胶位于低海拔(2~3 km)时,偏振测量因具有更高的灵敏度,故能更好地改善 ALH 反演精度。类似地,与植被地表相比,偏振测量更有效地增加了裸土地表上 ALH 的反演信息量,如图 13(c)、(d)所示。

4.2.3 多波段联合反演对 ALH 后验误差的影响

通过比较场景 A-I、AV-I 和 A-IP、AV-IP,分析了添加 410 nm 波段观测信息对 ALH 反演的改进。图 14(a)、(b)显示了通过仅添加 410 nm 波段强度信息减少的后验误差。图 14(c)、(d)显示了同时添加 410 nm 波段强度和偏振测量信息(A-IP 和 AV-IP 之间的差异)所减少的后验误差。图 14 中每个盒子代表了 ALH 反

演在不同 AOD 条件下后验误差减少的范围。由图 14 可知,无论是否添加 410 nm 波段的偏振测量,添加 410 nm 波段观测信息对裸土地表上 ALH 反演都比植被地表有更大程度的改善。此外,当反演 AOD 从 0.1 增至 1.0 时,植被地表与裸土地表相比,参数 H 的变化范围更小(盒子的范围较小)。结果表明,AOD 对 410 nm 波段裸土地表条件下后验误差改善有更大的影响。相较于 AV-I 方案,这种影响在 AV-IP 方案中更大,差异可以达到 5 个百分点左右。

考虑后验误差的变化与 H 值的变化,ALH 反演在 H 为 2~3 km 时后验误差改善最大。如果仅仅添加 410 nm 波段强度观测信息,后验误差降低不超过 7 个百分点。若同时添加强度与偏振信息,则后验误差降低可达 10 个百分点左右。总体来说,与仅包含 380 nm 波段全部观测信息(A-IP 方案)相比,同时添加 410 nm 波段的观测信息(AV-IP 方案),ALH 反演后验误差降低度提升在 1~9 个百分点之间。类似地,同时添加 410 nm 波段强度与偏振信息(方案 AV-IP 和 A-IP)要比仅添加强度信息(方案 AV-I 和 A-I)的后验误差额外降低 1~3 个百分点,如图 14(a)、(c)所示。

综上所述,添加 410 nm 波段观测对后验误差的约束不仅与观测信息相关,还取决于反演时的 AOD 大

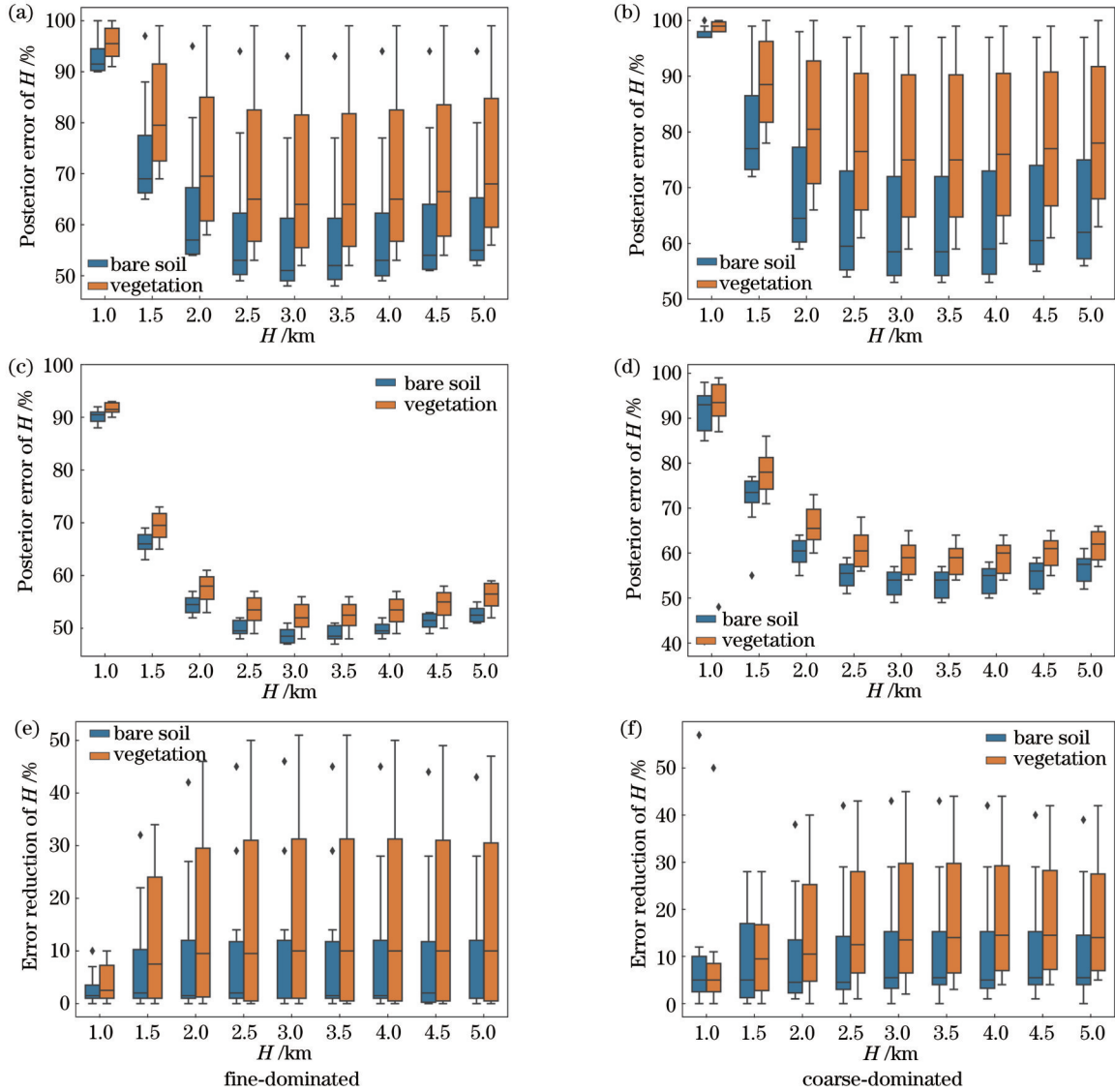


图 13 添加 380 nm 波段偏振测量对后验误差的影响。(a)(b)添加 380 nm 波段纯强度测量;(c)(d)添加 380 nm 波段强度和偏振测量;(e)(f)两种观测方案间后验误差降低差值

Fig. 13 Effect of adding 380 nm wave band polarization measurement on posterior error. (a)(b) Adding 380 nm wave band pure intensity measurement; (c)(d) adding 380 nm wave band intensity and polarization measurements; (e)(f) difference of posterior error reduction between two observation schemes

小。在裸土地表上,添加 410 nm 波段观测信息对后验误差的改善大于植被地表。当 $H > 3$ km 时,添加 410 nm 波段强度和偏振测量对后验误差的改善能力逐渐降低。

5 结 论

研究基于 OE 理论和信息量分析方法,利用拓展紫外波段 380 nm 和 410 nm 的偏振模拟观测数据,对 ALH 进行了敏感性研究。对偏振交叉方案下 POSP 在紫外和近紫外通道的 ALH 反演性能进行了综合评估,研究结果如下。

1) 拓展的紫外 380 nm 波段是卫星遥感 ALH 反演的重要信息源,POSP 理论上可以通过结合偏振与多

波段联合测量有效地反演 ALH 信息。

2) 随着卫星观测散射角度的增大,观测信息对标高 H 的敏感度逐渐降低。对于地表类型和气溶胶类型来说,粗模态主导的气溶胶、裸土地表相较细模态主导的气溶胶、植被地表来说提供的 ALH 信息量更少。无论在何种地表上,当标高 H 在 2~3 km 范围内时,后验误差下降最为显著,表明对流层气溶胶层的卫星探测相较近地面具有更多的信息量。

3) 当通过增加紫外 380 nm 偏振通道来改进 ALH 反演时,ALH 反演后验误差降低了 5~30 个百分点,表明紫外波段偏振测量对 H 的后验误差起到了较好的约束效果。同时,随着近紫外波段 410 nm 波段强度与偏振信息的加入,后验误差额外降低了 7~10 个百分

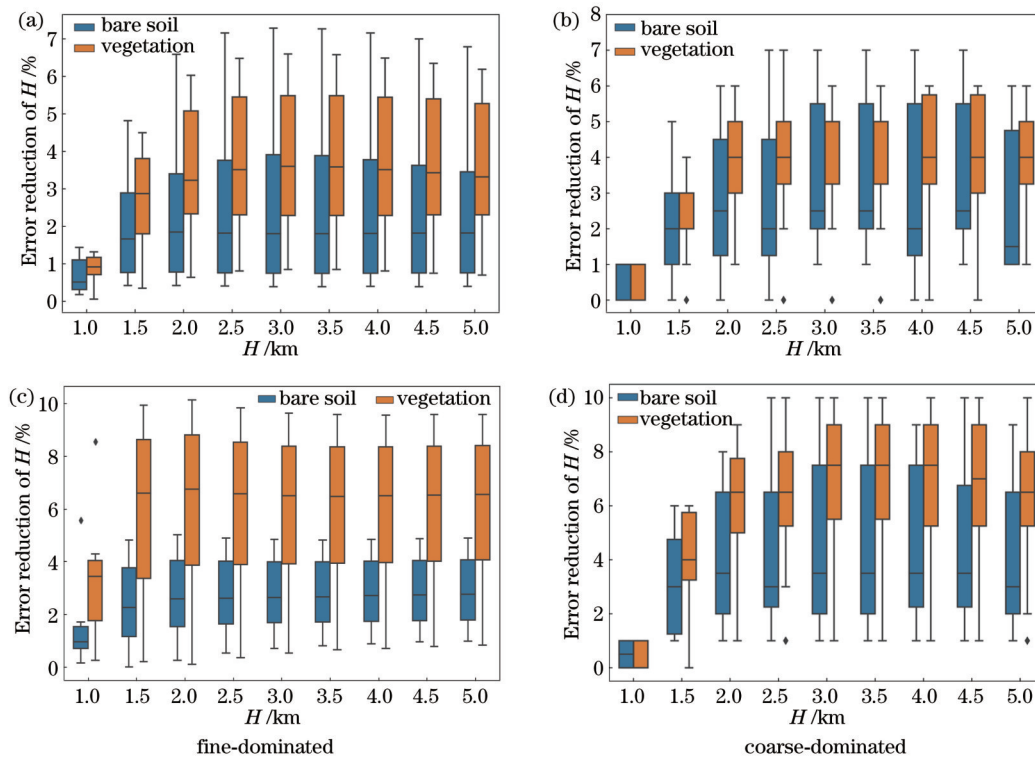


图 14 添加 410 nm 测量对后验误差影响。(a)(b)添加 410 nm 波段强度测量;(c)(d)添加 410 nm 波段强度和偏振测量
Fig. 14 Effect of adding 410 nm measurement on posterior error. (a)(b) Adding 410 nm band intensity measurement; (c)(d) adding 410 nm band intensity and polarization measurements

点,尤其增加了 H 值较低时 ALH 的反演信息量。

整体上来看,基于改进的 BRDF 模型、改进的 BPDF 模型和偏振交火反演模式的使用,POSP 传感器在紫外波段具有独特的观测优势,在不同地表与观测方案下都具有较好的 ALH 反演性能(DFS 大于 0.5)。同时,构建的 ALH 反演框架很容易扩展,可以同时反演更多的气溶胶参数。在下一步的研究中,将构建更精密的 ALH 反演算法框架,利用偏振交火方案对标高外同时联合反演的其他气溶胶参数进行补充测试。

致谢 衷心感谢 UNL-VRM(www.unl-vrm.org)的开发者 The University of Iowa 的王俊教授和 University of Maryland, Baltimore County 的许晓光博士等提供的技术支持。同时,感谢中国科学院空天信息创新研究院罗杰助理研究员对文章所提出的宝贵修改意见。

参 考 文 献

- [1] Zhang L, Li Q B, Gu Y, et al. Dust vertical profile impact on global radiative forcing estimation using a coupled chemical-transport-radiative-transfer model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(14): 7097-7114.
- [2] Zhang Y, Li Z Q. Remote sensing of atmospheric fine particulate matter ($PM_{2.5}$) mass concentration near the ground from satellite observation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 252-262.
- [3] Wang H F, Li Z Q, Lü Y, et al. Observational study of aerosol-induced impact on planetary boundary layer based on lidar and sunphotometer in Beijing[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 252: 897-906.
- [4] Yang Z F, Wang J, Ichoku C, et al. Mesoscale modeling and satellite observation of transport and mixing of smoke and dust particles over northern sub-Saharan African region[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(21): 12139-12157.
- [5] Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(11): 2310-2323.
- [6] Xu X G, Wang J, Wang Y, et al. Passive remote sensing of aerosol height[M]//Islam T, Hu Y X, Wang J. Remote sensing of aerosols, clouds, and precipitation. Amsterdam: Elsevier, 2018: 1-22.
- [7] Chen X, Xu X G, Wang J, et al. Can multi-angular polarimetric measurements in the oxygen-A and B bands improve the retrieval of aerosol vertical distribution? [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 270: 107679.
- [8] Hou W Z, Wang H F, Li Z Q, et al. Preliminary sensitivity study of aerosol layer height from synthetic multiangle polarimetric remote sensing measurements[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, XLII-3/W9: 63-69.
- [9] 伽丽丽, 马奕, 陈兴峰, 等. 卫星近红外偏振通道反演气溶胶光学厚度的气溶胶模型影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(5): 569-577.
- [10] Qie L L, Ma Y, Chen X F, et al. Aerosol model assumption: the retrievals of aerosol optical depth from satellite near-infrared polarimetric measurements[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(5): 569-577.
- [10] Wu L H, Hasekamp O, van Diedenhoven B, et al. Passive remote sensing of aerosol layer height using near-UV multiangle polarization measurements[J]. *Geophysical Research Letters*,

- 2016, 43(16): 8783-8790.
- [11] 杨洪春. 大气颗粒物监测仪在轨定标研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 23-41.
Yang H C. On-orbit calibration of particulate matter polarimetry suits[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 23-41.
- [12] Hou W Z, Wang J, Xu X G, 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.
- [13] Hou W Z, Wang J, Xu X G, et al. An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols. 2. Information content analysis for aerosol parameters and principal components of surface spectra[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 192: 14-29.
- [14] Chen X, Wang J, Liu Y, et al. Angular dependence of aerosol information content in CAPI/TanSat observation over land: effect of polarization and synergy with A-train satellites[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 196: 163-177.
- [15] Xu X G, Wang J, Zeng J, et al. Retrieval of aerosol microphysical properties from AERONET photopolarimetric measurements. 2. A new research algorithm and case demonstration[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(14): 7079-7098.
- [16] Rodgers C D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice[M]. Singapore: World Scientific, 2000: 256.
- [17] 郑逢勋, 侯伟真, 李正强. 高分五号卫星多角度偏振相机最优估计反演: 角度依赖与后验误差分析[J]. *物理学报*, 2019, 68(4): 040701.
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): 040701.
- [18] Hou W Z, Wang J, Xu X G, 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.
- [19] 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.
- [20] Spurr R, Wang J, Zeng J, et al. Linearized T-matrix and Mie scattering computations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113(6): 425-439.
- [21] Xu X G, Wang J. UNL-VRTM, a testbed for aerosol remote sensing: model developments and applications[M]// Kokhanovsky A. Springer series in light scattering. Cham: Springer, 2019: 1-69.
- [22] 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 and Radiative Transfer*, 2014, 146: 510-528.
- [23] 凌明椿, 宋茂新, 洪津, 等. 星载偏振扫描仪环境适应性设计与验证[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0704002.
Ling M C, Song M X, Hong J, et al. Design and validation of space adaptability for particulate observing scanning polarization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0704002.
- [24] 朱双双, 杨洪春, 李联阳, 等. 偏振扫描仪偏振探测实验与结果分析[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1112002.
Zhu S S, Yang H C, Li Z Y, et al. Polarization detection test and result analysis of scanning polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1112002.
- [25] 李正强, 许华, 伽丽丽, 等. 一种星载传感器“偏振交火”探测大气气溶胶参数的方法: CN104316440A[P]. 2015-01-28.
Li Z Q, Xu H, Qie L L, et al. Method for detecting atmospheric aerosol parameters by polarization crossfire of space-borne sensors: CN104316440A[P]. 2015-01-28.
- [26] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, et al. The polarization crossfire (PCF) sensor suite focusing on satellite remote sensing of fine particulate matter PM_{2.5} from space[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 286: 108217.
- [27] 朱双双. 同平台偏振交叉定标关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 41-42.
Zhu S S. Research on key technologies of polarization cross calibration on the same platform[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 41-42.
- [28] 李联阳. 偏振交火航空验证关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021: 28-29.
Li Z Y. Key technology research of polarization crossfire aviation verification[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021: 28-29.
- [29] 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.
- [30] Ge B Y, Mei X D, Li Z Q, et al. An improved algorithm for retrieving high resolution fine-mode aerosol based on polarized satellite data: application and validation for POLDER-3[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111894.
- [31] Litvinov P, Hasekamp O, Cairns B. Models for surface reflection of radiance and polarized radiance: comparison with airborne multi-angle photopolarimetric measurements and implications for modeling top-of-atmosphere measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 781-792.
- [32] Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, et al. Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(12): 2642-2650.
- [33] Hou W Z, Li Z Q, Yang D, et al. Hyperspectral and multispectral remote sensing of aerosols based on surface spectral reconstruction by PCA[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11763: 117631X.
- [34] Hou W Z, Mao Y L, Xu C, et al. Study on the spectral reconstruction of typical surface types based on spectral library and principal component analysis[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11023: 110232T.
- [35] 郑逢勋. 基于卫星多角度偏振观测的气溶胶多参数最优反演研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 37-39.
Zheng F X. Study on aerosol multi-parameter optimization inversion based on satellite multi-angle polarization observation [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 37-39.
- [36] Ding S G, Wang J, Xu X G. Polarimetric remote sensing in oxygen A and B bands: sensitivity study and information content analysis for vertical profile of aerosols[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(5): 2077-2092.

Information Content Analysis on Passive Remote Sensing Imaging Retrieval of Aerosol Layer Height Based on Spaceborne Polarization Crossfire

Gu Haoran^{1,2}, Li Zhengqiang^{2,3*}, Hou Weizhen^{2,3**}, Liu Zhenhai⁴, Qie Lili², Li Yinna^{2,3}, Zheng Yang², Shi Zheng^{2,3}, Xu Hua^{2,3}, Hong Jin⁴, Ma Jinji¹, Chen Zhenting⁵

¹*School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China;*

²*State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

⁴*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;*

⁵*School of Information Engineering, Kunming University, Kunming 650214, Yunnan, China*

Abstract

Objective As one of the spaceborne detection schemes with the strongest comprehensive aerosol capability at this stage, the polarization crossfire (PCF) strategy is developed in China. It is composed of the particulate observing scanning polarimeter (POSP) and the directional polarimetric camera (DPC) and has been carried by China's Gaofen 5-02 and the Chinese Atmospheric Environmental Monitoring Satellite (DQ-1), which are launched in 2021 and 2022, respectively. To explore the detection ability of the POSP based on PCF in the ultraviolet (UV) band for aerosol layer height (ALH), we study the sensitivity of ALH with the synthetic data in the UV and near-UV bands and further assess the impact of different conditions on the information content and posterior error of ALH. It is expected that our findings can be helpful for the retrieval algorithm development of ALH.

Methods Optimal estimation (OE) theory and information content analysis are employed in this study. OE provides statistical indicators such as the averaging kernel matrix and the degree of freedom for signal (DFS), which can represent how much information on the retrieved parameters we can obtain from the satellite measurements. Therefore, combined with the forward modeling of specific satellite sensor observations, information content analysis is used to provide support for satellite sensor design and retrieval algorithm development. The advantage is that the retrieval capability can be quantified without the development of true inversion. Additionally, it provides top-level physics-based guidance on algorithm design. Firstly, the unified linearized vector radiative transfer model (UNL-VRTM) is used as the forward model to calculate the normalized radiance and polarized radiance at the top of the atmosphere (TOA), as well as the Jacobians of TOA results with respect to corresponding parameters. Then, the DFS and posterior error are introduced to quantify the information content of ALH from the aspects of the intensity and polarization measurements, respectively. Under the assumption of different surface types, aerosol models, and different typical observation geometry cases, the sensitivity analysis results for different situations can be finally obtained.

Results and Discussions We analyze the sensitivity variation of ALH with the scattering angle at the solar zenith angle of 40°. The results show that a smaller scattering angle (within 90° to 140°) of the satellite observation geometry is accompanied by higher sensitivity of Stokes parameter I to scale height H (Fig. 10). After that, we choose a fixed observation geometry to calculate the DFS under different schemes. The research shows that the DFS of the bare soil is lower than that of the vegetation surface in the band of 380 nm (Table 6). Generally, the surface reflectance has more impact on the information content of H in terms of POSP measurements than aerosol optical properties, which leads to the lowest information content over bare soil. Meanwhile, with the addition of multi-band measurements and constraints of polarization information, the DFS of ALH is significantly improved (Fig. 11). Different cases indicate that the addition of intensity and polarization measurements for the retrieval of ALH at 380 nm and 410 nm can improve the H information effectively, and the posterior error of the ALH retrieval is also reduced by 5–30 percentage points (Fig. 13). It is shown that the polarization measurement in the UV band has a good constraining effect on the posterior error of H . In addition, with the addition of intensity and polarization information in the near-UV band of 410 nm, the posterior error is further reduced by 7–10 percentage points, and the measurements particularly improve the retrieval of ALH when the H value is low (Fig. 14).

Conclusions The UV and near-UV bands are important sources of information content for ALH in satellite remote sensing. Compared with the case only using intensity observations at 380 nm, the addition of polarization detection in the same band can provide an extra DFS of 0.06–0.26 for the retrieval of ALH. Meanwhile, the posterior error is reduced by 5–30 percentage points. Combined with near-UV detection information at 410 nm, the posterior error for the retrieval of ALH is further reduced by 7–10 percentage points. In particular, the retrieval of ALH at low scale height is improved. In addition, the sensitivity of observation information to ALH decreases gradually with the increase in the corresponding scattering angle ranging from 90° to 140° . Moreover, the bare soil case with aerosols dominated by the coarse mode provides less content information on ALH than the vegetation surface case with aerosols dominated by the fine mode. Although ALH information between the two types of aerosols shows some distinctions because of their different single-scattering optical properties, the dependence of information on surface types and the impact of polarization measurements generally appear similar. The information content analysis shows that the potential capability of the POSP instrument is good over various surface types and aerosol models on the basis of the use of spaceborne PCF strategy.

Key words atmospheric optics; scanning polarimeter; aerosol layer height; polarimetric remote sensing; information content analysis