

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.04.008

紫外多角度偏振探测气溶胶层高的信息量 分析初步研究

顾浩然^{1,4}, 李正强^{1,5*}, 侯伟真^{1,5*}, 裘桢炜², 刘振海², 朱军³,
伽丽丽¹, 罗杰¹, 洪津², 麻金继⁴

(1 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;

2 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;

3 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;

4 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;

5 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为探究多角度偏振在紫外波段对气溶胶层高 (ALH) 的探测能力, 在不同的观测几何、气溶胶和地表类型等条件下系统评估了多角度偏振在紫外波段的 ALH 反演信息量。基于最优估计理论和信息量分析方法, 分析了紫外波段 365 nm 和 388 nm 两个通道模拟仿真数据对 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。研究表明: (1) 多角度偏振观测可有效提高 ALH 反演的信息量。(2) 多角度卫星观测信息量随观测角度个数的增加显著提升, 当反演中使用的角度数增加到 5 个时, ALH 的信号自由度 (DFS) 提升了 0.4 以上。(3) 添加 388 nm 波段偏振观测或 365 nm 波段强度观测这两种方案均能提升 ALH 的 DFS。但相对而言, 偏振观测方案受气溶胶模型误差影响更小, 能更好地提升 ALH 反演的信息量, 尤其是改善了低气溶胶光学厚度 (AOD) 条件下的 ALH 反演。

关键词: 气溶胶边界层高度; 最优化估计反演; 信息量分析; 后验误差

中图分类号: TP721

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)04-357-014

Preliminary sensitivity study of aerosol layer height from ultraviolet multiangle polarimetric remote sensing measurements

GU Haoran^{1,4}, LI Zhengqiang^{1,5*}, HOU Weizhen^{1,5*}, QIU Zhenwei², LIU Zhenhai², ZHU Jun³,
QIE Lili¹, LUO Jie¹, HONG Jin², MA Jinji⁴

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

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3 DFH Satellite Co. Ltd, Beijing 100094, China;

4 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China;

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (41925019), 国家自然科学基金 (41871269), 国家自然科学基金 (42175148), 航天预研项目 (D010206)

作者简介: 顾浩然 (1999-), 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事信息量分析方面的研究。E-mail: 2021011471@anhu.edu.cn

导师简介: 见本期 310 页

收稿日期: 2022-06-02; **修改日期:** 2022-08-02

***通信作者:** E-mail: lizq@aircas.ac.cn; houwz@radi.ac.cn

Abstract: To explore the detection ability of the multiangle polarimetric remote sensing measurements in the ultraviolet band for aerosol layer height (ALH), the ALH retrieval information has been systematically evaluated under different observation conditions using the multiangle polarimetric measurements in ultraviolet bands. Based on the optimal estimation theory and the information content analysis method, the sensitivity of the ALH to the observations of 365 nm and 388 nm bands has been analyzed, and the impacts of different conditions on the information content and posterior error of ALH have also been assessed. The results show that: (1) The information content for ALH retrieval is significantly improved by adding multi-angle polarimetric measurements. (2) The information content increases significantly with the increase of the number of viewing angles, and the degree of freedom for signal (DFS) for ALH retrieval can be improved by more than 0.4. (3) Both the addition of polarization observation at 388 nm and the intensity observation at 365 nm can improve the DFS of ALH, however, compared to the intensity observation, the polarization observation shows better results and is less affected by the aerosol model error. Especially, the polarization observation can improve the ALH retrieval under low aerosol optical depth (AOD) conditions.

Key words: aerosol layer height; optimal estimation inversion; information content analysis; posteriori error

0 引言

大气气溶胶是悬浮在气体中具有一定稳定性的液态或固态微粒,影响着全球的辐射能量平衡和气候变化^[1]。而气溶胶层高 (ALH) 是气溶胶精准表征的重要参数,对遥感观测结果有着直接的影响,例如,在痕量气体反演和海洋离水辐射量的观测上需要考虑气溶胶散射并针对气溶胶层高参数进行相应的修改^[2]。因此,气溶胶及其垂直分布的精确估算对理解气溶胶影响和遥感模拟研究具有重要意义。

地基主动遥感虽然观测精度较高,但受到空间覆盖范围的限制难以实现区域全覆盖观测。相比之下,被动遥感技术则为全球范围内的气溶胶层高反演提供了可能^[3]。目前在被动遥感方面^[4-6],大部分研究集中在 O₂A 波段的使用上。主要因为氧气吸收波段垂直分布通常较稳定且不受人为排放的影响,是气溶胶层高被动遥感反演的重要途径之一。但实际 O₂A 波段测量反演依赖于特定的假设,往往结合较高的光谱分辨率传感器或联合 O₂B 波段低地表反射率的优势以提高反演精度。基于偏振探测的紫外波段则为卫星被动反演 ALH 提供了另一种途径,因为在紫外及近紫外波段中,瑞利散射占据了主导地位,升高的气溶胶层部分屏蔽了瑞利散射的偏振信号,因此提高了对气溶胶层高度的敏感性^[7]。但针对目前的高光谱卫星遥感来说,紫外多角度偏振探测用于 ALH 反演的研究则相对较少。

本文根据典型的卫星多角度观测模式,利用 UNL-VRM (Unified Linearized Vector Radiative Transfer Model) 软件进行前向模拟。在获得模拟仿真数据基础上,从理论分析角度详细论证了紫外波段中 365 nm 和 388 nm 两个通道对 ALH 的探测能力。同时基于信息量分析方法,对比分析了偏振测量与多波段联合反演对 ALH 反演的作用,为 ALH 反演提供理论和方法支撑。

1 研究方法

1.1 最优化估计理论

根据最优估计理论^[8],ALH 反演是基于卫星观测数据获取最佳匹配的大气层高参数的过程,可以通过

简化的前向模型 F 表示:

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

式中 \mathbf{b} 为非状态向量, 包含那些状态向量 \mathbf{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; $\boldsymbol{\epsilon}$ 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。

同时根据最优化理论, 状态向量的最大似然解 $\hat{\mathbf{x}}$ 可以描述为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_a + (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K} \mathbf{x}_a), \quad (2)$$

式中 \mathbf{x}_a 是大气状态矢量的先验估计, \mathbf{K} 是雅可比矩阵, 由每个观测值对每个状态参数的一阶偏导组成, 描述了前向模型对状态向量的敏感程度, \mathbf{S}_ϵ 表示观测向量的协方差矩阵, \mathbf{S}_a 是 \mathbf{x}_a 的协方差矩阵, 先验知识则为最优化估计算法反演提供约束, 防止不合理结果的产生^[8]。

式 (2) 中反演中状态向量 $\hat{\mathbf{x}}$ 对应于代价函数达到收敛后的最小值, 代价函数 J 为

$$J = (\mathbf{y} - \mathbf{K} \mathbf{x})^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{K} \mathbf{x}) + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a)^T \mathbf{S}_a^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_a). \quad (3)$$

后验误差 $\hat{\mathbf{S}}$ 又称为理论反演误差, 基于贝叶斯理论, 可以通过先验误差结合误差传递进行计算, 其定义为

$$\hat{\mathbf{S}} = (\mathbf{S}_a^{-1} + \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K})^{-1}. \quad (4)$$

$\hat{\mathbf{S}}$ 描述了由于测量噪声、正向模型参数误差等导致的状态向量 $\hat{\mathbf{x}}$ 的理论反演误差, 其对角线元素的平方根则对应了参数的后验误差。

除了后验误差协方差矩阵外, 平均核函数 \mathbf{A} 是另一个重要参数, 用于量化从观测中反演到的相关参数的信息量, 可以定义为

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \hat{\mathbf{x}}}{\partial \mathbf{x}} = (\mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K} + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{S}_\epsilon^{-1} \mathbf{K}. \quad (5)$$

矩阵 \mathbf{A} 的对角线元素之和被称为信号自由度 (DFS), 可用于表征从卫星观测中获得的反演参数的信息量。当矩阵 \mathbf{A} 为单位矩阵时, 则表明反演参数无需任何近似和先验知识, 在其收敛到全局最小代价函数后可实现完全反演。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卫星观测反演得到^[9,10]。

1.2 辐射传输模拟

本研究采用线性化的矢量辐射传输模型 UNL-VRM 进行前向模拟, 其具备仿真 TOA 归一化的 Stokes 矢量 $[I, Q, U, V]^T$ 能力^[11]。其中, I 为总的辐射强度, Q 表示平行和垂直于参考平面的线偏振分量之差, U 表示与参考平面夹角为 $\pm 45^\circ$ 的偏振面上的线偏振辐照度, V 表示圆偏振辐照度^[12,13]。考虑使用包括辐射强度 I 和线性偏振度 D_{OLP} 组成的观测向量, 可以在一定程度上消除绝对定标的影响。其中 D_{OLP} 的计算公式为

$$D_{\text{OLP}} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}. \quad (6)$$

进一步, 线偏振度对状态矢量各分量的雅可比的计算公式为

$$\frac{\partial D_{\text{OLP}}}{\partial x} = -\frac{D_{\text{OLP}}}{I} \frac{\partial I}{\partial x_i} + \frac{Q}{I} \frac{\partial Q}{\partial x_i} + U \frac{\partial U}{\partial x_i} \frac{1}{\sqrt{Q^2 + U^2}}. \quad (7)$$

综上, 本研究中观测向量为

$$\mathbf{y} = [I_{\lambda}^{v_1}, \dots, I_{\lambda}^{v_M}, D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_1}, \dots, D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_M}]^T, \quad (8)$$

式中上标 $v_1 \sim v_M$ 分别对应多角度观测模式中不同的观测角度。

UNL-VRM 提供的雅可比矩阵模拟计算能力为信息量分析提供了很好的支持。本研究利用 UNL-VRM 给出 TOA 对于 ALH 的雅可比结果, 并进一步计算不同观测方案下的 ALH 反演信息量与后验误差, 系统地评估紫外多角度偏振测量对 ALH 的探测能力。

2 测试场景

2.1 多角度卫星观测几何

为获取用于信息量分析的模拟仿真数据, 考虑了 4 组典型观测几何, 如表 1 所示, 将不同的太阳天顶角 θ_0 、观测天顶角 θ_v 和相对方位角 ϕ 组合在一起, 以代表不同位置的典型观测。太阳位置分别对应夏至和冬至时不同太阳高度情况。图 1 (a) 采用极坐标图绘制了观测几何图形, 其中半径表示观测天顶角 θ_v 从 0° 变化到 60° , 步长为 20° , 圆则表示对应的方位角 ϕ 从 0° 变化至 360° 。相应地, 图 1 (b) 则根据观测几何绘制了散射角 Θ , 四组散射角范围分别为 $137.76^\circ \sim 173.68^\circ$ 、 $105.05^\circ \sim 121.30^\circ$ 、 $80.28^\circ \sim 109.40^\circ$ 和 $104.04^\circ \sim 145.82^\circ$ 。

表 1 前向模拟使用的多角度观测几何

Table 1 Multi-viewing observation geometries for forward simulations

Geometry scenarios	Solar zenith range/($^\circ$)	Viewing zenith range/($^\circ$)	Relative azimuth range/($^\circ$)	Scattering angle range/($^\circ$)
Geometry 1	54.12~54.79	44.39~64.09	5.78~330.03	137.76~173.68
Geometry 2	32.86~33.59	25.59~58.64	106.99~248.41	105.05~121.30
Geometry 3	53.18~53.74	28.8~61.06	97.15~229.85	80.28~109.40
Geometry 4	77.63~78.08	37.15~61.87	0.65~298.07	104.04~145.82

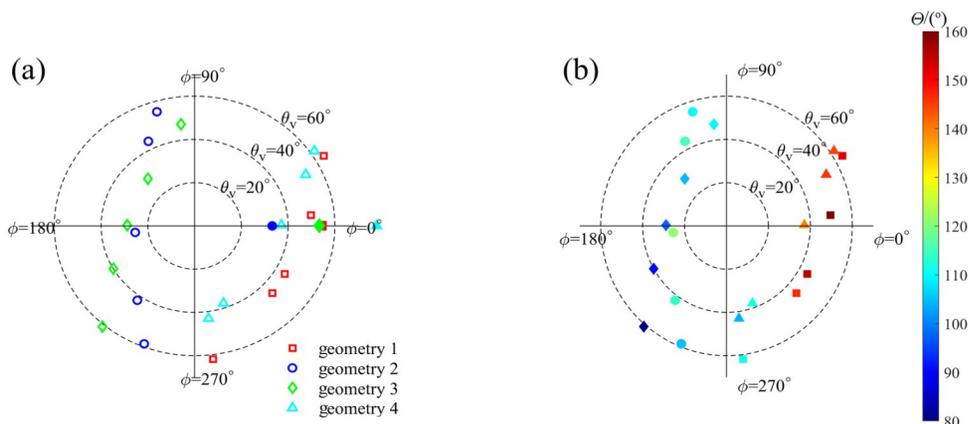


图 1 研究采用的传感器观测几何 (a) 及散射角分布 (b)

Fig. 1 Observation geometries (a) and scattering angle distribution (b) of the instrument adopted in the research

2.2 气溶胶和地表模型

与Hou等^[14,15]的研究类似,本研究将气溶胶粒子分为粗模态的气溶胶粒子和细模态的气溶胶粒子,以测试气溶胶粒子的不同单次散射特性对ALH信息反演的影响。为方便描述,分别以上角标f和c区分气溶胶细模态和粗模态。表2总结了遵循双峰对数正态分布函数的气溶胶模型微物理参数,包括气溶胶总体积柱浓度 $V_0 = V_0^f + V_0^c$ 、细模态柱体积比 $F_{\text{MFV}} = V_0^f/V_0^c$ 、有效半径 r_{eff} 、方差 V_{eff} 以及粗、细模态气溶胶的折射率(m_r 和 m_i 分别表示气溶胶复折射指数的实部和虚部)。根据Li等^[16]的研究,以上参数可认为由传感器多参数联合反演获得,但存在一定的反演误差。

表2 气溶胶模型参数

Table 2 The aerosol model parameters

Scenarios	m_r (550 nm)	m_i (550 nm)	$r_{\text{eff}}/\mu\text{m}$	V_{eff}	F_{MFV}	V_0
Fine-dominated	0.549	0.003	0.21	0.5036	0.8	0.093
Coarse-dominated	1.434	0.011	1.90	0.1915	0.2	0.246

在模拟中,假设气溶胶消光垂直剖面遵循指数递减函数。该假设通常用于大气校正算法^[17,18],也是UNL-VRM内可以自定义的气溶胶垂直剖面分布函数之一,其表达式为

$$\int_{T_{\text{OA}}}^z \tau(z) dz = \tau_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right), \quad (9)$$

式中 z 为太阳光传输的物理路径, T_{OA} 为大气层顶高度; τ_0 表示柱状气溶胶光学厚度(AOD), H 表示气溶胶标高参数,气溶胶垂直剖面随着给定的高度 H 指数递减。本研究仅选择气溶胶标高 H 作为反演参量,并将其他气溶胶模型相关参数视为非状态向量。

与已有研究类似^[19,20],本研究采用UNL-VRM中耦合的地表反射率的内核驱动的双向反射分布函数模型(BRDF)表征下垫面的反射特性,其表达式^[3]为

$$\rho_s(\mu_0, \mu_v, \phi, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) [1 + k_1 f_{\text{geom}}(\mu_0, \mu_v, \phi) + k_2 f_{\text{vol}}(\mu_0, \mu_v, \phi)], \quad (10)$$

式中 μ_0 和 μ_v 分别表示太阳天顶角和观测天顶角的余弦值; ϕ 表示相对方位角;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})的双向偏振反射分布函数(BPDF)模型^[3]:

$$R_p^s(\mu_0, \mu_v, \phi) = \frac{C \exp(-\tan \gamma) \exp(-I_{\text{NDV}})}{4(\mu_0 + \mu_v)} F_{1,2}(\gamma, n_i), \quad (11)$$

式中 C 是唯一的自由参数, I_{NDV} 是归一化植被指数, $F_{1,2}(\gamma, n_i)$ 代表菲涅耳矩阵的偏振分量,以及 γ 表示与观测几何有关的镜面反射角, n_i 代表了复折射指数。本研究中,不同类型地表BRDF和BPDF参数则根据Hou等^[15]的研究,基于传感器的观测信息利用主成分分析的光谱重建方法获得。具体参数如表3所示。

2.3 协方差矩阵与方案设计

对于紫外波段的ALH信息量分析来说,状态向量的表达式为

表 3 植被地表模型参数

Table 3 The surface model parameters

Surface type	$f_{\text{iso}}(365 \text{ nm})$	$f_{\text{iso}}(388 \text{ nm})$	k_1	k_2	C	I_{NDV}
Vegetation	0.0186	0.0185	0.158	0.547	6.57	0.62
Bare soil	0.0702	0.0683	0.087	0.668	6.9	0.03

$$\mathbf{x}=[H]^T. \quad (12)$$

同时气溶胶和地表模型等参数认为是在已知反演框架下,仅考虑反演误差与误差传递。非状态向量的表达式为

$$\mathbf{b}=[V_0^f, V_0^c, \rho_s(\lambda), C]^T, \quad (13)$$

式中 V_0^f 和 V_0^c 分别表示细模态和粗模态柱状体积浓度, $\rho_s(\lambda)$ 分别代表波长为 λ 处 BRDF 反射率值, C 是 BPDF 模型自由参数。相应地,状态与非状态向量的雅可比矩阵分别为

$$\mathbf{K}=\left[\frac{\partial I_\lambda^{v_1}}{\partial H}, \dots, \frac{\partial I_\lambda^{v_M}}{\partial H}, \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_1}}{\partial H}, \dots, \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_M}}{\partial H}\right]^T, \quad (14)$$

$$\mathbf{K}_b=\begin{bmatrix} \frac{\partial I_\lambda^{v_1}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial I_\lambda^{v_1}}{\partial V_0^c} & \frac{\partial I_\lambda^{v_1}}{\partial \rho_s(\lambda)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial I_\lambda^{v_M}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial I_\lambda^{v_M}}{\partial V_0^c} & \frac{\partial I_\lambda^{v_M}}{\partial \rho_s(\lambda)} \\ \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_1}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_1}}{\partial V_0^c} & \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_1}}{\partial \rho_s(\lambda)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_M}}{\partial V_0^f} & \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_M}}{\partial V_0^c} & \frac{\partial D_{\text{OLP}, \lambda}^{v_M}}{\partial \rho_s(\lambda)} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

对于先验误差协方差矩阵设置为 1.5 km, 即

$$\mathbf{S}_a=[\sigma_H^2]. \quad (16)$$

通过传感器反演中获取非状态向量会存在一定的误差,本研究假设气溶胶模型先验误差设置粗模态、细模态体积柱浓度 V_0^f, V_0^c 为 20%, 地表模型先验误差为 100%, 对应的协方差矩阵 \mathbf{S}_b 为

$$\mathbf{S}_b=\text{diag}\left\{\left(\Delta V_0^f\right)^2, \left(\Delta V_0^c\right)^2, \left[\Delta \rho_s(\lambda_1)\right]^2, \left[\Delta \rho_s(\lambda_2)\right]^2\right\}, \quad (17)$$

式中 $\Delta \rho_s(\lambda_1)$ 为 365 nm 波段 BRDF 反射率参数的误差; $\Delta \rho_s(\lambda_2)$ 为 388 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; $\text{diag}(\bullet)$ 为一个构造对角矩阵的函数。

而对于卫星载荷的观测误差来说,传感器辐射强度测量的相对不确定性 $\leq 5\%$, 这里按照上限 5% 设定。偏振测量误差 $\leq 2\%$, 这里按照上限 2% 设定^[12, 19], 测误差协方差矩阵 \mathbf{S}_{y_0} 的表达式为

$$\mathbf{S}_{y_0}=\text{diag}\left\{\left[\left(\Delta I_{365}^{v_1}\right)^2, \dots, \left(\Delta I_{388}^{v_M}\right)^2, \left(\Delta D_{\text{OLP}, 365}^{v_1}\right)^2, \dots, \left(\Delta D_{\text{OLP}, 388}^{v_M}\right)^2\right]^T\right\}. \quad (18)$$

此外,为了比较不同紫外通道及其添加偏振探测的信息量大小,本研究根据包含的观测方案不同定义了不同的数值模拟方案,如表4所示。方案A-I(或B-I)仅包括365 nm波段(或388 nm波段)的强度测量,而A-IP(或B-IP)表示包括365 nm波段(或388 nm波段)的强度和线偏振度测量。类似地,方案AB-I包括365 nm和388 nm波段的强度测量,方案AB-IP则包括了两个波段的所有测量。因此,方案B-IP和AB-I就分别代表了采用388 nm的强度和线偏振度测量与388 nm、365 nm双通道强度联合测量等两种方案。在接下来的分析中,主要聚焦于案例1和案例2方案的对比,即情景B-IP和AB-I下的信息量比较。

表4 数值模拟方案

Table 4 Numerical experiments scheme

Scheme name	365 nm Radiance	365 nm Polarization	388 nm Radiance	388 nm Polarization
A-I	√	×	×	×
A-IP	√	√	×	×
B-I	×	×	√	×
B-IP (case1)	×	×	√	√
AB-I (case2)	√	×	√	×
AB-IP	√	√	√	√

注:√表示数值模拟方案包含该通道观测信息,×表示不包含该通道观测信息

3 分析与讨论

3.1 卫星观测仿真

基于上述传感器特性和模拟假设,在UNL-VRM中对不同AOD和植被与裸土地表条件下的卫星紫外多角度观测进行模拟仿真,得到表观反射率及表观偏振反射率仿真结果(图2)和对应雅可比结果(图3)。

由图2可知,气溶胶标高参数 H 与AOD是影响表观反射率和表观偏振反射率的重要因素,裸土地表反射率往往要高于植被表面。图3则对应AOD在0.1~2.0范围内辐射强度与线偏振度分别对ALH的雅可比值随着高度的变化情况。由图3可以看出:强度测量的雅可比值在 H 为2~3 km时绝对值较高,表明对流层内包含更多的ALH信息,该范围内ALH可探测精度相对较高。为进一步探测传感器对ALH的反演能力,后续研究基于较为敏感的高度(假设 $H=2.0$ km),分析典型场景下ALH反演的信息量。

3.2 信息量对比分析

3.2.1 典型案例下的ALH反演能力

表5总结了A-IP与AB-I方案在两种不同类型表面上四组多角度观测计算到的DFS均值,并添加B-I方案作为对照,以下DFS值均是在AOD=0.6(550 nm)、 $H=2$ km条件下根据不同观测几何求均值所得。

由表5可知,额外添加388 nm波段偏振测量(B-IP测量方案)或365 nm波段强度信息(AB-I测量方案)相较于388 nm波段的纯强度观测(B-I测量方案)均有效地提升了ALH反演的信息量。除了粗模态裸土地表以外,A-IP与AB-I测量方案在不同条件下均具有较高的ALH信息量。就两种方案而言,植被地表上AB-I方案相比A-IP方案DFS提高了0.03~0.05。而裸土地表上则相反,AB-I方案比A-IP方案DFS降低了0.06~0.07,这是因为388 nm波段 D_{OLP} 对植被的敏感度相对较高,这种改善有效地减少了两个方案之间的信息

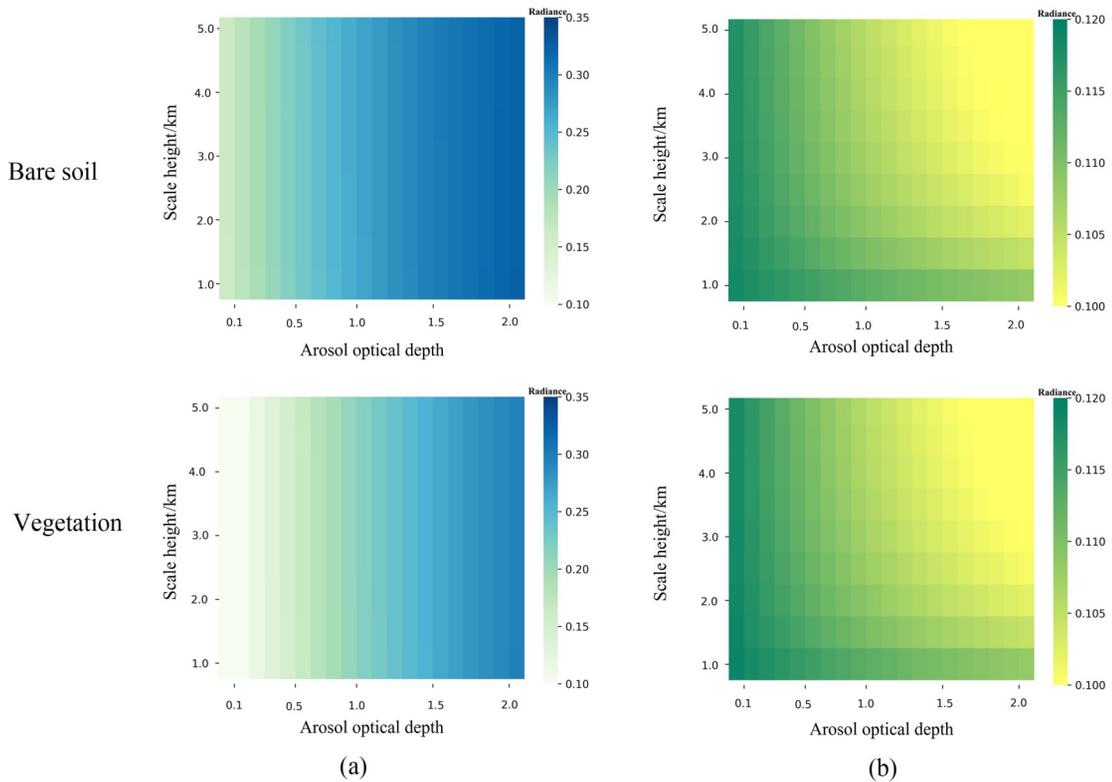


图2 365 nm 波段模拟结果随观测 AOD、 H 变化。(a) 表观反射率; (b) 表观偏振反射率

Fig. 2 Simulation results varying with the AOD and H at 365 nm. (a) TOA normalized radiance; (b) TOA normalized polarized radiance

量差异。总的来说,随着 388 nm 波段的偏振信息加入,DFS 平均提高了 0.10;而多波段强度联合反演中,DFS 则平均提高了 0.09。

图4采用直方图的形式进一步展示了不同方案下 ALH 反演的 DFS 和后验误差,误差棒则分别对应了四组不同的观测几何。图4中灰色底柱表示先验估计误差 $H = 1.5$ km,由此可以得到通过信息量计算后的后验误差降低值。由图可知,随着强度和多通道测量信息的加入,在细模式下绝对后验误差由 1.07 km 降至 0.60 km;粗模式下,绝对后验误差由 1.20 km 降至 0.81 km;进一步表明,偏振和多波段联合反演使得卫星多角度观测 ALH 反演得到有效约束。整体上来看,随着多波段测量信息与偏振信息的加入,ALH 的 DFS 得到了显著提升,后验误差逐渐降低。对于两种气溶胶类型(沙尘型和城市污染型),在大多数情况下,反演性能都相当好。但在某些观测几何下,比如在裸土表面(亮地表)以及粗模态气溶胶条件下 ALH 反演可能会有一些困难 ($DFS < 0.5$)。

3.2.2 观测角度数量的影响

卫星观测几何所决定的散射角大小往往决定了瑞利散射和气溶胶散射,其对 ALH 反演有着重要影响^[5]。基于传感器的多角度观测模式,应确定观测角度个数获得信息是否满足用于状态向量反演。因此,本研究分析了 ALH 参数信息量与多角度反演中包含的观测角度数的依赖关系。当反演涉及多个视角的观测时,根据由雅可比矩阵量化辐射强度对 H 由最高(星下点)至最低来选择角度。通过这种方法,将反演中

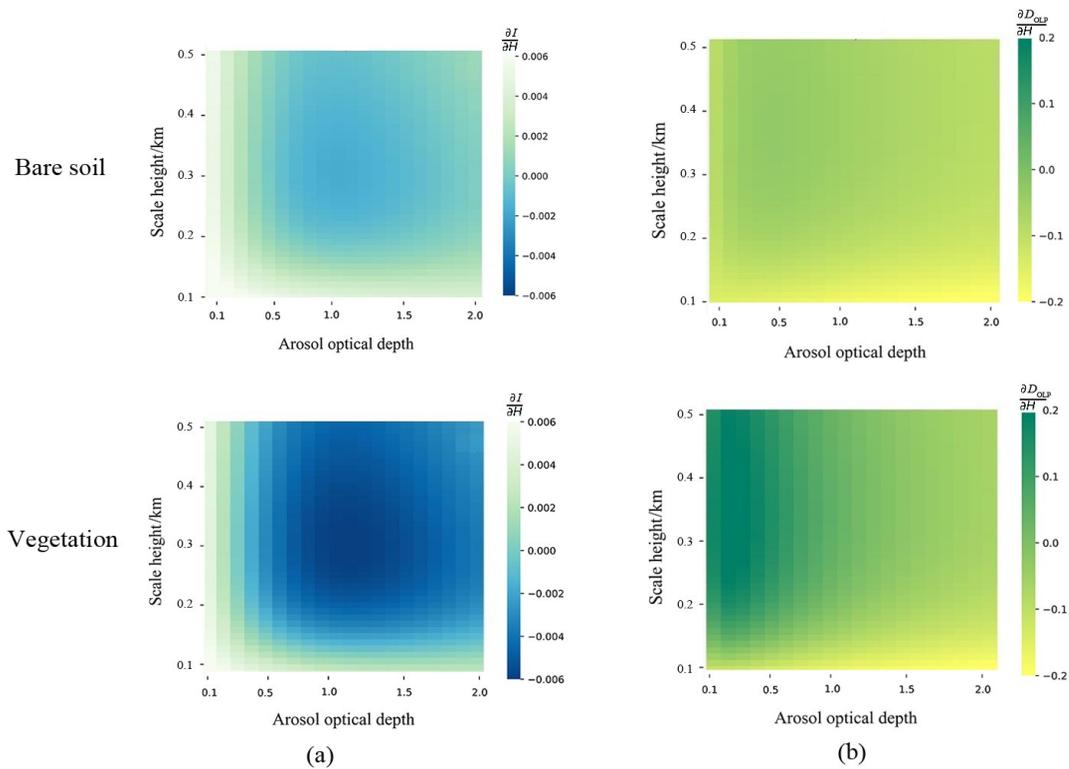


图 3 365 nm 波段雅可比结果 I 和 D_{OLP} 随 AOD、 H 变化。(a) $\frac{\partial I}{\partial H}$; (b) $\frac{\partial D_{OLP}}{\partial H}$

Fig. 3 The Jacobians results for I and D_{OLP} varying with the AOD, H at 365 nm. (a) $\frac{\partial I}{\partial H}$; (b) $\frac{\partial D_{OLP}}{\partial H}$

表 5 B-I、B-IP 与 AB-I 方案下 ALH 的 DFS

Table 5 DFS of ALH at B-I、B-IP and AB-I scheme

Surface type	Aerosol Scenarios	DFS		
		B-I	B-IP	AB-I
Vegetation	Fine-dominated	0.64	0.68	0.71
	Coarse-dominated	0.51	0.55	0.60
Bare soil	Fine-dominated	0.44	0.60	0.54
	Coarse-dominated	0.30	0.47	0.40

包含的 1~5 个角度的 B-IP 观测方案与 AB-I 方案进行比较。图 5 给出了当反演中使用的角度数从 1 增加到 5 时信息量的变化, 误差棒则分别对应了粗、细粒子主导的两种气溶胶类型。其中, ALH 的 DFS 在裸土地表上增加最多, DFS 增量在 0.18~0.36 范围内。而在植被地表上, DFS 增量均不超过 0.28。这是因为在表面反射率较低的表面上, 观测信息对 ALH 的敏感度相对较低。另一方面, 本研究也关注满足 ALH 反演的最小角度数。在实际的多角度观测模式中, 如果多个角度注视同一目标, 考虑到观测时间有限, 其空间覆盖或目标总数将减少。所以有必要找到最佳角度数在保持较高 ALH 信息量的同时, 减少不同场景下每个目标的观察时间。从图 5 可以看出, 随着观测角度的增加, 信息量的增加逐渐减少; 而当从观测角度数由 1 个增加至 3 个时, 增量最大。因此, 基本满足 ALH 反演的最佳角度为 3 个。

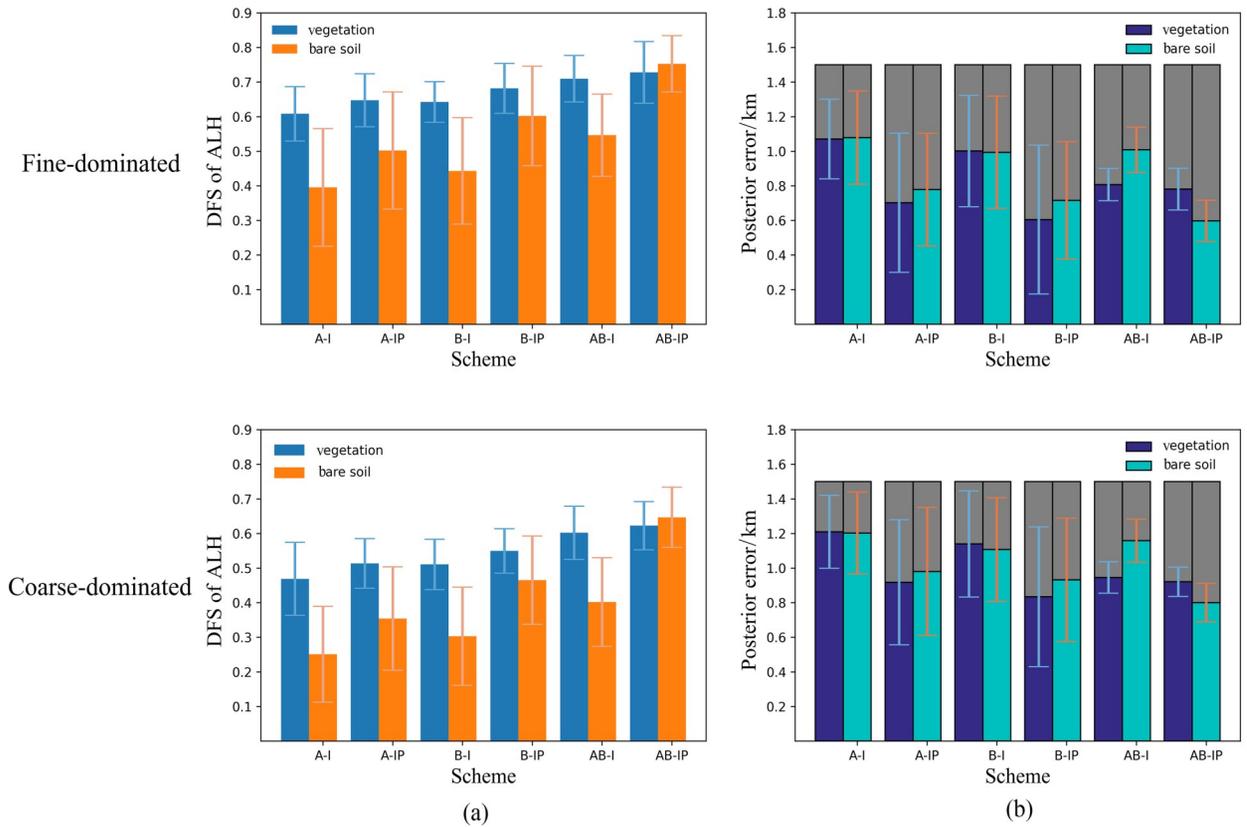


图 4 不同实验场景下气溶胶层高的DFS (a) 与后验误差 (b)

Fig. 4 The DFS (a) and posterior error (b) of ALH for different experiments scheme

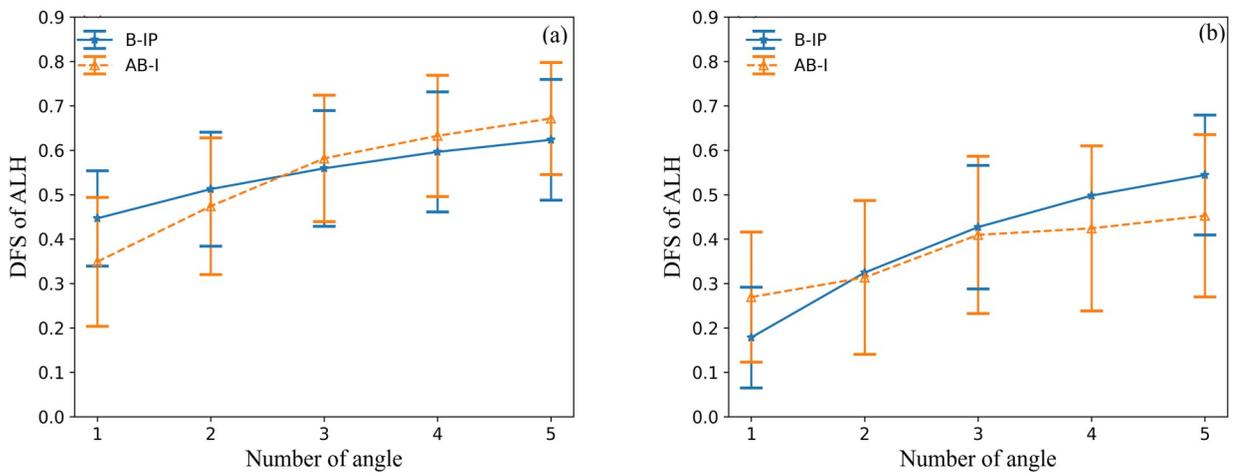


图 5 不同地表类型下气溶胶层高DFS随观测角度个数变化。(a) 植被地表; (b) 裸土地表

Fig. 5 The DFS of ALH changes with the number of viewing angles under different surface types. (a) Vegetation surface; (b) bare soil surface

3.2.3 气溶胶光学厚度变化的影响

采用与图4相同的参数设置, 在图6中显示了随着气溶胶光谱厚度 AOD 从 0.1~2.0 时, ALH 反演信息量在不同气溶胶与地表条件下的变化。由图6可以看出, 无论何种条件下, ALH 的DFS 随着 AOD 的增加而

增大, 表明高 AOD 条件下可以更容易地进行 ALH 反演; 当 $AOD > 0.8$ 时, 信息量增长变慢, 逐渐趋于平稳。在细模态气溶胶条件下, B-IP 方案总体上优于 AB-I (在植被地表上且当 $AOD < 0.8$ 时除外), 但两个方案的 DFS 差异小于 0.1。而对于粗模态主导的气溶胶类型以及植被地表上, AB-I 方案优于 B-IP, DFS 差异最大也仅为 0.13。细模态主导下 ALH 信息量明显大于粗模态情况, 整体提升约 0.08。AB-I 与 B-IP 两种方案均有效地提升了 DFS, 分别在粗、细模态下具有优势; 但整体来看, B-IP 比 AB-I 方案的 DFS 增量更大, 尤其改善了低 AOD 条件 ($AOD < 0.8$) 时的 ALH 反演。

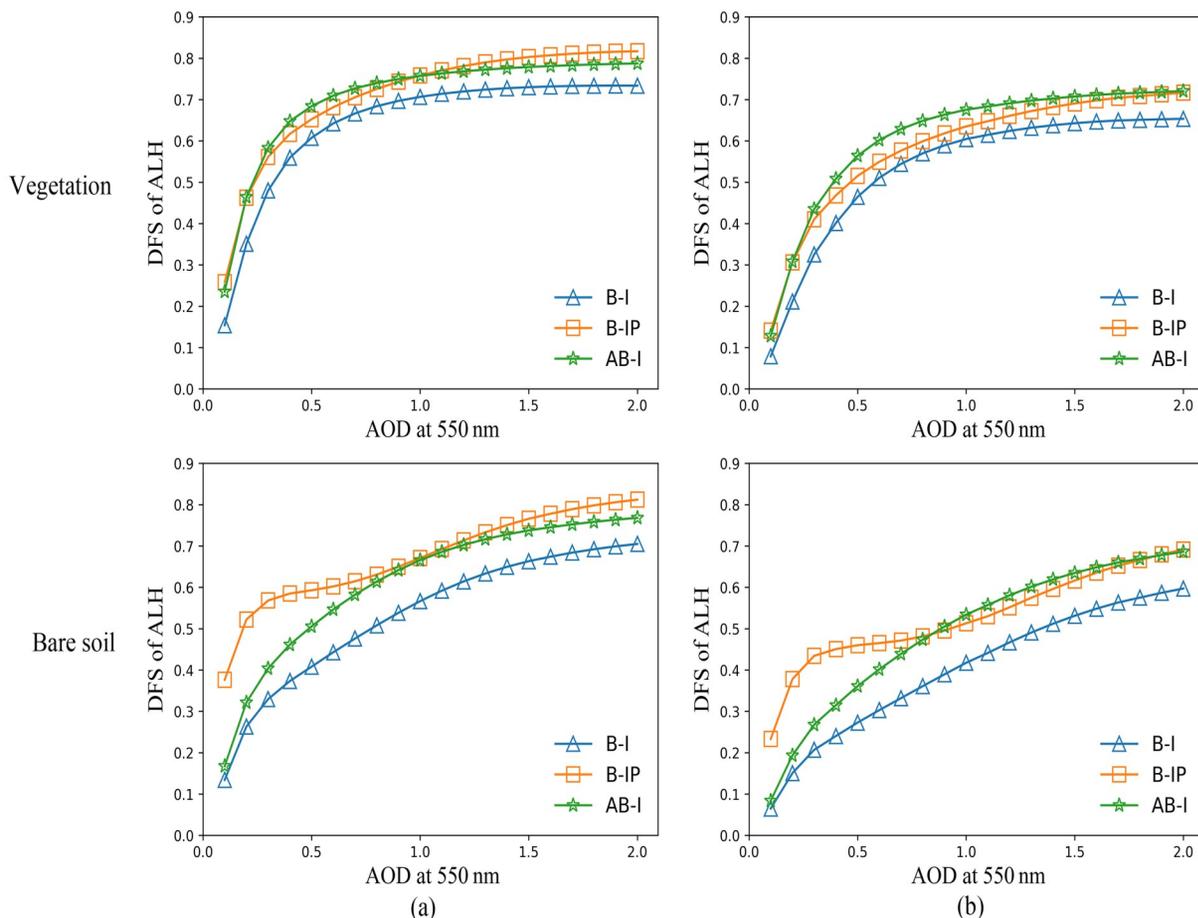


图 6 不同场景下气溶胶层高 DFS 随 AOD 变化。(a) 细模态主导; (b) 粗模态主导

Fig. 6 The DFS of ALH varying with AOD at different scenarios. (a) Fine-dominated aerosol; (b) coarse-dominated aerosol

3.2.4 气溶胶模型误差的影响

卫星气溶胶反演算法需要基于一定的先验知识, 例如, ALH 反演需要假定气溶胶类型^[21,22]。然而, 先验知识往往存在一定的误差。根据式 (17) 中非状态向量的定义, 分析了气溶胶模型误差导致的 DFS 变化。如第 2.3 节中所定义的恒定误差相似, 假设气溶胶模型先验误差变由 5% 逐渐递增至 100%。由图 7 可得, ALH 反演的 DFS 随着气溶胶模型误差的增加而减小。其中, 细模态主导下的植被地表上, DFS 下降最多达 0.6 左右, 两种方案之间的差异小于 0.09。此外即使气溶胶模型的误差达到 100%, B-IP 方案在大多数情况下仍可以反演 ALH (即 $DFS > 0.5$)。通过对比两种观测方案, 气溶胶模型误差在粗模态主导条件下, B-IP 方

案的ALH反演误差影响相对较小。在传感器的实际反演中,应考虑设计迭代程序以降低使用较差(如模型先验误差超过100%)的预设气溶胶模型的概率。

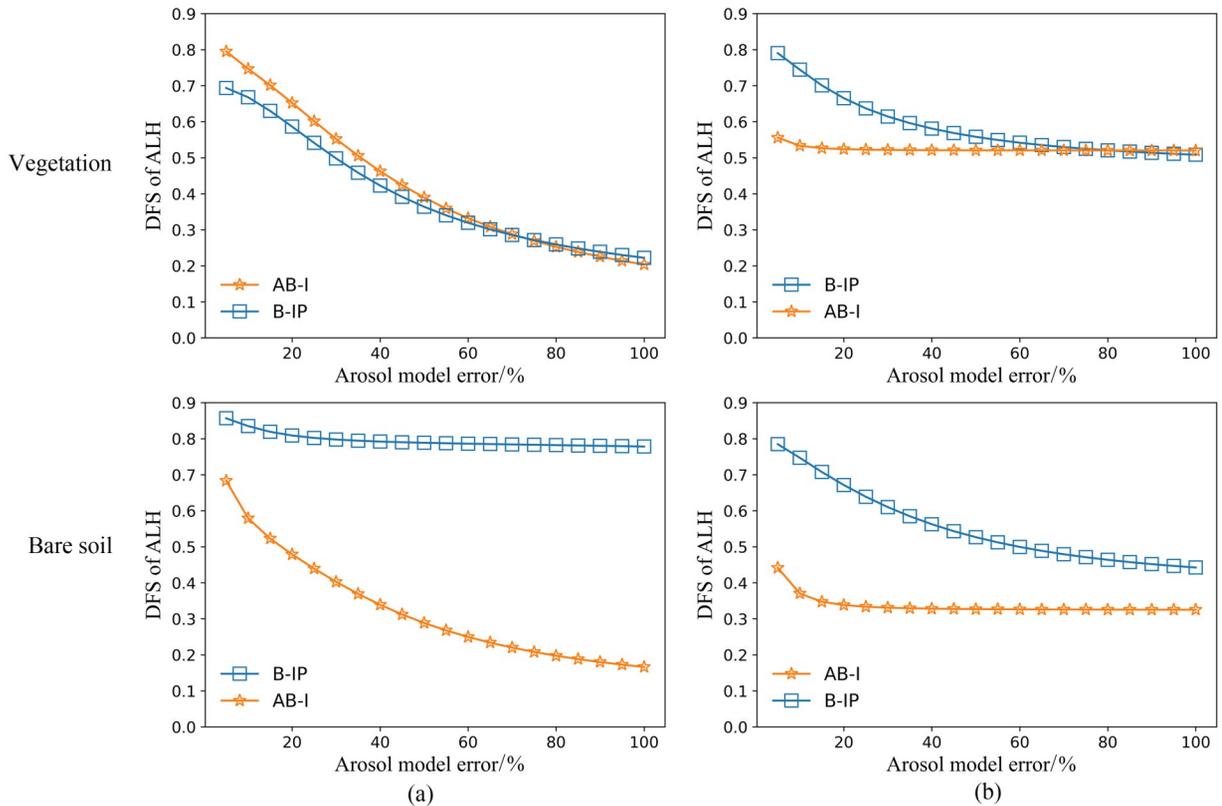


图7 不同场景下气溶胶层高DFS随气溶胶模型误差的变化。(a)细模态主导;(b)粗模态主导

Fig. 7 The DFS of ALH varying with aerosol model errors at different scenarios. (a) Fine-dominated aerosol; (b) coarse-dominated aerosol

4 结论

基于信息量分析方法,通过设置不同的气溶胶类型(粗、细模态主导),不同的AOD(0.1~2.0),以及变化的地表类型(植被、裸土地表)和多角度的观测几何(夏至和冬至高低太阳角),对紫外多角度偏振观测进行了模拟仿真,研究结果表明:

1) 根据模拟仿真数据及其信息量分析可得,当 H 为2~3 km时,卫星观测的雅可比值更大,对ALH信息的探测更加敏感;而对于两种气溶胶类型(沙尘型和城市污染型),在大多数情况下,多角度偏振观测可以很好地反演ALH信息。

2) 卫星观测信息量随观测角度个数的增加显著提升:当观测角度从1个增至5个,ALH的DFS平均提升在0.4以上。表明传感器多角度观测对ALH反演具有重要提升作用。

3) 对于添加388 nm波段偏振观测或365 nm强度观测两种观测方案来说,均提升了ALH的DFS,且分别在粗、细模态下具有优势;但总的来说,B-IP(添加388 nm波段偏振观测)方案相对更好,即使在粗模态下,与AB-I(添加365 nm波段强度观测)方案DFS差异仍小于0.1,同时B-IP方案相较之下改善了低气溶胶光学厚度(AOD < 0.8)时的ALH反演。

4) 综合不同的气溶胶和地表条件,随着气溶胶模型误差分别增加至40%和60%左右时,AB-I和B-IP两种方案将较难反演ALH ($DFS < 0.5$),同时也表明偏振测量方案受气溶胶模型反演误差影响相对较少。

本研究是在气溶胶和地表模型部分参数已知框架下,综合考虑了反演参数的误传递进行信息量计算。在后续的工作中将进一步论证同时进行多参数(包括气溶胶、地表参数)联合反演的可能。

致谢:衷心感谢 UNL-VRTM(www.unlvrtm.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。

参考文献:

- [1] Pachauri K, Meyer A. Climate change 2014: Synthesis report [C]. 2014 IEEE International Professional Communication Conferencen, Octobert 13-15, 2014, Pittsburgh, PA, USA. IEEE, 2014.
- [2] Cheng L L. *A Sensitivity Study on the Retrieval of Aerosol Vertical Profiles Using the Polarimetric Oxygen A-Band Spectra* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
程璐璐. 氧A带偏振测量气溶胶垂直剖面信息反演的灵敏度研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.
- [3] Wu K Y, Hou W Z, Shi Z, *et al.* Research progress of aerosol remote sensing retrieval algorithm based on satellite multi-angle observation [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(4): 283-298.
吴孔逸, 侯伟真, 史正, 等. 基于卫星多角度观测的气溶胶遥感反演算法研究进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(4): 283-298.
- [4] Wang J, Xu X G, Ding S, *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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Torres O, Bhartia P K, Herman J R, *et al.* Derivation of aerosol properties from satellite measurements of backscattered ultraviolet radiation: Theoretical basis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D14): 17099-17110.
- [8] Rodgers C D. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice* [M]. Singapore: World Scientific, 2000: 256.
- [9] Hou W Z, Li Z Q, Wang J, *et al.* Improving remote sensing of aerosol microphysical properties by near-infrared polarimetric measurements over vegetated land: Information content analysis [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(4): 2215-2243.
- [10] Gu H R, Li Z Q, Hou W Z, *et al.* Information content analysis on passive remote sensing imaging retrieval of aerosol layer height based on spaceborne polarization crossfire [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 0601003.
顾浩然, 李正强, 侯伟真, 等. 基于星载偏振交叉模式的气溶胶层高被动遥感成像反演信息量分析[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0601003.
- [11] Xu X G, Wang J. *UNL-VRTM, A Testbed for Aerosol Remote Sensing: Model Developments and Applications* [M]. Springer Series in Light Scattering. Cham: Springer International Publishing, 2019: 1-69.
- [12] Li Z Q. *Study on Atmospheric Aerosol by Multi-Angle and Polarization Detection of Ground Spectrum* [D]. Hefei: Anhui

- Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- 李正强. 地面光谱多角度和偏振探测研究大气气溶胶 [D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2004.
- [13] Wendisch M, Yang P. Theory of Atmospheric Radiative Transfer: A Comprehensive Introduction [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2012: 57.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, *et al.* Directional Polarimetric Camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 21-37.
- [17] Gordon H R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 17081-17106.
- [18] Xu X G, Wang J, Wang Y, *et al.* *Passive Remote Sensing of Aerosol Height* [M]. Remote Sensing of Aerosols, Clouds, and Precipitation. Amsterdam: Elsevier, 2018: 1-22.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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 Physical Sinica*, 2019, 68(4): 040701.
郑逢勋, 侯伟真, 李正强. 高分五号卫星多角度偏振相机最优化估计反演: 角度依赖与后验误差分析 [J]. *物理学报*, 2019, 68(4): 040701.
- [22] Gu H R, Zhang Y H, Fan C *et al.* A comprehensive analysis of ultraviolet remote sensing for aerosol layer height retrieval from multi-angle polarization satellite measurements [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(24): 6258.