

文章编号 1004-924X(2026)11-1639-13

基于GF-5(02)卫星偏振成像载荷氧A带观测的 云顶压强及地表高程重构

顾浩然^{1,3}, 李正强^{1,3,4*}, 许允福², 张子晗¹, 李莉^{1,3}, 马龔¹, 姚前^{1,3}

(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. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 河南大学地理科学与工学部 空间基准全国重点实验室, 河南 郑州 450046)

摘要: 为了实现云顶压强获取与地表高程的重构, 提出一种基于卫星偏振成像载荷数据的压强-高程参数反演方法。基于GF-5(02)卫星DPC传感器观测, 利用氧气A吸收带对大气路径长度的敏感性, 建立压强与观测量之间的非线性映射关系, 实现云顶压强反演; 并结合大气压强与高度的物理关系, 进一步完成地表高程重构实验。针对反演过程中的关键影响因素, 系统分析了地表高程误差、气溶胶光学厚度及大气光学质量的影响。实验结果表明, 在祁连山地区的多角度稳定性验证中, 压强反演平均变异系数约为3.98%, 整体波动控制在8%以内, 该方法具有较好的稳定性。在阿拉伯半岛西部阿西尔山区域的DEM对比验证中, 反演压强与DEM估算压强的相关系数为0.91, RMSE约为28.6 hPa; 进一步转换得到的高程重构结果与DEM的相关系数约为0.93, RMSE约为0.23 km, 能够有效反映区域地形起伏特征。敏感性分析表明, 气溶胶光学厚度在0.4~2.0内对反演误差影响较小(约1%以内), 而高度扰动影响显著, 在±10%扰动条件下压强相对误差约为1%~8%。综上所述, 本文验证了基于卫星偏振成像载荷数据实现云顶压强与地表高程反演的可行性, 探索了未来高分辨率、高光谱与高偏振一体化观测条件下的三维重建方案。

关键词: 多角度偏振传感器; 云顶压强; 氧A吸收带; 差分吸收光谱

中图分类号: P424 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20263411.1639

CSTR: 32169.14.OPE.20263411.1639

Cloud top pressure retrieval and surface elevation reconstruction using oxygen a-band observations from GF-5(02) polarimetric imaging instrument

GU Haoran^{1,3}, LI Zhengqiang^{1,3,4*}, XU Youfu², ZHANG Zihan¹, LI Li^{1,3}, MA Yan¹, YAO Qian^{1,3}

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

2. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100083, China;

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

4. State Key Laboratory of Spatial Datum, Faculty of Geographical Science and Engineering,
Henan University, Zhengzhou 450046, China)

收稿日期: 2026-04-03; 修订日期: 2026-04-21.

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项资助项目(No. 2025ZD1200900)

* Corresponding author, E-mail: lizq@aircas. ac. cn

Abstract: A retrieval method for pressure-elevation parameters based on satellite polarization imaging data is developed in this study, aiming to retrieve cloud-top pressure and reconstruct surface elevation. Based on observations from the DPC instrument onboard the GF-5(02) satellite, the sensitivity of oxygen A-band absorption to atmospheric path length is used to establish a nonlinear mapping relationship between pressure and observed signals, thereby enabling cloud-top pressure retrieval. Furthermore, by incorporating the physical relationship between atmospheric pressure and altitude, surface elevation reconstruction is achieved. Key factors affecting the retrieval process are systematically analyzed, including surface elevation errors, aerosol optical thickness, and atmospheric air mass. The results show that, in the multi-angle stability validation over the Qilian Mountains, the mean coefficient of variation of the pressure retrieval is approximately 3.98%, with overall fluctuations limited to within 8%, indicating good stability of the proposed method. In the DEM-based validation over the Asir Mountains in western Saudi Arabia, the retrieved pressure shows a correlation coefficient of 0.91 and an RMSE of approximately 28.6 hPa compared with DEM-derived pressure. The reconstructed elevation further shows a correlation coefficient of approximately 0.93 and an RMSE of about 0.23 km compared with DEM, effectively reflecting regional topographic variations. Sensitivity analysis indicates that aerosol optical thickness in the range of 0.4-2.0 has a limited impact on the retrieval error, generally within about 1%, whereas elevation perturbations exert a more significant influence. Under $\pm 10\%$ elevation perturbations, the relative pressure error ranges from approximately 1% to 8%. Overall, this study verifies the feasibility of retrieving cloud-top pressure and reconstructing surface elevation based on satellite polarization imaging data, and provides a basis for future three-dimensional reconstruction schemes under integrated observations with high spatial, spectral, and polarization resolution.

Key words: multi-angle polarimetric instrument; cloud-top pressure; oxygen A absorption band; differential absorption spectroscopy

1 引言

偏振探测信息能够反映光在目标表面及大气中的散射与反射特性,其偏振状态与目标表面法向及介质结构密切相关,通过建立偏振观测量与表面法向之间的物理关系,可恢复目标表面形貌特征^[1-2]。然而,偏振观测中存在法向量多解性及尺度不确定性,故该方法主要适用于近距离、小尺度场景,在大范围对地观测中的应用仍然受限。

随着星载光学传感器向多光谱、多角度及高空间分辨率方向发展,利用遥感观测获取大范围垂直信息成为重要的研究方向^[3]。相较于精细三维形貌重建,在卫星大尺度条件下获取宏观高度信息具有可行性。因此,可将高度问题由“几何重建”转化为“物理反演”。在一定假设条件下,

大气压强与高度之间具有稳定的对应关系,使压强成为表征目标垂直位置的重要物理量。通过反演云顶压强(Cloud Top Pressure, CTP),不仅可以实现云体高度的间接获取,还可在晴空条件下拓展至地表表面压强反演,从而为地表高程信息恢复提供统一的物理基础^[4]。

目前,云顶压强反演中,氧气 A 吸收带法因其明确的物理机理而得到广泛应用^[5-9]。该方法利用氧气分子对太阳辐射的吸收效应,通过选取吸收通道(如 763 nm)与参考通道(如 765 nm),构建反射率比值以表征光子的有效传播路径,从而建立观测辐射与压强之间的函数关系^[10-11]。该方法对目标垂直位置具有直接敏感性,在中高云条件下具有较好的精度与稳定性,并已应用在 POLDER, SCIAMACHY 及 GF-5 等传感器上^[12-14]。例如,基于 POLDER/PARASOL 的多

角度偏振观测与氧气 A 带协同反演的研究表明,偏振信息与氧气吸收信息的联合使用可提升云顶压强反演的稳定性,其结果与 CALIOP-CTP 对比的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 约为 205.18 hPa^[15];基于 DPC/GF-5 氧气 A 带观测的云顶压强反演结果与 MODIS 云顶压强产品对比时,二者在空间分布具有较好一致性, RMSE 约为 98.6 hPa^[12];同时,基于 TROPO-MI 氧气 A/B 吸收带反演及相关高光谱偏振研究表明,高光谱吸收信息、关键光谱波段与偏振信息能够为云顶参数及其他遥感参数反演提供更丰富的观测约束^[8,16-17]。

因此,氧气 A 带在云顶压强反演中具有较好的应用基础。DPC/GF-5(02)相比于上述传感器,在观测角度数和空间分辨率方面均有所提升,但其在云顶压强反演能力尚未得到充分评估。本研究以高分五号 02 星 (GF-5(02)) 搭载的多角度偏振相机 (Directional Polarimetric Camera, DPC) 观测数据为基础,构建基于氧气 A 吸收带的云顶压强反演方法。通过建立 763 nm 与 765 nm 波段反射率比值与云顶压强之间的定量关系,实现云顶压强反演。进一步将该方法拓展至晴空地表表面压强估计,并结合大气压强与高度之间的物理关系实现地表高程重构。最后,通过与数据地表高程模型真值产品 (Digital Elevation Model, DEM) 对比验证精度,探讨了基于星载传感器瞬时观测获取大范围地表高程的可行性,分析了面向未来高空间分辨率、高光谱、高偏振 (三高) 光学体制的三维重建应用潜力。

2 研究数据

2.1 DPC/GF-5(02)数据

高分五号 02 星 (GF-5(02)) 是高分系列业务卫星之一,于 2021 年 9 月 7 日在中国山西省太原卫星发射中心成功发射升空。作为一颗降交点太阳同步轨道卫星,过境时间为当地时间上午 10:30,GF-5(02) 搭载了可见短波红外光谱相机 (Advanced Hyperspectral Imager, AHSI)、全谱段光谱成像仪 (Visual and Infrared Multispec-

tral Imager, VIMI)、大气主要温室气体探测仪 (Gas Measurement Instrument, GMI)、大气痕量气体差分吸收光谱仪 (Environmental Trace Gases Monitoring Instrument, EMI)、DPC 等传感器,具备对陆地生态、水体、大气污染物的综合观测能力。

图 1 为卫星及传感器正样示意图。单一像元的最多观测角数进一步增加至 17 个,星下点空间分辨率约为 1.7 km^[18]。DPC 通过沿轨多角度成像方式获取同一目标在不同观测几何条件下的辐射信息,并采用滤光片与偏振片组合实现多光谱及偏振联合观测^[19-21]。传感器波段覆盖 443~865 nm,其中 443~865 nm 波段主要用于云与气溶胶参数反演,910 nm 波段用于水汽探测;763 nm 和 765 nm 氧气 A 吸收波段可用于云顶压强反演。本研究所用 DPC L1B 数据由中国资源卫星应用中心提供 (<https://data.cresda.cn/>, 访问日期:2025-06-30)。



图 1 GF-5(02)卫星及 DPC 传感器示意图

Fig. 1 Installation diagram of GF-5 (02) satellite and DPC polarization instruments

为保证卫星数据的反演质量,本文对 DPC-L1B 数据进行了预处理。由于传感器未配备在轨辐射定标系统,首先采用基于瑞利散射、沙漠场及海洋耀斑的综合替代定标方法对 763 nm 和 765 nm 波段进行辐射定标^[22-23]。此外,参考已有 DPC 数据云检测与像元筛选方法^[20-21],引入归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 作为冰雪及异常强反射像元的辅助判据。当 NDVI < 0.04 时,将该像元判定为冰雪或强反射异常像元并剔除,从而降低非目标像元对反演的影响。

表 1 DPC 传感器波段设置

Tab. 1 Setting of each DPC spectral channel

| 通道编号 | 中心波长/nm | 波段宽度/nm | 探测参数 |
|------|---------|---------|------------|
| B1 | 443 | 20 | 气溶胶、海洋水色 |
| B2 | 490 | 20 | 云、气溶胶 |
| B3 | 565 | 20 | 地表反照率 |
| B4 | 670 | 10 | 气溶胶、云 |
| B5 | 763 | 40 | 云、气溶胶层高 |
| B6 | 865 | 40 | 气溶胶、云、地表特征 |
| B7 | 910 | 20 | 水汽、大气校正 |

2.2 SRTM DEM 数据

忽略不同气压带和气象因素对于气压的影响,海拔高度与大气压强存在着稳定的对应关系。因此,这里利用该反演方法得到陆地晴空区域的地表压强,并与利用数字高程模型估算的地表压强进行对比,以此验证算法反演结果的可靠性。本研究使用 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数字高程模型作为地形数据来源^[24]。SRTM-DEM 由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提供,具有全球近地表高程覆盖能力,空间分辨率为 30 m,垂直精度优于 10 m,适用于区域尺度地形分析与压强估算(访问地址: <https://earthexplorer.usgs.gov/>,最后访问日期:2026-01-03)。

为与 DPC 反演结果保持一致,需对原始 DEM 数据进行空间重采样。按照 DPC 空间分辨率 3.3 km 建立空间网格,以每个 DPC 像元空间覆盖范围为统计单元,计算该范围内原始 DEM 像元的平均高程,并作为对应像元的等效地表高程,从而降低空间分辨率差异引起的尺度不匹配误差。

3 研究方法

3.1 氧气 A 吸收带反演压强的基本原理

氧气 A 吸收带位于 760 nm 附近,是氧气分子在可见—近红外波段最强的吸收带之一。由于大气中氧气体积分数在对流层和平流层范围内基本保持稳定,其吸收强度主要取决于光程长度和大气压强分布,因此对大气垂直结构具有天然敏感性。当云体存在时,太阳辐射在云顶以上

大气层中传播并受到氧分子吸收调制,吸收强度随云顶高度的变化而变化。利用这一物理机制,可以建立吸收强度与云顶压强之间的对应关系。DPC/GF-5(02) 在氧气 A 吸收带设置两个吸收波段:一个是中心波长为 763 nm 的窄波段,覆盖大部分较强的氧气吸收光谱谱线;另一个是中心波长为 765 nm 的宽波段,覆盖氧气 A 吸收带的同时还覆盖了部分非吸收波段。图 2 为两个波段的光谱响应函数及 6SV 模拟的该波段整层大气氧气吸收透过率。

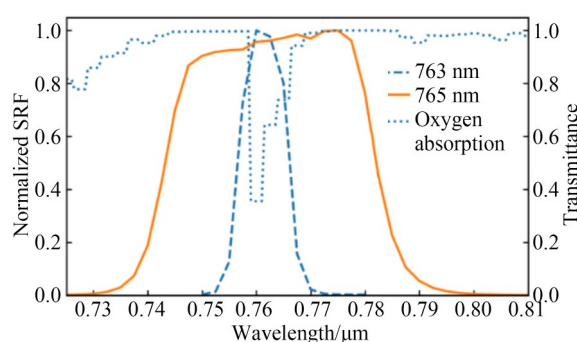


图 2 DPC/GF-5(02) 在 763 nm 和 765 nm 波段传感器光谱响应函数及 6SV 模拟的整层大气吸收透过率

Fig. 2 Sensor spectral response and total atmosphere oxygen transmittance simulated by 6SV in DPC/GF-5(02) 763 nm and 765 nm bands

从分子吸收机理出发,氧气 A 吸收带由大量离散谱线构成,总吸收系数可表示为各谱线吸收贡献的叠加形式。在压力展宽主导条件下,单条谱线可采用洛伦兹线型近似描述,则频率处的体吸收系数可表示为:

$$k(\nu) = \sum_{i=1}^N S_i \frac{a_i}{\pi (\nu - \nu_{0,i})^2 + a_i^2}, \quad (1)$$

其中:谱线强度 S_i 与温度有关,而谱线半高宽 a_i 主要受气压控制。则谱线强度随温度的变化可写为:

$$S_i = S_0 \frac{T_0}{T} \exp \left[1.439E \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (2)$$

谱线半高宽在压力展宽主导条件下与气压近似成正比,其表达式为:

$$a_i = a_0 \frac{P}{P_0} \sqrt{\frac{T_0}{T}}. \quad (3)$$

由此可见,氧气吸收不仅与温度相关,更直接受气压控制,因此对大气垂直结构具有物理敏感性。当太阳辐射在云顶以上大气中传播时,其

沿传播路径的吸收光学厚度为:

$$\tau(\nu) = \int_{z_c}^{z_i} k(\nu, z) ds, \quad (4)$$

其中: z_c 为云顶高度, z_i 为大气顶高度。根据比尔-朗伯定律, 透过率为:

$$T(\nu) = \exp[-\tau(\nu)]. \quad (5)$$

由于氧气在大气中的体积分数近似恒定, 其吸收主要由气体柱含量决定, 因此, 氧气 A 吸收带的光学厚度可表征云顶以上大气柱的累积量。在静力平衡条件下, 大气柱含量与压强具有对应关系, 使氧气吸收对压强具有直接敏感性。随着云顶高度升高, 上方大气柱增厚, 吸收增强、透过率降低; 反之, 则透过率升高。因此, 氧气 A 吸收带透过率与云顶高度之间存在稳定的单调关系, 为压强反演提供了可靠的物理基础。

3.2 基于辐射传输模拟的压强参数模型构建

星载观测条件下, 顶层大气反射信号不仅受到氧气吸收作用的影响, 还包含大气分子散射、气溶胶散射及云顶反射贡献组成。不透明云体不同波段的表观反射率可近似表示为:

$$R_{\text{TOA}}(\lambda) = R_{\text{rayleigh}}(\lambda) + R_{\text{aerosol}}(\lambda) + R_{\text{cloud}}(\lambda), \quad (6)$$

其中: $R_{\text{rayleigh}}(\lambda)$, $R_{\text{aerosol}}(\lambda)$, $R_{\text{cloud}}(\lambda)$ 分别为瑞利散射项, 气溶胶散射贡献及云顶散射贡献。在不考虑云层透过及云内多次散射影响条件下, 即云体近似视为不透明反射界面, 云顶反射贡献可用于表征云顶处的有效反射信号。需要指出的是, 对于薄云、半透明云等复杂云相条件, 云内多次散射和下垫面透射可能使氧气 A 带反演压强偏离真值。因此, 本研究主要适用于不透明云体及晴空地表条件, 未来将进一步结合云相识别、云光学厚度及偏振信息, 对不同云相条件下的反演开展修正。

此外, 在 763 nm 与 765 nm 两个氧气 A 吸收带

邻近波段内, 散射项变化小, 且地表反射率在该窄波段范围内通常变化相对平滑, 而两波段透过率差异主要来源于氧气吸收。因此, 构造两波段反射率比值, 以削弱散射项及不同下垫面绝对反射率差异对反演结果的影响。首先, 基于 763 nm 与 765 nm 氧 A 吸收波带测量值获得归一化的 Stokes 矢量, 进一步计算得到卫星大气层顶 (Top of Atmosphere, TOA) 表观反射率, 其表达式为:

$$R_{\text{TOA}} = \frac{\pi I}{E_0 \mu_s}, \quad (7)$$

其中: I 为 Stokes 矢量中的强度分量, E_0 为太阳常数 (大气层外太阳光谱辐照度), μ_s 为太阳天顶角太阳天顶角余弦, 定义比例公式如下:

$$X = \frac{R_{\text{TOA}}(763 \text{ nm})}{R_{\text{TOA}}(765 \text{ nm})}. \quad (8)$$

氧气在大气中的体积分数近似恒定, 其吸收光学厚度与大气路径上的分子数密度成正比, 而分子数密度进一步与大气压强相关。因此, 透过率可近似表示为压强的函数, 从而建立比值 X 与压强 P 之间的物理联系。考虑观测几何对传播路径的影响, 引入大气光学质量 m :

$$m = \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_v}, \quad (9)$$

其中: 大气光学质量表示不同角度入射和反射光路的光程差异, μ_s 为太阳天顶角的余弦, μ_v 为观测天顶角的余弦。

为了得到 X 与 P 的函数关系, 不考虑云层透过及内部多次散射的影响, 由 6SV-2.1 辐射传输模型^[25] 对比例系数 X 进行较为全面的模拟, 压强 P 为 1 013.2~75.6 hPa (对应海拔高度为 0~18 km), 开展包括热带大气、中纬度夏季、中纬度冬季、亚北极夏季、亚北极冬季大气廓线条件下的模拟, 具体参数设置如表 2 所示。

表 2 查找表构建的具体参数设置

Tab. 2 Setting of look up tables

| 参数 | 取值 | 参数数量 |
|----------------|---|------|
| 太阳天顶角 SZA | 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 | 7 |
| 观测天顶角 VZA | 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 | 7 |
| 相对方位角 RAA | 0, 45, 90, 135 | 4 |
| 550 nm 气溶胶光学厚度 | 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 | 4 |
| 海拔高度/km | 0, 1, 2, ..., 18 | 19 |
| 波长/nm | 763, 765 | 2 |
| 卫星观测 (输出) | TOA ₇₆₅ , TOA ₇₆₃ | 2 |

为降低拟合误差并提高模型稳定性,研究分别尝试了二次、三次和四次多项式拟合模型。结果表明,四次多项式能够有效降低拟合误差,并保持较好的模型稳定性。因此,本文从拟合精度考虑,最终采用四次多项式构建压强反演模型,如下:

$$\begin{cases} P = P_0 \sqrt{\frac{f(X)}{m}} \\ f(X) = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3 + A_4 X^4 \end{cases}, \quad (10)$$

其中: A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 分别为常数项、一次项、二次项、三次项和四次项。基于6SV辐射传输

模型,在不同太阳天顶角、观测天顶角、气溶胶光学厚度及地表高度条件下构建模拟数据集。不同太阳天顶角条件下的拟合结果如图3所示,四次多项式能够实现高精度拟合,所构建模型在不同观测几何条件下良好的适应性。

由于多项式系数 A_i 受观测几何条件影响显著,直接采用离散SZA对应的系数会导致模型在实际应用中的不连续性。为此,进一步分析各系数随太阳天顶角的变化规律。为避免离散SZA条件下模型的不连续性,对多项式系数 A_i 与 $\cos(SZA)$ 之间的关系进行拟合,结果如图4所示。各系数随 $\cos(SZA)$ 变

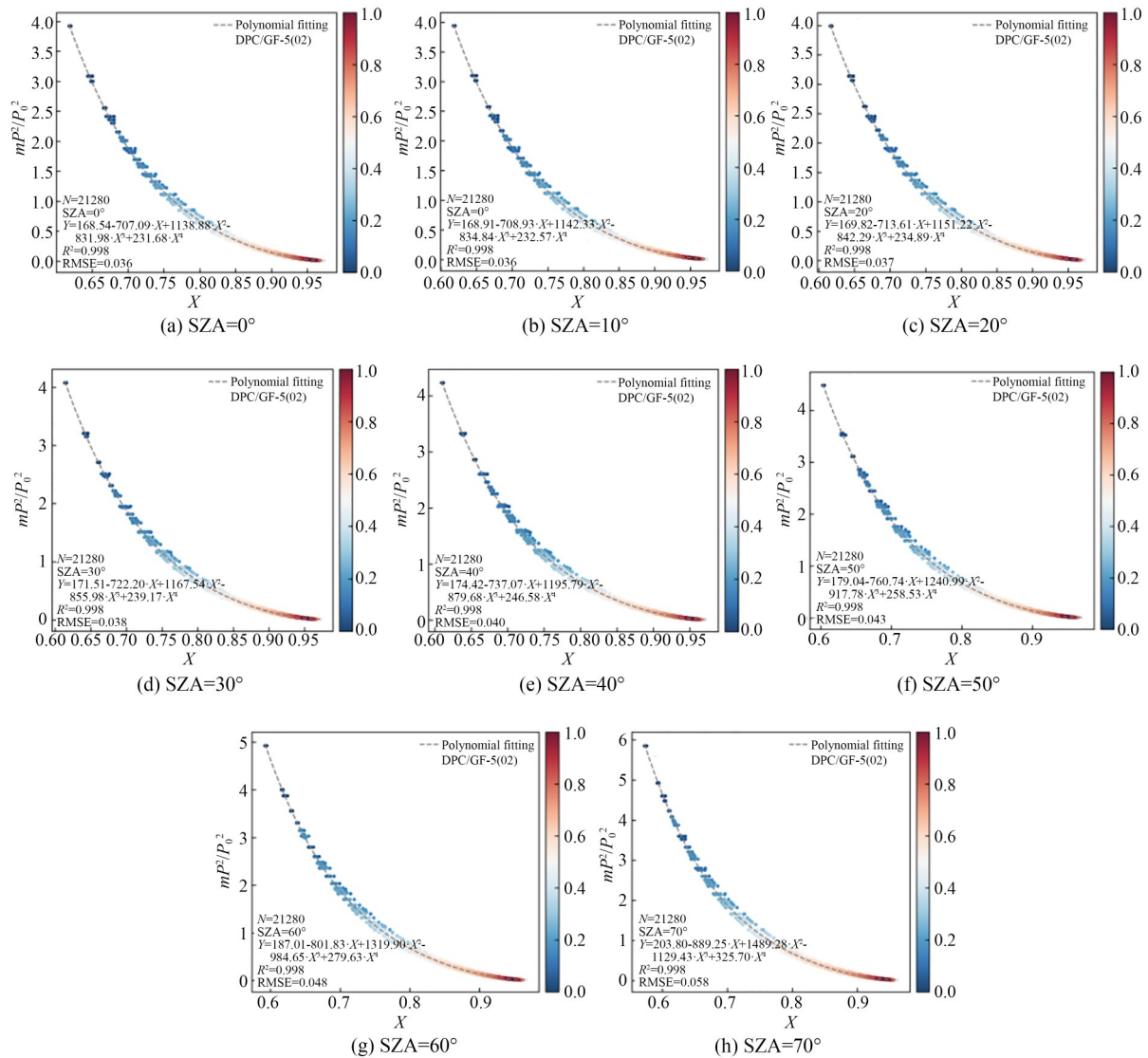


图3 不同太阳天顶角条件下 X 与 P 关系的多项式拟合结果

Fig. 3 Polynomial fitting results of relationship between X and P -related parameter under different solar zenith angles

化均呈现平滑的单调变化趋势,二次多项式即能够实现高精度拟合,具体转换系数如表 3 所示。

$$A_i = B_{1i} \cos^2(SZA) + B_{2i} \cos(SZA) + B_{3i}. \quad (11)$$

综上,本文构建的云顶压强与高程重构反演算法流程可概括为以下 4 个步骤:

(1)利用 6SV-2.1 辐射传输模型模拟不同观测几何、大气廓线、气溶胶光学厚度和高度条件下 763 nm 与 765 nm 波段的大气层顶表观反射

率,并计算反射率比值 X ;

(2)基于模拟结果建立 X 与压强 P 之间的四次多项式关系,获得初始模型系数 $A_0 \sim A_4$;

(3)进一步拟合模型系数 A_i 与 $\cos(SZA)$ 之间的关系,实现不同太阳天顶角条件下的系数转换;

(4)将系数转换后的压强模型应用于 DPC/GF-5(02)卫星观测数据,反演云顶压强或晴空地表压强,并结合压强-高度关系完成高程重构。

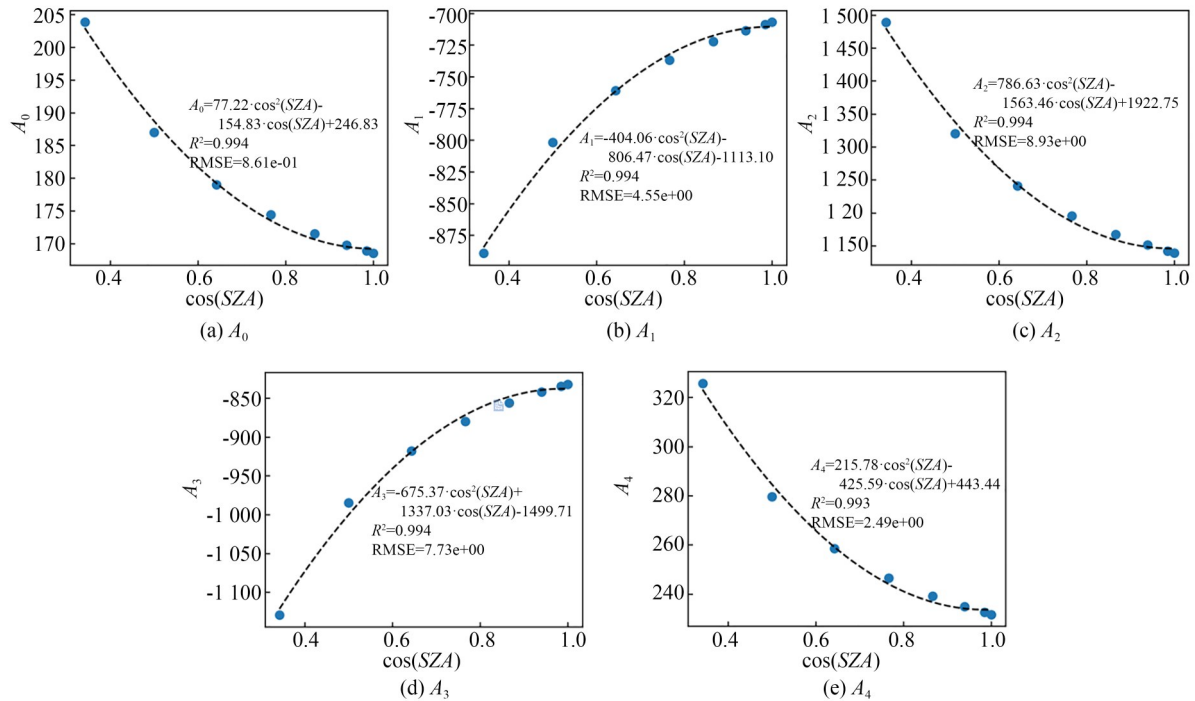


图 4 多项式拟合系数随 $\cos(SZA)$ 变化结果

Fig. 4 Variation of polynomial fitting coefficients with $\cos(SZA)$

表 3 多项式转换系数

Tab. 3 Coefficients of polynomial conversions

| 系数 | B_1 | B_2 | B_3 |
|-------|---------|----------|----------|
| A_0 | 77.22 | -154.83 | 246.83 |
| A_1 | -404.10 | 806.47 | -1113.12 |
| A_2 | 786.63 | -1563.46 | 1922.75 |
| A_3 | -675.37 | 1337.03 | -1499.71 |
| A_4 | 215.78 | -425.59 | 443.44 |

4 结果与讨论

4.1 反演算法多角度稳定验证

本文利用氧气 A 吸收波段方法比值来反演云顶压强(或表面压强),理论上可以用于任何下垫面(包括云顶或晴空地表)压强反演^[4]。因此,采用晴空地表时刻卫星观测对云顶压强(表面压强)反演算法进行原理性检验。

为验证所构建拟合反演公式在不同观测角度条件下的稳定性,选取 2022 年 12 月 17 日祁连

山地区卫星过境影像(纬度 $36^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$, 经度 $98^{\circ}\sim 99^{\circ}\text{E}$, 海拔约为: $2\,503\sim 4\,512\text{ m}$), 开展多角度一致性分析。该区域地形起伏明显、地表类型相对单一, 且在测试时段内无明显云覆盖, 适用于表面压强稳定性评估。利用 DPC/GF-5(02) 多角度观测数据, 分别计算不同观测角度下的表面压强反演结果, 并统计样本均值、标准差以及变异系数 CV 以评估角度间离散程度。其中, 均值与标准差定义为:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, \quad (12)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - \mu)^2}, \quad (13)$$

$$CV(\%) = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%. \quad (14)$$

统计结果如图 5 所示, 在 942 个有效样本中, 平均变异系数约为 3.98%, 大多数样本的 CV 分布集中在 3%~6% 之间, 整体波动控制在 8% 以内。不同观测角度下的云顶压强未表现出系统性偏移, 仅呈现有限的随机波动。这表明在引入光学质量因子及不同观测角度建模后, 观测几何变化对比例系数及压强映射关系的影响得到有效抑制。这主要源于观测天顶角或太阳天顶角增大, 大气光学质量 m 增加, 等效传播路径延长, 比例系数对压强变化的敏感度会略有降低, 从而导致角度间结果离散程度略有增加。然而在反演模型框架下, 该影响整体可控, 未表现出明显的放大趋势。由此表明, 所构建的反演模型在多角度观测条件下具有较好的稳定性和适用性。

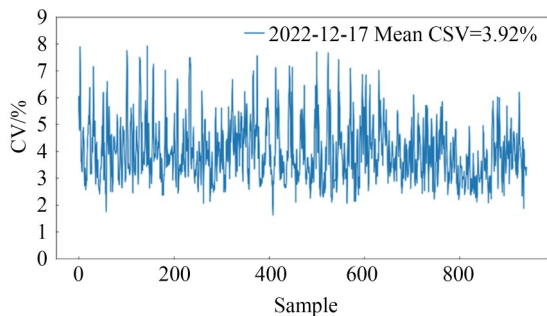


图 5 不同样本下 DPC 反演压强的变异系数

Fig. 5 Coefficient of variation for DPC retrieved pressure from different samples

4.2 基于 DEM 的地表压强验证与高程重构

除多角度稳定性测试外, 地表大气压强与海拔高度之间在准大气条件下存在稳定的函数映射关系, 因此可以利用地表高程数据对地表压强进行物理估算。只要给定地表高程, 就可以在标准大气假设下估算该处的地表压强。该方法使得 DEM 不仅是地形信息源, 也可作为地表压强的“物理基准”, 用于对氧气 A 带反演结果进行一致性检验。其表达式如下:

$$\begin{cases} P = P_0 \left(1 - \frac{Lh}{T_0}\right)^\alpha \\ P = \exp(5.25885 \ln(288.15 - 0.0065h) - 18.2573) \end{cases}, \quad (15)$$

其中: P_0 为标准海平面大气压, 取 $1\,013.25\text{ hPa}$, T_0 为海平面标准温度为 288.15 K , L 是对流层温度递减率海平面标准温度, 取 0.0065 K/m , α 为常数项, 为 5.255 。

本研究选取阿拉伯半岛西部阿西尔山(纬度 $36^{\circ}\text{N}\sim 37^{\circ}\text{N}$, 经度 $42^{\circ}\text{E}\sim 43^{\circ}\text{E}$, 海拔在 $585\sim 2\,934\text{ m}$) 作为验证场景, 如图 6 所示。该区域地形起伏显著且压强变化范围大, 有利于检验反演算法对气压变化响应能力。数据观测日期为 2022-07-03, 利用 DEM 数据估算计算得到地表压强, 并与氧气 A 吸收带反演得到的地表压强结果进行逐像元对比。由于压强与高度之间具有单调函数关系, 该模型亦可用于反推 DEM。对压强表达式进行反解。高度解析式如下:

$$h = \frac{T_0}{L} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/\alpha} \right] = \frac{288.15}{0.0065} \left[1 - \left(\frac{P}{1\,013.25} \right)^{1/5.255} \right]. \quad (16)$$

实验结果表明, 反演压强与 DEM 估算压强之间具有显著线性相关关系 ($R \approx 0.91$, $RMSE \approx 28.6\text{ hPa}$), 整体幅值一致性较好, 能够稳定表征区域尺度上的气压梯度变化。进一步将压强转换为等效高程后, 与 DEM 对比结果显示较高一致性 ($R \approx 0.93$, $RMSE \approx 0.23\text{ km}$), 说明氧气 A 吸收对气柱路径长度变化具有良好的响应能力。

从空间分布特征来看, 无论是压强还是高程分布, 反演结果均能够较好再现地形控制下的梯度结构: 高海拔区域对应低压分布, 低海拔区域

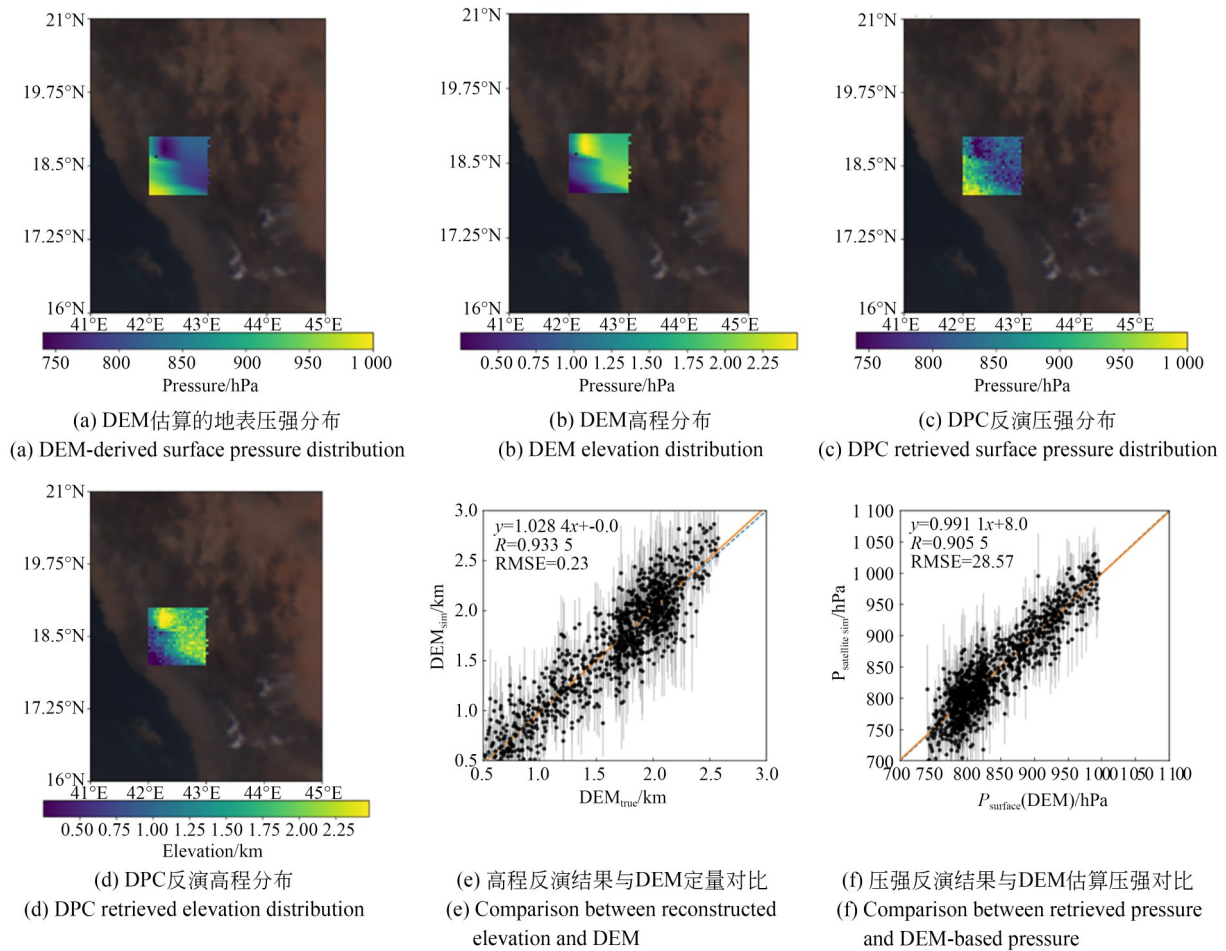


图 6 基于DEM的表面压强及高程与反演结果的对比分析

Fig. 6 Comparison between DEM-based surface pressure/elevation and DPC retrieved results

对应高压分布,整体呈现平滑且连续的空间变化趋势。需要指出的是,受限于空间分辨率差异,反演结果在格网尺度上表现为区域平均效应,像元内部地形起伏会引入反演误差。图6(e)~6(f)中,误差棒代表卫星传感器单像元内原始DEM高程及其换算压强的离散范围,用于表征像元地形起伏带来的尺度效应。尽管部分像元内部地形结构复杂,会引入一定的随机误差。但整体较好的线性拟合相关系数说明反演压强及其高程重构结果与DEM具有良好一致性,验证了该方法在地形起伏区域获取高度信息的有效性。

4.3 算法敏感性分析

4.3.1 大气气溶胶变化对反演误差的影响

为分析气溶胶光学厚度对压强反演结果的影响,图7给出了不同AOD条件下反演误差随大气光学质量 m 的变化情况。可以看出,在不同

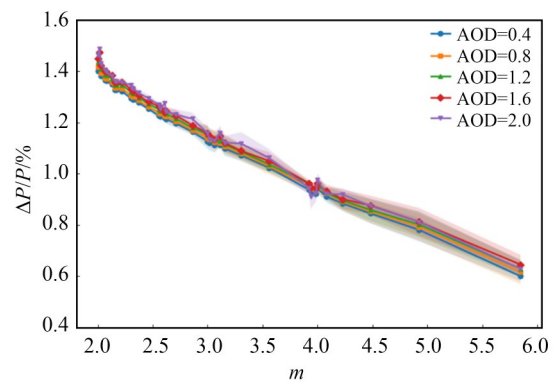


图 7 不同 AOD 条件下压强相对误差随大气光学质量的变化

Fig. 7 Variation of relative pressure error with air mass factor under different AOD conditions

AOD 条件(AOD在0.4~2.0)下,压强相对误差($\Delta P/P$)随 m 的变化趋势基本一致,均表现为随

m 增大而逐渐减小的单调变化特征。不同 AOD 条件下曲线几乎重合,仅在局部区间存在微小偏差,说明气溶胶含量变化对压强反演结果的整体影响较弱。

从物理机理上分析,压强反演主要依赖于分子散射信号及其对路径长度的响应,而气溶胶主要通过消光效应影响辐射传输过程。在当前观测波段及反演框架下,气溶胶对分子散射主导信息的扰动相对有限,因此它对压强反演结果的影响较弱。

4.3.2 高程偏差对压强反演误差的影响

为分析空间分辨率受限条件下像元内地形起伏对压强反演的影响,基于高度扰动实验构建敏感性实验(见图 8)。具体地,在每一基准高度 H 条件下,引入 $\pm 10\%$ 的相对误差扰动(0.9H 与

1.1H),以表征空间分辨率不足导致的像元内部实际高度偏差。由图 8 可见,在不同大气光学质量($m = 1.5 \sim 5.5$)条件下,反演压强与真值之间的相对误差($\Delta P/P$)随地表高度呈稳定单调增加趋势,且不同 m 区间结果高度一致,表明高度是影响压强反演精度的主导参数。低海拔(1~3 km)误差约为 $1\% \sim 3\%$,中等海拔(4~6 km)增至 $3\% \sim 5\%$,高海拔(7~10 km)进一步扩大至 $6\% \sim 8\%$,整体近似呈线性增长。

从物理机理上看,该特征主要源于压强随高度的指数衰减关系,使得相同绝对误差在高海拔区域表现为更大的相对误差;同时,反演模型中的非线性映射进一步放大了该效应。相比之下,不同 m 条件下误差差异通常小于 0.5% ,说明观测路径长度的影响相对较弱。在实际应用中,观

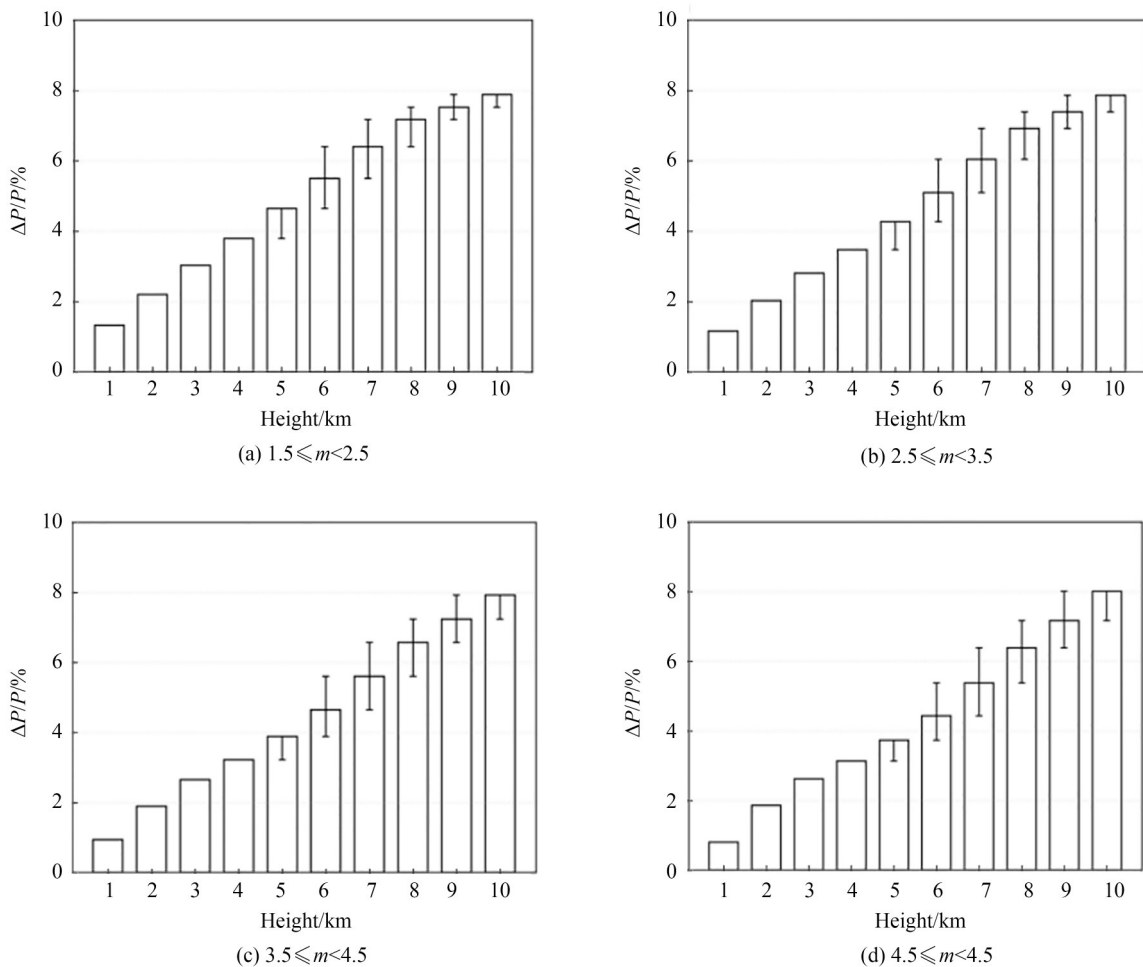


图 8 不同大气光学质量条件下高度误差对压强反演误差的影响

Fig. 8 Effect of elevation perturbation on pressure retrieval error under different air mass factor conditions

测像元较低空间分辨率会引入像元内部的非均匀性。当像元平均高度偏离真实有效高度约 $\pm(200\sim 500)\text{m}$ 时,会额外引入约 $1\%\sim 3\%$ 的压强相对误差,误差会在高海拔区域进一步放大。

图 8 表明,在空间分辨率受限条件下,高度扰动会显著影响压强反演结果,且该影响随高度的增加而增强。在复杂地形区域,提升卫星传感器空间分辨率、引入高分辨率 DEM 或开展子像元地形修正,对于降低误差传播、提升反演精度具有重要意义。

除上述影响因素之外,在实际反演中还可能受到观测噪声和辐射传输模型参数化误差的影响。传感器观测噪声可能引起 763 nm 与 765 nm 两波段反射率比值的微小波动,进而将误差传递至压强反演结果;辐射传输模型中大气廓线、气溶胶分布及云体散射假设的简化,也会带来一定误差。未来仍需结合更多区域样本和更精细的大气参数开展进一步的验证。

5 结 论

本文基于 GF-5(02) 卫星 DPC 传感器观测数据,构建了氧气 A 吸收带的云顶压强反演方法,并实现了由压强到地表高程的物理转换,验证了该方法在区域尺度三维高程信息获取中的可行性与稳定性。在方法上,利用 763 nm 与 765 nm 氧气 A 吸收带反射率比值建立压强反演模型,并引入大气光学质量进行归一化处理。通过辐射传输模拟与参数化建模,模型拟合误差控制在 1.5% 以内。结果表明,多角度一致性分析表明反演结果稳定可靠。基于多角度观测样本,压强反演结果的平均变异系数为 3.98% ,多数分布在 $3\%\sim 6\%$ 之间,整体波动小于 8% 。反演压强与

DEM 估算压强具有良好的线性关系(斜率为 0.99 , $R=0.91$, $RMSE=28.57\text{ hPa}$);进一步转换为高程后,与 DEM 的相关系数提升至 0.93 , $RMSE$ 约为 0.23 km ,能够较好再现地形控制下的空间结构特征。敏感性实验表明,气溶胶对反演结果的影响较弱,在不同大气光学质量观测条件下误差有限(约为 $0.6\%\sim 0.8\%$);而地表高度为主导误差来源。在 $\pm 10\%$ 高度扰动条件下,压强相对误差由 $1\%\sim 3\%$ 增至 $6\%\sim 8\%$,并随高度近似线性增长。此外,像元内 $\pm(200\sim 500)\text{ m}$ 的高度偏差可引入约 $1\%\sim 3\%$ 的额外误差。

综上,基于 DPC 传感器观测的压强反演方法能够稳定获取区域尺度压强信息,并实现地表高程的有效重构,为被动遥感条件下三维信息获取提供了一种新的技术路径。需要指出的是,当前方法仍受空间分辨率、复杂地形和云相条件限制,但随着未来偏振传感器空间分辨率进一步提升及氧 A 波段偏振观测能力以及辐射传输模型改进,有望进一步提升方法的精度和适用范围。

作者贡献声明:

顾浩然:数据处理与实验,论文构思与撰写;
李正强:测量方法提出,论文构思与撰写;
许允福:测量实验设计,数据整理和分析;
张子晗:模型优化与算法实现,论文审核与编辑写作;
李 莉:方法论完善与理论分析,论文审核与编辑写作;
马 龔:实验设计与数据分析,技术支持与软件实现;
姚 前:数据与计算资源支持,项目管理与组织协调。

参考文献:

- [1] MIYAZAKI D, KAGESAWA M, IKEUCHI K. Transparent surface modeling from a pair of polarization images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(1): 73-82.
 - [2] WOLFF L B. Polarization-based material classification from specular reflection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, 12(11): 1059-1071.
 - [3] 丁宁,于博,颜昌翔,等. 星载气溶胶被动光学遥感仪器:进展与未来展望[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1701002.
- DING N, YU B, YAN CH X, et al. Spaceborne aerosol passive optical remote sensing instruments: progress and future prospects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1701002. (in Chinese)

- [4] BRÉON F M, BOUFFIÉS S. Land surface pressure estimate from measurements in the oxygen a absorption band[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35(1): 69-77.
- [5] HANEL R A. Determination of cloud altitude from a satellite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(4): 1300.
- [6] PITERS A J M, BRAMSTEDT K, LAMBERT J C, *et al.* Overview of SCIAMACHY validation: 2002-2004 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(1): 127-148.
- [7] WEI L S, SHANG H Z, XU J, *et al.* Cloud top pressure retrieval using polarized and oxygen A-band measurements from GF5 and PARASOL satellites [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2024, 41(4): 680-700.
- [8] ZHANG X Y, WANG P, STAMMES P, *et al.* Cloud property retrieval based on DISAMAR using oxygen-A and oxygen-B band measurements by TROPOMI on sentinel-5P [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, 63: 4114715.
- [9] WANG W W, LETU H S, SHANG H Z, *et al.* A novel physics-based cloud retrieval algorithm based on neural networks (CRANN) from hyperspectral measurements in the O₂-O₂ band [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 311: 114267.
- [10] FERLAY N, THIEULEUX F, DAVIS A, *et al.* Utilizing the multiangular information of PARASOL oxygen A-band measurements to infer macro-physical properties of cloud structures [C]. *The AGU Fall Meeting, San Francisco, USA*, 2008.
- [11] FERLAY N, THIEULEUX F, CORNET C, *et al.* Toward new inferences about cloud structures from multidirectional measurements in the oxygen a band: middle-of-cloud pressure and cloud geometrical thickness from POLDER-3/PARASOL [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2010, 49(12): 2492-2507.
- [12] 乔瑞, 伽丽丽, 许华, 等. 基于高分五号 DPC 氧气 A 吸收波段的云顶压强反演 [J]. *大气与环境光学学报*, 2021, 16(3): 256-268.
- QIAO R, QIE L L, XU H, *et al.* Retrieval of cloud top pressure in oxygen A-band based on data from DPC onboard GF-5 satellite [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(3): 256-268. (in Chinese)
- [13] KUZE A, CHANCE K V. Analysis of cloud top height and cloud coverage from satellites using the O₂A and B bands [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D7): 14481-14491.
- [14] VANBAUCE C, BURIEZ J C, PAROL F, *et al.* Apparent pressure derived from ADEOS-POLDER observations in the oxygen A-band over ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(16): 3159-3162.
- [15] VANBAUCE C, CADET B, MARCHAND R T. Comparison of POLDER apparent and corrected oxygen pressure to ARM/MMCR cloud boundary pressures [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(5): 2002GL016449.
- [16] HOU W Z, LIU X, WANG J, *et al.* Multispectral Land Surface Reflectance Reconstruction Based on Non-Negative Matrix Factorization: Bridging Spectral Resolution Gaps for grasp tropomi brdf Product in Visible [J]. *Remote Sensing*, 2025, 17(6): 1053.
- [17] 颜昌翔, 张源, 泊建, 等. 高光谱偏振技术的研究进展及展望 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(14): 2141-2165.
- YAN CH X, ZHANG Y, BO J, *et al.* Development and prospect of hyperspectral polarization [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(14): 2141-2165. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] CAO Y J, CHEN C, YU H X, *et al.* Monitoring of aerosol optical-microphysical properties from DPC/GF-5 (02): a case study of dust event in North China plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2025, 352: 121193.
- [20] GU H R, LI Z Q, *et al.* A capsule network model for aerosol retrieval from DPC/Gaofen-5(02) satellite multi-angle polarimetric observation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2025, 5: 1008.
- [21] GU H R, LI Z Q, MA Y, *et al.* An efficient transformer-based aerosol retrieval algorithm for the polarization crossfire (PCF) satellite sensor suite: development and validation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2026, 351: 109793.

- [22] QIE L L, LI Z Q, ZHU S F, *et al.* In-flight radiometric and polarimetric calibration of the Directional Polarimetric Camera onboard the GaoFen-5 satellite over the ocean[J]. *Applied Optics*, 2021, 60 (24): 7186.
- [23] ZHU S F, LI Z Q, QIE L L, *et al.* In-flight relative radiometric calibration of a wide field of view directional polarimetric camera based on the Rayleigh scattering over ocean [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1211.
- [24] YANG L P, MENG X M, ZHANG X Q. SRTM DEM and its application advances[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32 (14) : 3875-3896.
- [25] KOTCHENOVA S Y, VERMOTE E F, LEVY R, *et al.* Radiative transfer codes for atmospheric correction and aerosol retrieval: intercomparison study[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2215.

作者简介:

顾浩然(1999—),男,安徽六安人,博士研究生,主要从事信息量分析、气溶胶最优化反演算法、深度学习反演算法及矢量辐射传输模拟等方面的研究。E-mail: guhaoran23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:

李正强(1977—),男,河南洛阳人,博士,研究员,博士生导师,2004年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事卫星遥感和大气环境遥感的研究。E-mail: lizq@aircas.ac.cn