

基于多角度偏振信息反演海洋上空卷云云顶高度

李 树^{1,2}, 孙晓兵^{1*}, 提汝芳¹, 黄红莲¹, 陈震霆^{1,2}, 乔延利¹

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要:采用偏振辐射信息反演云顶高度时,为了减小由云层及地表偏振辐射特性变化带来的反演结果不确定度,使用 490 nm 和 865 nm 通道多角度偏振信息反演卷云云顶高度.理论分析大气顶偏振特征,给出 490 nm 与 865 nm 通道偏振特性差异,说明使用此两通道偏振反射率差反演云顶高度的可行性.假设卷云为一般种类混合模型(General Habit Mixture, GHM),使用倍加累加矢量辐射传输模型计算和分析大气顶 490 nm 和 865 nm 通道偏振反射率差对卷云有效粒子半径、光学厚度和云顶压强的敏感性.分析表明,当卷云光学厚度大于 3 时,偏振反射率差对有效粒子半径和光学厚度的变化不敏感,对云顶压强变化敏感.根据敏感性分析结果选择适当的参数构建偏振反射率差查找表,使用查找表方法反演 POLDER3 数据的卷云云顶高度,并与 POLDER3 产品和 MODIS 产品进行比较.结果表明,与 POLDER3 的官方算法相比,使用偏振反射率差查找表方法有更宽的散射角适用范围,反演结果与 MODIS 产品有更好的一致性.

关键词:多角度;偏振信息;卷云;云顶高度;反演

中图分类号:P407 **文献标识码:**A

Retrieval of cirrus cloud top height over ocean based on multi-angle polarized information

LI Shu^{1,2}, SUN Xiao-Bing^{1*}, TI Ru-Fang¹, HUANG Hong-Lian¹, CHEN Zhen-Ting^{1,2}, QIAO Yan-Li¹

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Cloud top height could be retrieved by polarized information. In order to reduce the uncertainty of retrieval results caused by the variability of cloud and surface polarized properties, the multi-angle polarized information of 490 nm band and 865 nm band was used to retrieve cirrus cloud top height. Atmospheric top polarized information and the differences of atmospheric top polarized information between 490 nm band and 865 nm band was theoretically analyzed, which showed that it was feasible to retrieve cirrus cloud top height using polarized reflectance difference between 490 nm band and 865 nm band. Cirrus cloud was assumed as General Habit Mixture (GHM) model, the polarized reflectance difference was evaluated by the vector radiative transfer model based on adding-doubling method, and the sensitivity of polarized reflectance to cirrus cloud effective radius, optical thickness and cloud top pressure were evaluated. The results show that when the cirrus cloud optical thickness is greater than 3, the polarized reflectance difference is not sensitive to the change of effective particle radius and optical thickness, and is sensitive to the change of cloud top pressure. The polarized reflectance difference look-up table was constructed by choosing appropriate parameters according to sensitivity analysis, and retrieved cirrus cloud top heights using look-up table method base on POLDER3 data. The retrieval results were compared with POLDER3 product and MODIS product. The results indicate that compared with the official POLDER3 algorithm, the polarized reflectance difference look-up table method could applied to a wider scattering angle range, and had a better consistency with MODIS product.

收稿日期:2017-11-03,修回日期:2018-02-08

Received date: 2017-11-03, revised date: 2018-02-08

基金项目:卫星应用共性关键技术项目(32-Y20A22-9001-15/17)

Foundation items: Satellite Application Common Key Technology Program(32-Y20A22-9001-15/17)

作者简介(Biography): 李 树(1988-),男(壮族),广西田林人,博士研究生,主要研究领域为光学遥感. E-mail:lishu_owen@sina.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn

Key words: multi-angle, polarized information, cirrus cloud, cloud top height, retrieval

PACS: 42. 68. Mj, 92. 60. Nv

引言

云对地球辐射收支平衡具有重要影响,且对水汽循环有重要的调节作用. 云顶高度的准确反演对大气研究、气候模型研究、数值天气预报等有重要作用,对航空预警也有重要意义. 目前,遥感反演云顶高度的方法主要有两类:一类是立体观测法,另一类是通道辐射特性法. 立体观测法依据几何学和摄影测量学直接计算云顶高度,没有间接测量值,从而减少测量误差,可获取更高的反演精度. 但立体观测法存在时间和空间覆盖范围小、探测效率低等不足^[1]. 通道辐射特性法是通过遥感器接收到的辐射量,反演云顶温度、压强等信息,根据这些信息的垂直廓线确定云顶高度. 与立体观测法相比,通道辐射特性法的反演精度较低,但是空间范围较大,可用于连续大范围观测. 通道辐射特性法主要有:红外亮温法^[2]、CO₂薄片法^[3]、氧气 A 带吸收法^[4]、偏振信息法^[5]等. 红外亮温法受温度廓线和云层的发射率影响较大;CO₂薄片法受仪器信噪比的影响对低云反演精度较差;氧气 A 带吸收法对云层自身的反射比较敏感,对薄云反演精度较低;偏振信息法具有物理含义清晰、受环境因素干扰小等特点. 偏振信息法基本思想是利用偏振信息反演出云层上方大气分子光学厚度,进而确定云顶高度信息.

法国空间研究中心根据 POLDER 载荷数据特点,开发了基于偏振信息的云顶瑞利压强反演算法. 该算法认为 443 nm(或 490 nm)和 865 nm 通道对云层的偏振响应基本相同,443 nm(或 490 nm)通道的偏振辐亮度来自大气分子和云层贡献,而 865 nm 通道偏振辐亮度只来自云层贡献^[5]. 使用矢量辐射传输方程模拟计算云层 490 nm 和 865 nm 的偏振信息的差异,根据该信息拟合反演云顶瑞利压强的公式. 该算法适用于散射角从 80°到 120°范围、云球形反照率大于 0.3,且观测条件不在海洋太阳耀光区的情况. 何贤强等^[6]将云层近似为朗伯体,忽略云层偏振信息的贡献,建立云顶偏振反射率查找表,基于该查找表反演云顶高度.

对于卷云,当散射角约大于 120°,云层上方大气分子光学厚度较大时,云层对大气顶偏振反射贡献可以忽略,参考文献[6]的假设是合理的. 而当散射角小于 120°,云层上方的大气分子光学厚度较小

时,使用偏振信息反演云顶高度应该充分考虑云层自身偏振反射的贡献. 卷云自身的偏振特性主要由其体散射特性参数决定. POLDER 卷云云顶瑞利压强的反演算法采用六角冰晶模型(Inhomogeneous Hexagonal Monocrystal, IHM)^[7]来模拟计算卷云的体散射特性. Yang 等^[8]人一直从事冰晶粒子散射模型的研究,他们计算了多种冰晶模型的单次散射数据库. Cole^[9]和 Baum^[10]等使用不同的冰晶模型模拟计算与 POLDER 观测条件一致的卷云偏振反射率,并与 POLDER 实际观测的偏振反射率对比. 结果表明,不同的冰晶模型计算得到的偏振反射率存在较大差异,而一般种类混合模型(General Habit Mixture, GHM)^[10]的计算结果与实际观测值有很好的 consistency.

卷云偏振反射率随观测条件的变化并不规则、具有较大的离散性,使用部分数据拟合得到的结果,并不能很好的代表卷云真实的偏振特性. 因此,使用 POLDER 方法反演云顶瑞利压强时,在某些观测条件下反演结果具有较大的不确定度. 为了充分考虑卷云自身偏振特性对云顶高度反演的影响,以减小反演的不确定度,本文使用 GHM 作为卷云散射模型,基于矢量辐射传输模型计算 490 nm 和 865 nm 通道偏振反射率差查找表,基于查找表法反演云顶高度. 与 POLDER 算法相比,此方法适用的散射角范围和反演精度都有一定提高.

1 基于偏振信息卷云云顶高度反演的理论分析

太阳光在经过大气传输后,由于大气分子、气溶胶、云等大气粒子散射,使得散射辐射存在一定程度的偏振变化. 因此,在精确处理散射问题时,必须准确描述辐射场的偏振状态. 在大气偏振遥感中,构建辐射传输方程和表达偏振光最方便的方法是利用 Stokes 矢量^[11]. 散射光的 Stokes 矢量可以通过入射光的 Stokes 和散射相矩阵 \mathbf{P} 来表示,对每个散射角 Θ ,如式(1)、式(2)关系:

$$\begin{bmatrix} I_{sc} \\ Q_{sc} \\ U_{sc} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, λ 为入射光波长, R 为粒子半径. 对于各向同性和对称性的非球形粒子, 散射相矩阵 \mathbf{P} 有 6 个独立元素, 可将式(1)简化为:

$$\begin{bmatrix} I_{sc} \\ Q_{sc} \\ U_{sc} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} \\ 0 & 0 & -P_{34} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \\ U_{in} \\ V_{in} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于球形粒子, 根据 Mie 散射理论, 其散射相矩阵的独立元素只有 4 个, 其中 $P_{11} = P_{22}, P_{33} = P_{44}$. 散射相矩阵 \mathbf{P} 与入射光的波长、散射粒子大小及形状、折射率等物理参数有关. 球形粒子的散射特性通过 Mie 散射理论进行计算, 但非球形冰晶粒子目前没有一种散射方法能单独有效计算所有尺度和形状的冰晶粒子的散射特性. 通常冰晶粒子散射特性的求解, 采用多种计算方法来实现, Yang 等^[8] 使用 Amsterdm 离散偶极子近似法 (ADDA)、T 矩阵法和改进几何法联合计算.

确定大气介质散射特性参数后, 可采用平面平行矢量辐射传输模型^[12] 计算大气顶的偏振辐射量. 在大气遥感中, 一般认为 Stokes 矢量中的 \mathbf{V} 分量可以忽略. 因此, 大气顶的归一化偏振辐射亮度可表示为^[13]:

$$L_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{E_s} \quad (3)$$

式中, Q, U 为 Stokes 参数, E_s 为大气顶的辐射通量. 根据式(3), 大气顶的偏振反射率可写为:

$$R_p = \frac{L_p}{\mu_s} = R \times \text{DoLP} \quad (4)$$

式中, μ_s 为太阳天顶角余弦值, R 为反射率, DoLP 为线偏振度.

将有云大气分为三层: 顶层为大气分子层, 中间为云层, 底层为大气分子和气溶胶层, 如图 1 所示. 卫星接收到的偏振辐射信号主要来自云层、大气分子、气溶胶以及地表的贡献. 假设整层大气和地表耦合后的穆勒矩阵为 \mathbf{M} , 令 \mathbf{M} 为:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (5)$$

则卫星接收到的光辐射信号的线偏振度为:

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{S_{21}^2 + S_{31}^2}}{S_{11}} \quad (6)$$

卫星接收到的大气顶反射率可以表示为:

$$R_{\text{measure}} = R_m + R_c + R_a + R_s \quad (7)$$

式中, R_{measure} 表示为大气顶的反射率, R_m, R_c, R_a, R_s 分别为大气分子、云层、气溶胶、地表对大气顶反射率贡献.

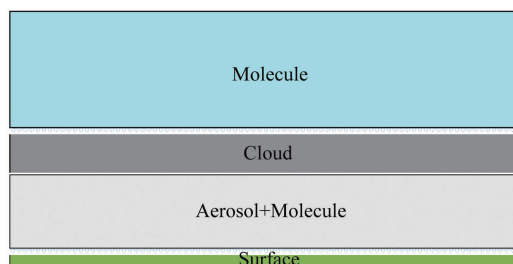


图 1 大气简化分层图

Fig. 1 Diagram of three layer structure of atmosphere

地表类型为海洋且不考虑气溶胶的情况下, 地表对大气层顶的反射率贡献可以通过下式计算:

$$R_s = \exp[-(\tau_m + \tau_c)/\mu_s] \times R_{\text{surface}} \times \exp[-(\tau_m + \tau_c)/\mu_v] \quad (8)$$

式中, τ_m, τ_c 分别为大气分子的光学厚度和云层的光学厚度; μ_s, μ_v 分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦值; R_{surface} 为海表反射率, 可采用 Cox-Munk 模型计算, 具体见参考文献[14]. 云层和大气分子对大气顶的反射率可以利用辐射传输方程进行求解. 根据上述可知, 卫星接收到的偏振反射率可以写为:

$$R_p_{\text{measure}} = R_{\text{measure}} \times \text{DoLP} = (R_m + R_c + R_s) \times \frac{\sqrt{S_{21}^2 + S_{31}^2}}{S_{11}} \quad (9)$$

490 nm 和 865 nm 通道大气顶的偏振反射率差可写为:

$$\begin{aligned} \Delta R_p_{\text{measure}} &= R_{\text{measure},490} \times \text{DoLP}_{490} - R_{\text{measure}} \times \text{DoLP}_{865} \\ &= (R_{m,490} + R_{c,490} + R_{s,490}) \times \text{DoLP}_{490} - (R_{m,865} + R_{c,865} + R_{s,865}) \times \text{DoLP}_{865} \end{aligned} \quad (10)$$

由于云粒子尺度比较大, 光在云层中多次散射后, 可认为在 490 nm 和 865 nm 处云层的偏振特性基本相同^[5]. 根据参考文献[10]可知, 490 nm 和 865 nm 处卷云的消光系数也基本相等. 由 Cox-Munk 模型, 490 nm 和 865 nm 的海表反射率基本相等, 海表的偏振特性也基本相同. 由 Rayleigh 散射相矩阵可得, 光通过大气分子后的 DoLP 与波长无关. 综合以上, 卫星接收到 490 nm 和 865 nm 通道的光辐射的 DoLP 相差很小, 且云层和海表对此两通道的大气顶反射贡献基本相同. 因此, 两通道大气顶的偏振反射率差对云层和地表变化不敏感, 对大气分

子反射率差变化较为敏感,即对大气分子光学厚度变化敏感.假设云层和地表贡献已知,则大气顶的偏振反射率差只是云层上方大气分子光学厚度的函数.大气分子光学厚度与压强存在如(11)式关系.因此,可根据 490 nm 和 865 nm 通道的偏振反射率差反演云顶压强,再根据国际气压公式计算云顶高度.

$$P_c = P_0 \cdot \Delta\tau(\lambda) / \tau_0(\lambda) \quad (11)$$

式中, P_c 为云顶压强, P_0 为标准大气压(1 013.25 hPa), $\Delta\tau(\lambda)$ 为云层上方的大气分子光学厚度, $\tau_0(\lambda)$ 为整层大气分子的光学厚度.

与仅采用 490 nm 通道的偏振反射信息反演云顶高度相比,采用 490 nm 和 865 nm 通道偏振反射率差反演云顶高度对云层和地表变化的敏感度更小,可以有效减小由云层和海表对大气顶偏振反射贡献的计算偏差引起反演的不确定度.

2 基于偏振信息的卷云云顶高度反演及结果分析

2.1 偏振敏感性分析

本文采用基于倍加累加法的矢量辐射传输模式 RT3^[15] 求解平面平行大气的矢量传输方程.在进行矢量辐射传输模拟计算时,将大气简化为三层:底层为大气分子和气溶胶层,中间层为云层,最上层为大气分子层.地表类型设为海洋类型;气溶胶为典型的海洋气溶胶类型;大气分子的光学厚度根据云顶高度实际换算;卷云散射采用 GHM 模型的单次散射参数计算.

(1) 卷云光学厚度对 490 nm 和 865 nm 两通道的偏振反射率差的影响

假设气溶胶光学厚度、地表反照率、卷云有效半径和云顶压强恒定,改变云的光学厚度,使用 RT3 模拟计算大气顶 490 nm 和 865 nm 偏振反射率的差值.模拟条件:云顶压强为 300 hPa,卷云的有效粒子半径为 30 μm ,地表反照率为 0.01;太阳天顶角为 20°,观测天顶角 14 个(从 0°~75°),云的光学厚度取 1、2、3、4、5、10、20、30、40.模拟结果如图 2 所示.

从图 2 中可看出,光学厚度小于 3 时,偏振反射率差对光学厚度比较敏感,偏振反射率差随光学厚度的增大而减小.光学厚度大于 3 时,偏振反射率差随光学厚度的增大而增大,但是变化量较小.偏振反射率差随着散射角的增大而减小,散射角越大光学厚度对偏振反射率差的影响越小.散射角为 84°时,光学厚度为 1 与光学厚度为 3 的偏振反射率差的差

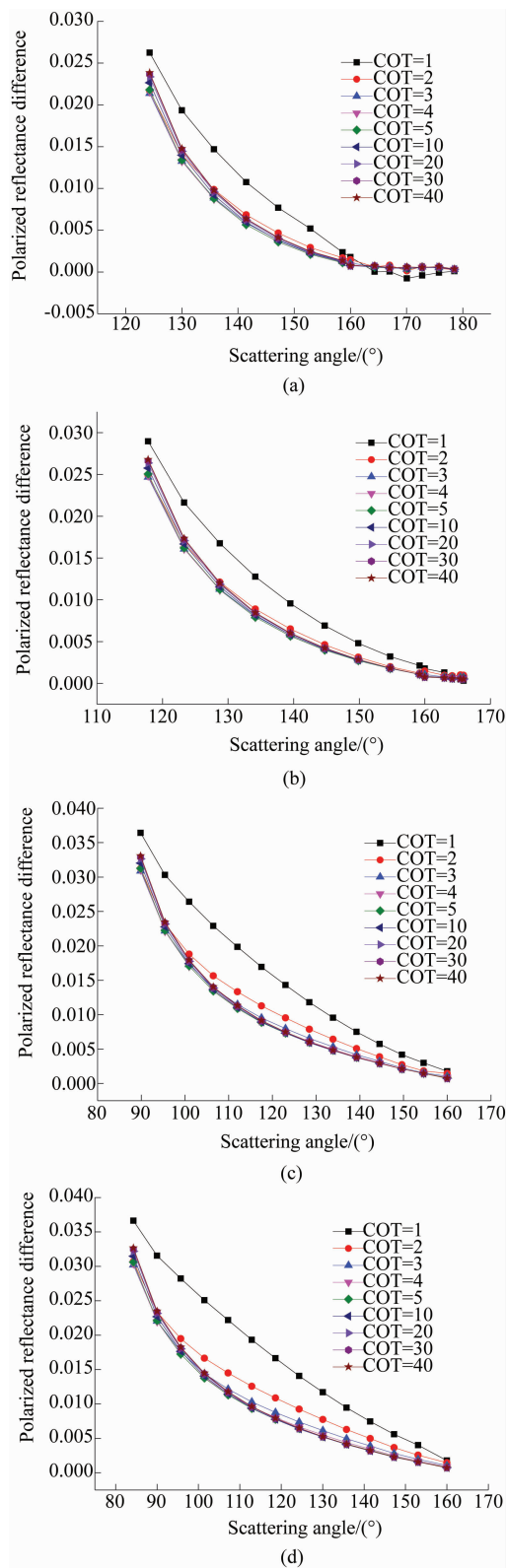


图 2 光学厚度变化时不同相对方位角的偏振反射率差随散射角的变化 (a)0°, (b)45°, (c)135°, (d)180°
Fig. 2 Values of polarized reflectance difference as a function of scattering angle for different cloud optical thickness (COT) and relative azimuth angle (a) 0°, (b) 45°, (c) 135°, (d) 180°

值约 0.006, 而散射角为 140° 时这个差值为 0.0037. 在光学厚度大于 3 的条件下, 散射角为 84° 时, 由云光学厚度变化引起的偏振反射率差的最大误差约为 0.0026; 散射角为 140° 时, 该最大误差约为 0.0002.

(2) 卷云有效粒子半径对 490 nm 和 865 nm 两通道的偏振反射率差的影响

假设气溶胶光学厚度、地表反照率、云光学厚度和云顶压强恒定, 改变卷云的有效粒子半径, 使用 RT3 模拟计算大气顶 490 nm 和 865 nm 偏振反射率的差值. 模拟条件: 云顶压强为 300 hPa, 云光学厚度为 15, 地表反照率为 0.01; 太阳天顶角为 20° , 观测天顶角 14 个 (从 $0^\circ \sim 75^\circ$), 有效半径从 $5 \mu\text{m}$ 到 $40 \mu\text{m}$ 共 8 个、间隔为 $5 \mu\text{m}$. 模拟结果如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 偏振反射率差对卷云有效粒子半径不敏感. 散射角为 84° 时, 最大偏振反射率差的差值约 0.0022. 散射角为 140° 时, 最大偏振反射率差的差值约 0.0004.

(3) 不同云顶压强对 490 nm 和 865 nm 两通道的偏振反射率差的影响

假设气溶胶光学厚度、地表反照率、卷云有效半径和云光学厚度恒定, 改变云顶压强, 使用 RT3 模拟计算大气顶 490 nm 和 865 nm 偏振反射率的差值. 模拟条件: 云光学厚度为 15, 卷云的有效粒子半径为 $30 \mu\text{m}$, 地表反照率为 0.01; 太阳天顶角为 20° , 观测天顶角 14 个 (从 $0^\circ \sim 75^\circ$), 云顶压强取 50 hPa、70 hPa、90 hPa、150 hPa、200 hPa、300 hPa、400 hPa、600 hPa、800 hPa、1000 hPa. 模拟结果如图 4 所示. 由图 4 可知, 散射角从 84° 到 140° 的范围内, 偏振反射率差对云顶压强的变化比较敏感, 散射角越小越敏感. 散射角为 84° 时, 压强变化 20 hPa 引起的偏振反射率差的变化约为 0.0024. 散射角为 140° 时, 压强变化 20 hPa 引起的偏振反射率差的变化约为 0.00043. 偏振遥感对偏振反射率的探测能力, 由等效噪声归一化偏振辐亮度评价. 结合图 4 分析结果以及 POLDER3 在轨定标数据^[16]可知: 散射角在 80° 到 140° 范围内, 当卷云云顶气压值变化量大于 30 hPa 时, 大气顶 490 nm 和 865 nm 通道的偏振反射率差能被仪器有效探测.

所以, 当卷云光学厚度大于 3 时, 偏振反射率差在散射角从 80° 到 140° 范围内对云顶压强的变化比较敏感、对光学厚度和有效粒子半径的变化不敏感, 可用于反演卷云云顶高度. 理想情况下, 当卷云的光学厚度大于 3 时, 光学厚度引起的云顶压强反演的不确定度在 20 hPa 左右, 有效粒子半径引起的云顶

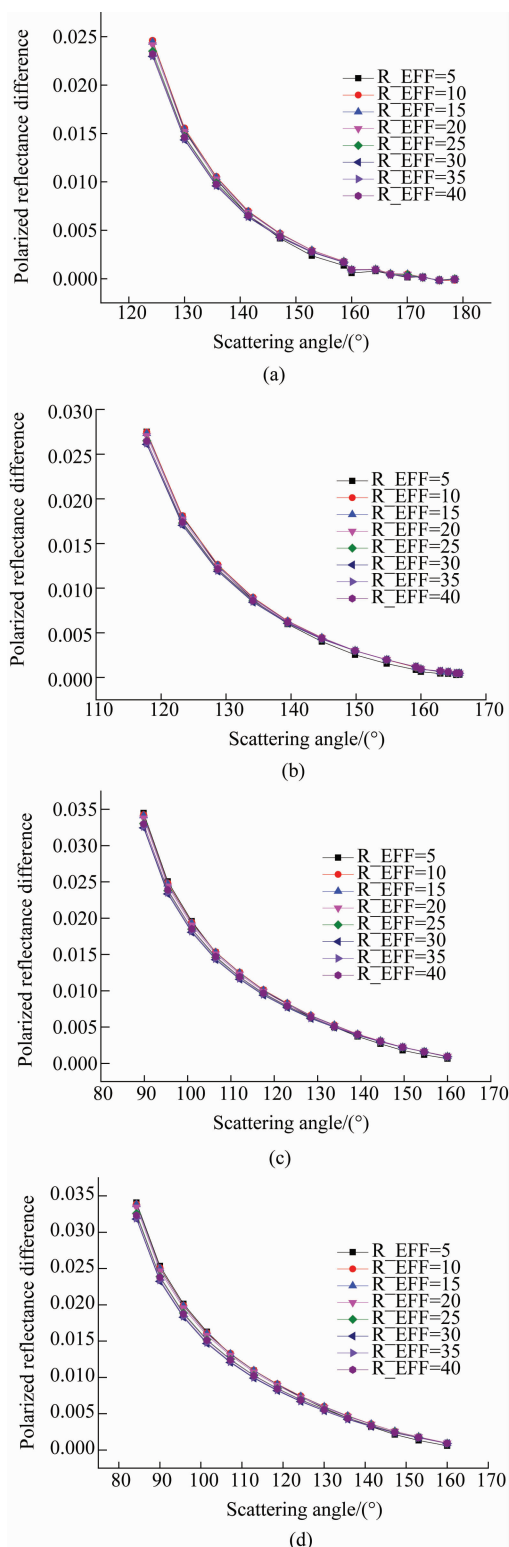


图3 有效粒子半径变化时不同相对方位角的偏振反射率差随散射角的变化 (a) 0° , (b) 45° , (c) 135° , (d) 180°
 Fig. 3 Values of polarized reflectance difference as a function of scattering angle for different effective radius (R_{EFF}) and relative azimuth angle (a) 0° , (b) 45° , (c) 135° , (d) 180°

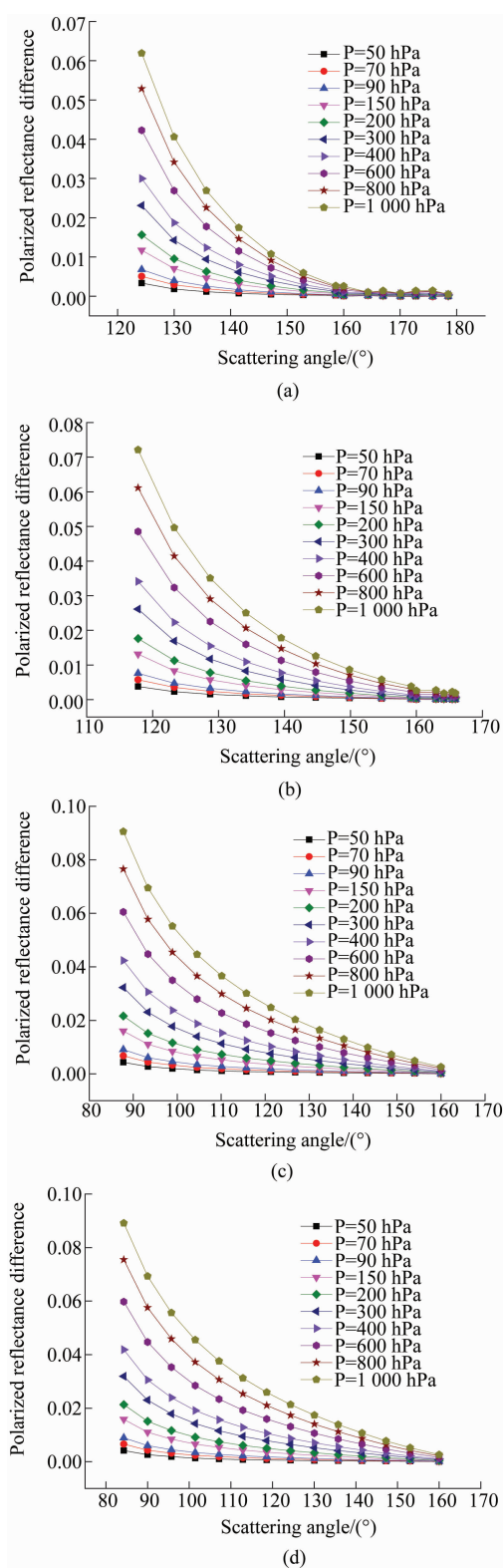


图4 云顶压强变化时不同相对方位角的偏振反射率差随散射角的变化 (a)0°, (b)45°, (c)135°, (d)180°

Fig. 4 Values of polarized reflectance difference as a function of scattering angle for different cloud top pressure (P) and relative azimuth angle (a) 0°, (b) 45°, (c) 135°, (d) 180°

压强反演的不确定度也在 20 hPa 左右, 合成不确定度约为 28.3 hPa, 优于仪器探测的灵敏度. 因此, 本文的云顶压强反演算法的精度与仪器的灵敏度相当, 约为 30 hPa, 该精度满足云顶高度反演的要求.

本文采用查找表法反演卷云云顶压强, 再根据压强廓线计算云顶高度. 490 nm 和 865 nm 偏振反射率差查找表参数的设置如下: 卷云有效粒子半径 (GHM 模型) 取 30 μm ; 云光学厚度为 15; 太阳天顶角从 0° 到 80°, 步长为 1°; 观测天顶角从 0° 到 70° 共 13 个, 步长约为 6°; 相对方位角从 0° 到 180°, 步长为 1°; 云顶压强从 50 hPa 到 1000 hPa, 步长为 10 hPa.

2.2 基于 POLDER 数据的卷云云顶高度反演实例

法国空间研究中心的 PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectance for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar) 卫星, 搭载了 POLDER3 仪器于 2004 年发射, 在轨运行约 9 年后于 2013 年终止工作, 为大气气溶胶和云的研究提供了宝贵的数据. POLDER3 有 490 nm、670 nm 和 865 nm 三个偏振通道, 这三个通道为使用偏振信息研究大气提供了数据基础. POLDER3 的 L1B 产品提供了归一化的辐射量数据、观测几何数据、云像元识别数据和经纬度等数据, 单像元最多有 16 个观测角度. 本文使用 POLDER3 L1B 产品中 490 nm 通道和 865 nm 通道的偏振数据, 对基于偏振反射率差查找表云顶高度反演算法进行试验. 图 5 为基于 POLDER3 数据云顶高度反演的流程图, 在云检测、云相态识别、云光学厚度反演的基础上, 选择多角度观测

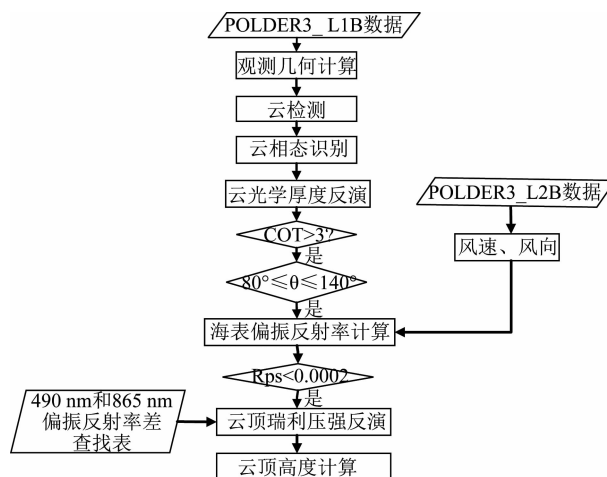


图5 基于 POLDER3 偏振数据的卷云云顶高度反演流程

Fig. 5 The flow chart of cirrus cloud top height retrieval by POLDER3 polarized data

数据中符合反演条件的数据进行云顶高度反演。

本文使用 POLDER3_L2B 产品提供的风速和风向计算海表偏振反射率. 云相态和云光学厚度数据由 PARASOL_PM-L2 产品提供, 该产品由 PARASOL 和 MODIS 观测重合区域联合反演得到, 数据的空间分辨率为 POLDER3 的空间分辨率(约 $5.3 \text{ km} \times 6.2 \text{ km}$). 其中云相态的数据有 POLDER3 产品和 MODIS 产品, 云光学厚度数据是 MODIS 通道 2 对应的云光学厚度产品. 选取 2007 年 8 月 15 日北纬 6.7° 到北纬 23.4° 、东经 118.4° 到东经 136.9° 区域(如图 6 (a)所示)进行卷云云顶高度反演。

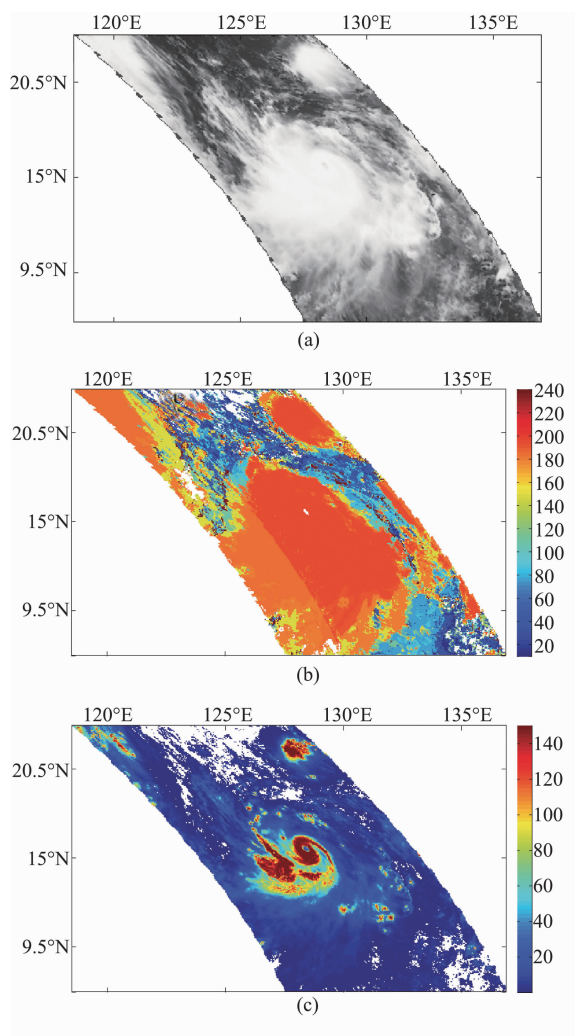


图 6 2007 年 8 月 15 日云参数图 (a) 灰度值, (b) POLDER3 云相态, (c) MODIS 云光学厚度

Fig. 6 Cloud parameters from 15 August 2007 (a) Gray, (b) POLDER3 Cloud phase, (c) MODIS Cloud optical thickness

图 6 中 (a) 为 POLDER3 观测图像的灰度图; (b) 为 PARASOL_PM-L2 提供的云相态图, 其中数值从 100 到 199 为冰云, 从图中可以看到所选的反

演区域的大部分云为冰云; (c) 为 MODIS 通道 2 的云光学厚度产品, 可看出大部分云的光学厚度大于 3. 使用图 5 的反演流程反演上述区域中符合反演条件的卷云云顶压强, 结果如图 7 所示。

从图 7 中可看出, 云顶压强反演结果大部分在 200 hPa 左右, 不同观测几何条件下反演结果的离散性基本都在 100 hPa 以内, 有 75% 以上的点小于 40 hPa. 说明散射角从 80° 到 140° 范围内, 同一像元的卷云云顶压强反演结果随观测几何变化不大, 反演结果较为稳定. 由于 POLDER 的空间分辨较粗, 当云层没有充满像元(碎云)时, 使得不同观测几何条件的反演结果具有较大的离散性。

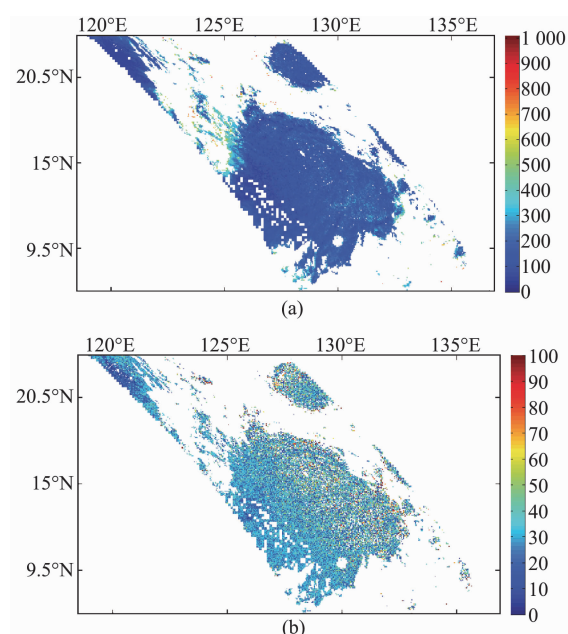


图 7 卷云顶压强反演结果 (a) 卷云顶压强, (b) 不同观测方向云顶压强标准差

Fig. 7 Retrieval result of cirrus cloud top pressure (a) Cirrus cloud top pressure, (b) Cirrus cloud top pressure angular dispersion

2.3 分析与讨论

PARASOL_PM-L2 产品中, 提供上述反演数据区域的 MODIS 云顶压强数据和 POLDER3 的瑞利压强数据, 如图 8 所示. MODIS 云顶压强采用 CO_2 薄片法反演, 该方法在云顶压强小于 700 hPa 时, 有较高反演精度. 因此, 采用 MODIS 的云顶压强数据作为本文反演结果分析的参考。

结合图 8 和图 7(a), 可以看出本文采用的反演方法与 MODIS 云顶压强大部分区域有较好的一致性; 与 POLDER3 瑞利压强相比, 也有较好的一致性, 本文所采用的反演方法能反演更多观测区域的

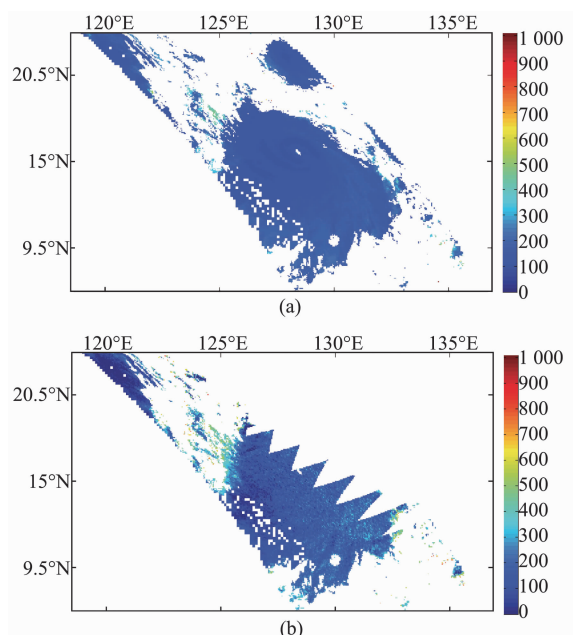


图8 PARASOL_PM-L2 云压强产品 (a) MODIS 云顶压强, (b) POLDER3 瑞利压强

Fig. 8 PARASOL_PM-L2 Cloud pressure product (a) MODIS cloud top pressure product, (b) POLDER3 Rayleigh pressure product

云顶压强数据. 其原因是 POLDER 反演算法只适用于散射角从 80° 到 120° 范围内, 而本文算法采用的 490 nm 和 865 nm 偏振反射率差在散射角从 80° 到 140° 范围内对云顶压强变化敏感, 满足云顶压强反演需求.

图9 为本文方法反演的云顶压强、MODIS 云顶压强和 POLDER3 瑞利压强 3 个产品相互之间的误差绝对值. 图9(a) 为本文方法反演的云顶压强与 MODIS 云顶压强的误差绝对值分布, 大部分的误差绝对值在 50 hPa 以内. 图9(b) 为 POLDER3 瑞利压强与 MODIS 云顶压强的误差绝对值部分. 相同有效数据区域内, 图9(b) 的误差绝对值部分与图9(a) 基本一致, 但图9(b) 误差绝对值 $\geq 50\text{ hPa}$ 的像元点要比图9(a) 多. 图9(c) 为本文方法反演的云顶压强与 POLDER3 瑞利压强的误差绝对值, 可以看出误差绝对值 $\geq 50\text{ hPa}$ 相比于图9(a) 和图9(b) 有明显的减少. 综合上述, 相比于 POLDER3 算法, 本文算法反演的云顶压强与 MODIS 云顶压强有更好的一致性. 其主要原因是本文方法充分考虑云层自身的偏振特性, 采用矢量辐射传输模型详细计算了各种观测几何条件大气顶的 490 nm 和 865 nm 通道的偏振反射率差, 减小采用部分数据拟合获取大气顶 490 nm 和 865 nm 通道偏振特性带来的反演误差.

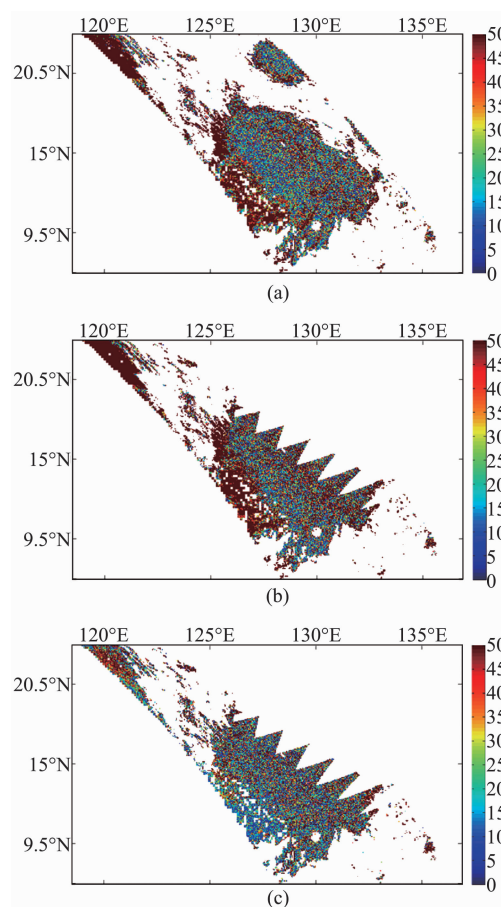


图9 不同产品云顶压强误差绝对值 (a) MODIS 压强与本文算法结果误差绝对值, (b) MODIS 压强与 POLDER3 瑞利压强误差绝对值, (c) POLDER3 瑞利压强与本文算法结果误差绝对值

Fig. 9 Error absolute value of cloud top pressure for different products (a) MODIS and this paper algorithm, (b) MODIS and POLDER3, (c) POLDER3 and this paper algorithm

表1 不同误差绝对值范围内的像元个数与总有效像元个数的比值

Table 1 Ratios of pixel number in the error absolute value range and the total valid pixel number

误差绝对值/hPa	本文算法与 MODIS/(%)	POLDER3 与 MODIS/(%)
$\leq 10\text{ hPa}$	14.62	11.33
$\leq 20\text{ hPa}$	27.85	23.00
$\leq 30\text{ hPa}$	40.53	33.40
$\leq 40\text{ hPa}$	51.92	43.19
$\leq 50\text{ hPa}$	61.62	52.05

表1 列出三个产品都为有效数据的区域, 本文算法结果与 MODIS 云顶压强产品的误差绝对值以及 POLDER3 瑞利压强产品与 MODIS 云顶压强产品的误差绝对值, 在不同的范围内的像元个数与总有效数据像元个数的比值. 从表1 中可以看出, 相对于

POLDER3 瑞利压强,本文反演的云顶压强产品更为接近于 MODIS 云顶压强产品,误差绝对值在 50 hPa 以内的像元点占的总有效像元点的 61.62%,比 POLDER3 瑞利压强高 9.57%。同时也可以看到仍然有 39.38% 像元点的误差绝对值在 50 hPa 以上,这些像元点大部分在卷云的边缘区域,与 POLDER3 产品误差绝对值分布基本一致。

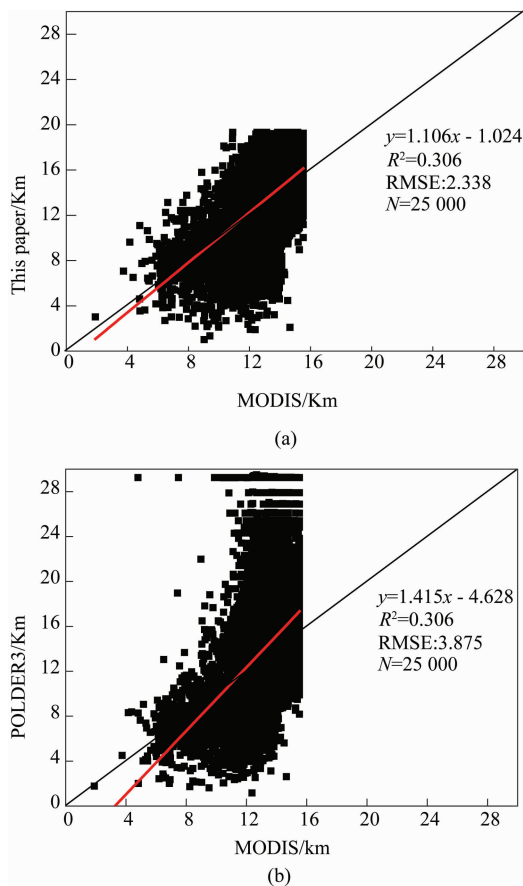


图 10 云顶高度反演结果对比图 (a) 本文结果与 MODIS 对比, (b) POLDER3 与 MODIS 对比
Fig. 10 Comparison of retrieval results of different cloud top heights (a) this paper and MODIS, (b) POLDER3 and MODIS

根据云顶压强反演结果,采用国际气压计算公式计算云顶高度,云顶高度的单位为 km。图 10(a) 为本文算法反演的云顶高度与 MODIS 云顶压强计算的云顶高度对比图,两方法反演云顶高度的相关系数 $R^2 = 0.306$, 标准差 $RMSE = 2.338$ km。图 10(b) 为 POLDER3 瑞利压强计算的云顶高度与 MODIS 云顶压强计算的云顶高度的对比图,两方法反演云顶高度的相关系数 $R^2 = 0.208$, 标准差 $RMSE = 3.875$ km。从图 10 中可以看出,相比于 POLDER3 产品,本文的反演方法与 MODIS 产品有更好的一致

性,且标准差比 POLDER3 产品小 1.5 km 左右。POLDER3 产品最大云顶高度可达到 28 km 左右,与 MODIS 测量值存在较大差异。本文反演得到的云顶高度最大值在 20 km 千米以下,更加接近于 MODIS 测量值。从结果上看,本文算法与 MODIS 算法结果仍存在明显误差,主要原因为卷云顶高度较高,云顶上方大气分子稀薄,偏振信息对高度变化不是很敏感。这是使用偏振信息反演高度信息普遍存在的困难。总体上,本文算法相比于 POLDER3 官方算法,能反演更宽的散射角范围($80^\circ \sim 140^\circ$),能获取更多观测区域的云顶高度产品,且反演结果与 MODIS 产品有更好的一致性。

3 结论

卷云粒子采用 GHM 模型,使用矢量辐射传输方程模拟分析 490 nm 和 865 nm 两通道偏振反射率差对卷云有效粒子半径、光学厚度、卷云顶压强的敏感性。结果表明:在散射角从 80° 到 140° 范围内,卷云光学厚度大于 3 时,两个通道的偏振反射率差对云光学厚度的变化以及有效粒子半径变化不敏感,但对云顶压强的变化比较敏感。因此,使用 490 nm 和 865 nm 两通道偏振反射率差反演云顶压强,进而反演云顶高度。采用矢量辐射传输模型 RT3 计算两通道偏振反射率差值,构建查找表,使用查找表方法反演卷云云顶高度。相比于 POLDER3 的官方算法,本文的反演方法可以适用于更宽的散射角范围($80^\circ \sim 140^\circ$),能获取更多观测区域的云顶高度产品,反演结果与 MODIS 产品有更好的一致性。所以,本文反演方法能有效反演卷云云顶高度,未来有望应用于我国 GF-5 卫星偏振载荷云顶高度反演的业务化运行。

References

- [1] MA Shuo, HUANG Yun-Xian, YAN Wei, *et al.* The stereo mapping method of three-line for cloud detection[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (马烁, 黄云仙, 严卫, 等. 三线阵云立体探测技术. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(2):164-171.
- [2] Nieman S J, Schmetz J, Menzel W P. A comparison of several techniques to assign heights to cloud tracers[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, **32**(9):1559-1568.
- [3] Menzel W P, Frey R A, Zhang H, *et al.* MODIS global cloud-top pressure and amount estimation: Algorithm description and results[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2008, **47**(4):1175-1198.
- [4] O'Brien D M, Mitchell R M. Error estimates for retrieval of cloud-top pressure using absorption in the a band of oxygen [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, **31**(10):1179-1192.

(下转第 458 页)