

# 多角度偏振云检测及云参数反演

常钰阳<sup>1,2</sup>, 孙斌<sup>1\*</sup>, 黄禅<sup>1,2</sup>, 洪津<sup>1</sup>, 乔延利<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 高分五号卫星多角度偏振探测仪(DPC)是国内首台具备业务化多光谱多角度偏振探测能力的星载遥感器。发展了一套针对 DPC 观测数据的处理算法,可获取观测区域上空云检测结果、相态分布和云光学厚度。利用 670 nm、865 nm 反射率、490 nm 几何归一化偏振辐亮度和 865 nm 线偏振度进行云检测;利用 865 nm 归一化偏振辐亮度进行相态识别;利用 670 nm、865 nm 反射率以及相态识别结果反演云光学厚度。由于尚未获取可反演的 DPC L1 级观测数据,仅将算法应用于地球反射率多角度偏振观测仪(POLDER)数据,以验证算法有效性。对比 POLDER 云产品,得到判云一致性和判晴一致性分别为 93.3%和 92.9%;水云、冰云和混合相态判别一致性分别为 87.4%,76.6%和 22.8%;云光学厚度的相关系数为 0.89,故该算法可行有效。该算法为 DPC 发展业务化云产品提供参考。

**关键词** 大气光学; 多角度偏振观测; 云检测; 云相态; 云光学厚度; 多角度偏振探测仪(DPC); 地球反射率多角度偏振观测仪(POLDER)

中图分类号 P407

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1101002

## Cloud Detection and Parameter Inversion Using Multi-Directional Polarimetric Observations

Chang Yuyang<sup>1,2</sup>, Sun Bin<sup>1\*</sup>, Huang Chan<sup>1,2</sup>, Hong Jin<sup>1</sup>, Qiao Yanli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** The directional polarimetric camera (DPC) aboard the GF-5 satellite is the first domestic space-born instrument with operational multi-spectral, multi-directional, and polarimetric observations. A series of algorithms used for DPC measurements were formulated to acquire cloud detection results, cloud thermodynamic phase distribution, and cloud optical thickness of the observed zones. The cloud detection results were derived from the reflectance at 670 and 865 nm, the geometric normalized polarized radiance was obtained at 490 nm, and the linear degree of polarization was obtained at 865 nm. The cloud thermodynamic phase was derived from the normalized polarized radiance at 865 nm; the cloud optical thickness was obtained from the reflectance at 670 and 865 nm and results of cloud thermodynamic phase. Because of the lack of L1 data of DPC, the algorithms were applied to POLDER data to validate their feasibility. Results indicated that the consistency of “cloudy judgment” and “clear judgment” was 93.3% and 92.9%, respectively. Further, the consistency of “water clouds,” “ice clouds,” and “mixed-phase clouds” was 87.4%, 76.6% and 22.8%, respectively. The correlation coefficient of the optical thickness was 0.89, which demonstrates the feasibility of the proposed algorithms. The proposed algorithms can develop the operational cloud production of DPC.

**Key words** atmospheric optics; multi-directional and polarimetric observations; cloud detection; cloud thermodynamic phase; cloud optical thickness; directional polarimetric camera (DPC); polarization and directionality of the earth’s reflectances (POLDER)

**OCIS codes** 010.1615; 120.0280; 280.4991

收稿日期: 2020-01-09; 修回日期: 2020-02-21; 录用日期: 2020-03-04

基金项目: 卢嘉锡国际团队项目(GJTD-2018-15)

\* E-mail: sunbin09@mail.ustc.edu.cn

## 1 引 言

云是地气系统中辐射收支最重要的调节器,覆盖了 60% 以上的地球表面<sup>[1]</sup>。有云情况下的辐射传输取决于成云粒子的物理特性、几何特性和空间分布特性。了解云的组成和结构,对于研究地气系统的辐射平衡和热动力学有十分重要的意义<sup>[2]</sup>。星载被动遥感具有覆盖全球的观测能力,是研究大范围区域云分布及其特性的有效手段<sup>[2]</sup>。

不同仪器根据不同原理获取目标区域云的特性。中分辨率成像光谱仪(MODIS)具有 0.4~14.2  $\mu\text{m}$  的 36 个观测波段,通过其可见-热红外多光谱组合观测,可以获得目标区域的云检测结果(云掩模)、云顶特性(压强、温度、有效发射率)、云相态分布、云光学厚度和粒子有效半径<sup>[3]</sup>。地球反射率多角度偏振观测仪(POLDER)是一种超广角画幅式偏振成像仪,搭载于 PARASOL 卫星上的 POLDER (POLDER/PARASOL) 具有 443~1020 nm 的 9 个观测波段,其中 490 nm, 670 nm 和 865 nm 为偏振波段,可以最多获取目标物 16 个角度的多光谱偏振信息<sup>[4]</sup>。POLDER/PARASOL 在运行的 10 年(2004—2013 年)中为全球云分布及特性的研究积累了大量观测数据。

中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多角度偏振成像仪(DPC)于 2018 年 5 月搭载 GF-5 号卫星发射升空。与 POLDER/PARASOL 类似,DPC 采用广角画幅式面阵 CCD 成像以获取目标多角度信息,通过载有滤光片和偏振片的机械转轮获取多光谱和偏振成像的时间序列。除 1020 nm 外,与 POLDER 有着相同的通道配置。但 DPC 的空间分辨率由 6.2 km 提升至 3.3 km,观测角度数降至 9 个<sup>[5]</sup>。

本课题组发展了一套针对 DPC 多光谱、多角度偏振探测特点的云检测、云相态识别和云光学厚度反演算法,旨在为开发 DPC 云产品提供算法支持。但由于目前尚未获得 DPC 可供反演的 L1 级数据,考虑到 DPC 与 POLDER/PARASOL(以下简称为 POLDER)在工作原理上的相似性,本文仅将算法应用于 POLDER 数据并与 POLDER 相应产品进行一致性对比,以验证算法有效性。今后理论上只需调整算法适用的空间分辨率,即可直接应用于 DPC 数据的反演,进而继续推进算法精度、稳定性等与 DPC 云产品相关的验证工作。

## 2 多光谱多角度偏振云检测

### 2.1 原 理

为了描述光的偏振特性,定义斯托克斯向量中的线性成分为<sup>[6]</sup>

$$\begin{cases} I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (E_1 E_1^* + E_r E_r^*) \\ Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (E_1 E_1^* - E_r E_r^*) \\ U = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (E_1 E_r^* + E_r E_1^*) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\epsilon$  为介电常数; $\mu$  为磁导率; $E_1$ 、 $E_r$  分别表示电场的平行分量和垂直分量。定义大气顶端反射率为

$$R = \frac{\pi I}{\cos \theta_0 E_0} \quad (2)$$

式中: $E_0$  为太阳入射辐照度; $\theta_0$  为太阳天顶角。定义朗伯体入射面的反照率(albedo)为

$$\alpha = E_r / E_0 = \pi I / E_0 \quad (3)$$

式中: $E_r$  为被入射面反射的辐照度。大气层顶反射率与云光学厚度、地表反照率、云相态(决定云粒子几何形状、复折射指数、相函数)和云滴谱分布特性有关。使用 libRadtran<sup>[7]</sup> 模拟了不同地表反照率  $\alpha$ 、不同有效半径  $r_{\text{eff}}$  下的水云(WC)和冰云(IC)对反射率的影响,结果如图 1 所示。

模拟时设定云的几何厚度均为 1 km。图 1(a)表明,当  $\alpha < 0.6$  时,反射率对云光学厚度有很好的敏感性,如果以实测反射率与晴空反射率的差值作为判据,则可实现云检测;图 1(b)表明相同光学厚度的云层会因成云粒子物理特性的不同影响其反射率,但当光学厚度较小时这种影响基本可以忽略,光学厚度较大时虽然会对光学厚度的定量反演有较大影响,但并不会影响云检测的准确性。考虑到大气分子以及细模态气溶胶在短波段有较强的散射,植被地表对近红外波段的高反射以及海洋表面对近红外的低反射<sup>[8]</sup>,结合 DPC 的波段配置,用于陆地和海洋反射率检测的波段分别选择 670 nm 和 865 nm。由于地表类型的多样性及其各向异性,不同地表不同角度下可见与近红外通道的反射率可以有很大差异,而云对两通道反射率的变化则不敏感<sup>[9]</sup>,因此可以设定 865 nm 反射率  $R_{865}$  和 670 nm 反射率  $R_{670}$  的比值作为检测阈值,超出阈值规定区间的即可判定为晴空。

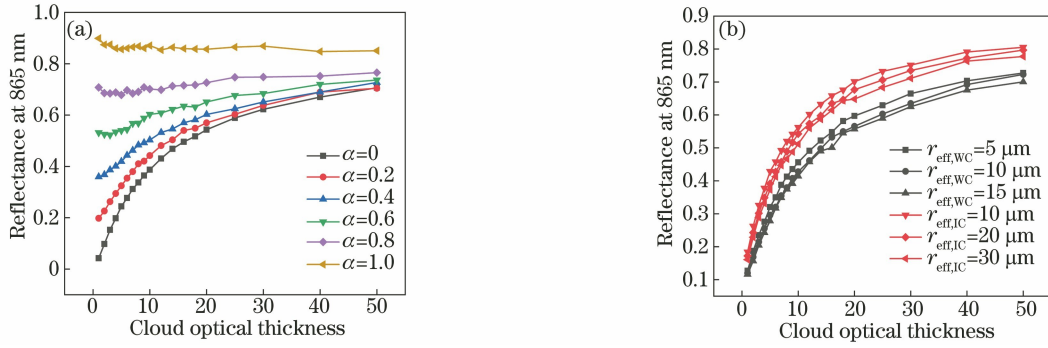


图 1 不同条件下 865 nm 反射率对云光学厚度的敏感性。(a)地表反照率不同,云滴的有效半径为 10  $\mu\text{m}$ ;  
(b)相态和有效半径不同,地表反照率为 0.1

Fig. 1 Sensitivity of reflectance versus cloud optical thickness at 865 nm under different conditions. (a) Different surface albedos, the droplet effective radius of 10  $\mu\text{m}$ ; (b) different phases and effective radii, the surface albedo of 0.1

短波辐射中的偏振成分主要来自散射子的单次散射,且云层中 80% 的单次散射来自于云顶向下 100 m 内的云层<sup>[10]</sup>。当云光学厚度大于 2 时,其对偏振反射的影响达到饱和<sup>[11]</sup>。由于大气分子对短波段散射的贡献显著,因此 DPC 接收的 490 nm 偏振辐射受到下垫面和上方大气分子的共同影响。由于云顶上方不同高度的大气分子的光学厚度不同,因此利用 490 nm 的偏振反射可以为识别高层云提供信息。根据单次散射近似,纯散射介质大气顶端的上行偏振辐亮度可表示为

$$L_p(0, \mu, \varphi) = \frac{\mu_0}{4\pi(\mu_0 + \mu_v)} q(\mu_v, \varphi_v, -\mu_0, \varphi_0) \times E_0 \left\{ 1 - \exp \left[ -\tau^* \left( \frac{1}{\mu_v} + \frac{1}{\mu_0} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中:  $\mu_0 = \cos \theta_0$ ,  $\mu_v = \cos \theta_v$  分别是太阳天顶角和观测天顶角的余弦;  $\varphi_0, \varphi_v$  分别是太阳方位角和观测方位角;  $q(\mu_v, \varphi_v, -\mu_0, \varphi_0)$  为散射相矩阵中的第二个元素,即偏振相函数;  $\tau^*$  为整层大气的光学厚度。散射角  $\Theta$  和观测几何的关系为

$$\cos \Theta = -\mu_v \mu_0 - \sqrt{(1 - \mu_v^2)(1 - \mu_0^2)} \cos \varphi, \quad (5)$$

式中:  $\varphi = \varphi_v - \varphi_0$ , 为相对方位角。文献[11]中指出,晴空时(4)式可简化为

$$L_p(\Theta) = \frac{\tau_m}{4\pi\mu_v} q(\Theta) E_0 = \frac{3\tau_m}{16\pi\mu_v} E_s (1 - \cos^2 \Theta), \quad (6)$$

式中:  $\tau_m$  为大气分子的光学厚度。而单独考虑云顶贡献时(4)式可写为

$$L_p(\Theta) = \frac{\mu_0}{4\pi(\mu_0 + \mu_v)} q(\Theta) E_0, \quad (7)$$

定义几何归一化偏振辐亮度为

$$L_{pg} = \pi\mu_v L_p / E_0, \quad (8)$$

结合(4)~(8)式可知,  $L_{pg}$  与散射角  $\Theta$  有关,且因云顶高度  $H$  决定了云层上方大气分子的光学厚度  $\tau_m$ , 所以  $L_{pg}$  受  $\Theta$  和  $H$  的共同影响。

用 libRadtran 模拟了高度  $H$  为 6~18 km、光学厚度为 2 的冰云的  $L_{pg}$  随散射角  $\Theta$  的变化,其结果如图 2 所示。模拟时设置  $\alpha = 1, \theta_0 = 56^\circ$  且采用主平面观测。

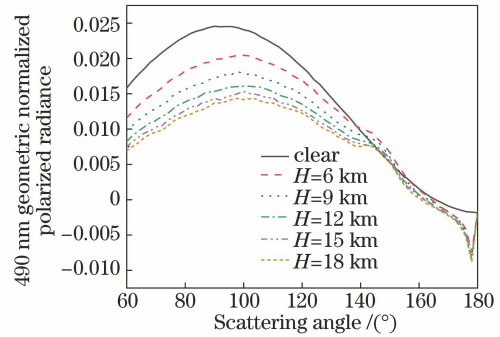


图 2 不同高度冰云上方 490 nm 几何归一化偏振辐亮度模拟

Fig. 2 Simulated geometric normalized polarized radiance above ice clouds with different heights

假定地表为朗伯体。根据单次散射和纯散射近似,晴空条件下的  $L_{pg}$  正比于大气分子的偏振相函数  $q_m(\Theta) = 3/4 \times (\cos^2 \Theta - 1)$ , 如图 2 中“clear”所示,可以看出,冰云的存在使  $L_{pg}$  呈现出明显的分段特点:当  $\Theta \leq 120^\circ$  时,分子的偏振散射起主导作用,不同高度的下垫面对应的曲线差别明显;在此区间外,因  $q_m(\Theta)$  减小,冰云成为主要贡献。此模拟说明可以利用 DPC 蓝光波段的偏振信息识别亮地表上空的高层云。

耀光区域的云检测可以用 865 nm 的线偏振度来实现,即

$$P_L = \sqrt{Q^2 + U^2} / I. \quad (9)$$

这里把水面对太阳的反射近似为镜面反射,在一定的观测范围内(如布儒斯特角附近)可观测到很高的线偏振度,而来自云层的多次散射则起到退偏效果。故可通过 865 nm 通道偏振度阈值检测来实现耀光区域的云检测。

### 2.2 算法实现

单像元单方向云检测由反射率检测、偏振度检测、490 nm 偏振检测和反射率比值检测四部分组成,算法流程如图 3 所示,图中  $R_{865}^{\text{clear}}, R_{670}^{\text{clear}}$  为 865 nm、670 nm 晴空反射率,  $L_{\text{pg},490}^{\text{clear}}$  为 490 nm 晴空

几何归一化偏振辐亮度。这三个参数可根据不同下垫面类型求解辐射传输方程分别得出,并将计算结果存储于查找表中。假定陆地表面为朗伯体,陆地表面特性采用 MODIS 地表反照率产品(MCD43),海洋表面双向反射比(BRDF)由 Cox&Munk 模型<sup>[12]</sup>计算得出。 $\Theta, \beta$  可根据相应像元的观测几何求出。 $T_j (j=1,2,\dots,10)$  为一系列基于模拟结果和程序测试后确定的检测阈值。辐射传输模型考虑了气溶胶的影响,气溶胶的物理特性和高度廓线分别来自 Hess-OPAC 气溶胶混合模型中的海洋型气溶胶、沙尘型气溶胶和热带海洋型气溶胶<sup>[13]</sup>。

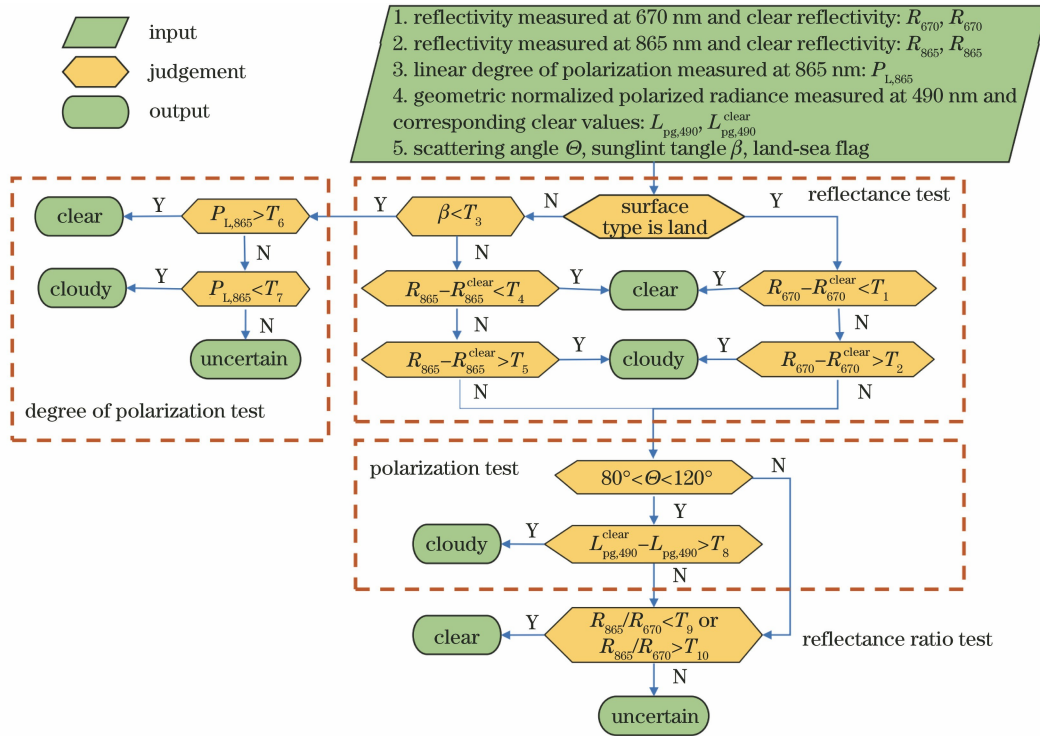


图 3 云检测算法流程图

Fig. 3 Flowchart of the cloud detection algorithm

通过上述方法,对单个像元所有观测方向进行云检测。若在某一方向上检测结果为“有云”则将该像元标记为“有云”;若所有方向均“不能确定”,则将该像元标记为“不能确定”。

### 2.3 云检测算法有效性验证

POLDER 的云检测算法属于“地球辐射收支和云”(ERB and Clouds)处理线,可利用一系列光谱和偏振信息相互独立的阈值来检测<sup>[14]</sup>。POLDER 获取的全球云覆盖率与 Meteo-France 提供的地面站点观测数据的不一致性为 10%左右,其中大部分差异来自冰雪地区的误判和薄云的漏判<sup>[15]</sup>,与 MODIS 的年均全球云覆盖率的一致性为 88%<sup>[16]</sup>,与 METEOSSET 的不一致率(得到完全相反的检测

结果)为 1.7%<sup>[17]</sup>。本文选取 POLDER/PARASOL 在 2011 年 7 月 18 日的一轨 1 级观测数据,作为后续算法验证的数据源。由本文算法得到的云检测结果和 POLDER 云掩模产品的一致性如图 4 所示,图 4(d)中偏差值为 -1 的像元表示 POLDER 判定为“有云”而本文算法判定为“晴空”;0 表示二者判定结果一致;1 表示 POLDER 判定为“晴空”而本文算法判定为“有云”。

定义与 POLDER 产品的一致性为

$$C^i = \frac{\sum_{x,y} N_{x,y}^i}{\sum_{x,y} M_{x,y}^i}, \quad (10)$$

式中:上标表示对比的项目,如“晴空判别”、“有云判

别”、“水云判别”、“冰云判别”等; $M_{x,y}^i$ 表示 POLDER 结果中符合项目  $i$  的像元; $N_{x,y}^i$ 表示通过本文算法得

到的结果与 POLDER 结果同时符合项目  $i$  的像元。云检测一致性的统计结果如表 1 所示。

表 1 本文云检测结果与 POLDER 云掩模产品一致性统计

Table 1 Statistics on the consistency between the cloud detection results gained from this paper and POLDER's cloud mask products

Number of total pixel	Consistency of cloudy pixels	Consistency of clear pixels
45895	93.3%	92.9%

图 4 和表 1 表明,本文算法检测结果与 POLDER 云掩模产品具有较好的一致性,云检测算法的可行性得以验证,但不一致的像元仍存在。产生不一致区域的原因可能有:1)海洋表面的建模存在差异。尽管本文算法和 POLDER 云检测算法都使用了 Cox and Munk 模型,但本文考虑的风速是标量而非矢量,而 POLDER 算法通过 ECMWF (European Centre for Medium Range Weather

Forecasts)分析得到了洋面的风速矢量并将其考虑进模型中<sup>[14]</sup>。2)检测阈值设置的差异。3)POLDER云检测算法中陆地上空的晴空反射率来自其先前的晴空实测数据,未考虑到 DPC 的数据积累,而本文算法则是通过地表反照率近似计算得到。可以预见,随着 DPC 观测数据量的增加,用 DPC 的晴空实测数据替代计算值,可以使云检测的准确性得到提升。

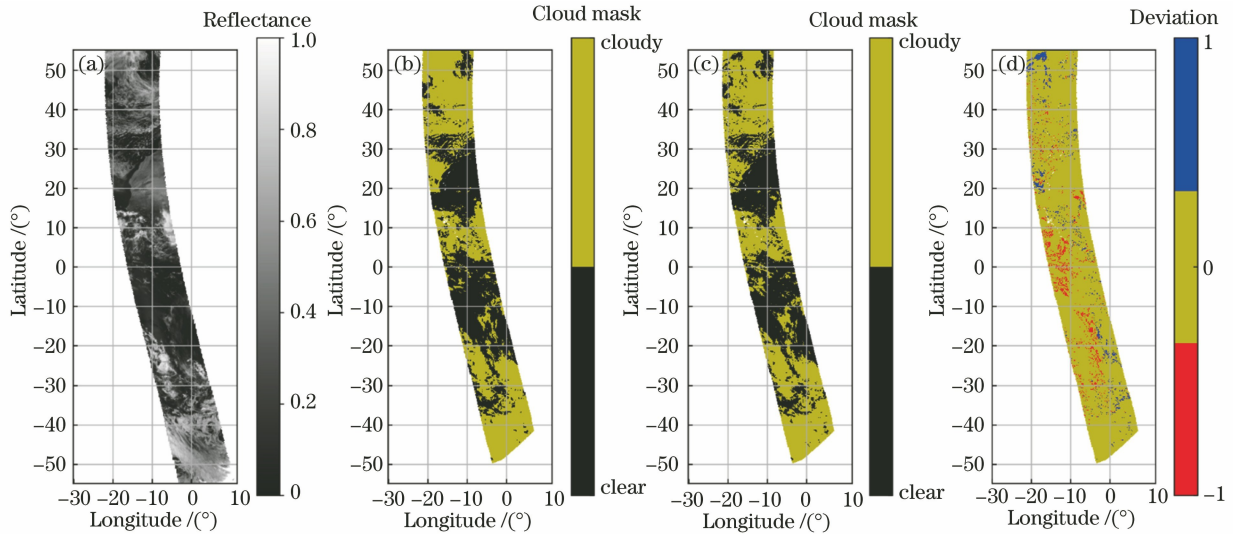


图 4 云检测结果。(a)865 nm(海洋)和 670 nm(陆地)反射率;(b)本文算法云识别结果;(c)POLDER 云掩模产品;(d)二者一致性对比

Fig. 4 Cloud detection results. (a) Reflectance at 865 nm (for the ocean) and 670 nm (for land); (b) cloud detection results obtained by our algorithm; (c) POLDER's cloud mask products; (d) comparison of the consistency between both of the results

### 3 多角度偏振云相态识别

研究表明,水云和冰云不仅对热红外波段的吸收有差异,其偏振特性也明显不同,这种不同是由粒子形状决定的<sup>[18-19]</sup>,因此有可能通过多角度偏振观测来判断云的相态。

#### 3.1 原理

定义大气顶端的归一化偏振辐亮度为

$$L_p = \pi \sqrt{Q^2 + U^2} / E_0. \quad (11)$$

如第 2 节所述,辐射传输中的偏振成分主要取决于散射子的单次散射。由瑞利散射可知,分子在 865 nm

的散射截面是 490 nm 的 1/16,因此可忽略大气分子 865 nm 的偏振贡献。根据单次散射近似,对于光学厚度大于 2 的云层,归一化偏振辐亮度为<sup>[20]</sup>

$$L_{p,865} = \frac{\cos \theta_0}{4(\cos \theta_0 + \cos \theta_v)} q(\Theta), \quad (12)$$

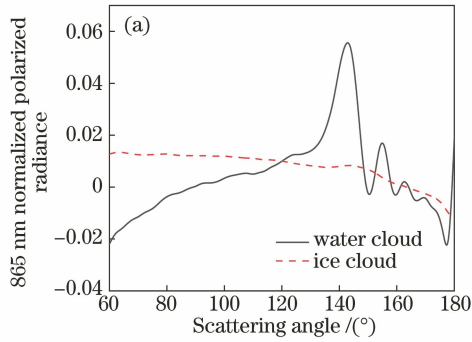
式中: $q(\Theta)$ 是云粒子在 865 nm 的偏振相函数。(12)式表明,可以通过仪器观测到的偏振辐亮度判断云的相态。实际应用中,定义归一化偏振辐亮度为

$$L_{pn} = L_{pr} - L_{pl} = L_p (\sin \chi - \cos \chi), \quad (13)$$

式中: $L_{pr}, L_{pl}$ 分别为垂直和平行散射平面的偏振分量; $\chi$ 为相对于散射平面的偏振角。

图 5(a)是用 libRadtran 模拟得到的一组  $L_{pn}$  的角度分布,其中  $\theta_0 = 56^\circ, \theta_v$  在主平面内变化。假设水云的谱分布为修正的 Gamma 分布<sup>[21]</sup>,有效半径采用 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 测得的海洋上空的年平均值为  $11 \mu\text{m}$ <sup>[22-23]</sup>。冰云采用 Yang13 模型<sup>[24]</sup>,有效半径设为  $20 \mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>。冰云和水云的光学厚度均为 4,有效方差为 0.01。图 5(a)中两曲线的差异主要来自于球形粒子和非球形粒子偏振相函数的差异。图 5(b)是 POLDER 在 865 nm 的一组实测值,分别对应水云和冰云。

从图 5 可以看出:1)水云在  $\theta \leq 140^\circ$  时呈现正



斜率,  $\theta \geq 140^\circ$  时呈现负斜率,且在  $140^\circ$  处出现峰值,冰云则整体呈现负斜率且无峰值;2)水云在  $120^\circ \leq \theta \leq 140^\circ$  出现斜率突增,在  $150^\circ \leq \theta \leq 170^\circ$  出现明显震荡,冰云全程平滑。

冰云经常覆盖于厚水云之上,在垂直方向上形成冰水混合云<sup>[20]</sup>。图 6 模拟了光学厚度为 15 的水云上方覆盖不同光学厚度冰云的情形。可以看出,因为  $L_{pn}$  主要取决于上层云,当冰云的光学厚度  $\tau_{ic}$  变大时,  $L_{pn}$  的峰值以及到达峰值前的斜率逐渐减小,其角度分布同时呈现冰云和水云的特点。当  $\tau_{ic} \geq 4$  以后,  $L_{pn}$  完全呈现冰云的特点。

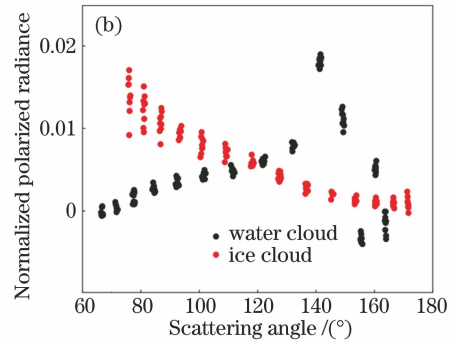


图 5 冰云和水云上方 865 nm 归一化偏振辐亮度。(a)模拟值;(b) POLDER 实测值

Fig. 5 normalized polarized radiance at 865 nm above ice clouds and water clouds. (a) Simulation; (b) POLDER's measured values

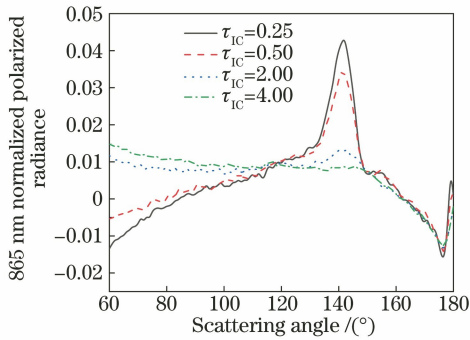


图 6 双层云上方归一化偏振辐亮度模拟

Fig. 6 Simulated normalized polarized radiance above a two-layer cloud

### 3.2 云相态判别算法的实现

实际观测中,如果遇到空间结构不均匀的混合云,同一像元不同方向或不同像元同一方向之间的观测值可能会出现无规律跳动,导致无法准确提取偏振特征<sup>[19]</sup>。为解决这一问题,本文将  $3 \times 3$  像元区域的观测值进行合并以减小云空间异质性的影响。

云相态判别算法实现流程如图 7 所示,输入有云区域上空的归一化偏振辐亮度,经过斜率检测、峰值检测和震荡检测,输出相态判别结果,图中:  $T_A$ ,

$T_B, T_C, T_D$  也为一系列基于模拟结果和程序测试后确定的检测阈值;  $F_{wc}$  和  $F_{ic}$  为水云和冰云标识;  $h$  为散射角大于  $135^\circ$  时  $L_{pn}$  的最大值;  $\theta_m$  为此时  $h$  所对应的散射角;  $a, b$  为散射角小于  $135^\circ$  时  $L_{pn}$  的拟合斜率与截距;  $a_2, b_2$  为散射角大于  $\theta_m$  时  $L_{pn}$  的拟合斜率与截距。

### 3.3 云相态判别结果分析

POLDER 主要利用 865 nm 偏振通道实现相态判别。在 POLDER 的云相态产品中,检索值被分为 5 个区间,分别对应“水云”、“冰云”、“混合态”、“不确定”和“晴空”。在每个区间内,值越小置信度越高,值越大置信度越低。POLDER 对单一相态云的判别精度在与毫米波雷达、微秒脉冲激光雷达以及无线电探空仪联合观测数据的对比中得以验证<sup>[25]</sup>。

利用本文算法得到的云相态与 POLDER 云相态产品的对比如图 8 所示,图 8(d)中偏差值为 0 的像元表示判断结果一致,而偏差值为 1 表示判断结果不一致。

与云检测一致性的定义类似,由(6)式可得云相态判别的一致性,如表 2 所示。

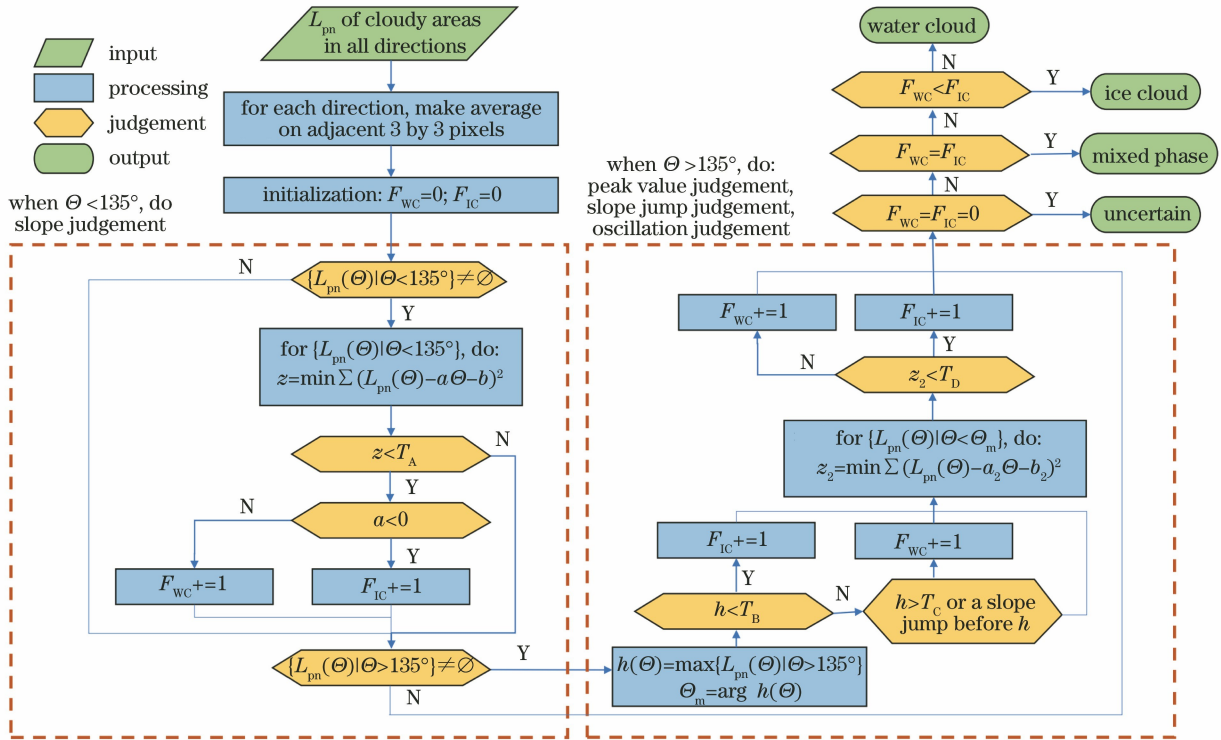


图 7 云相态判别流程图

Fig. 7 Flowchart of the cloud thermodynamic phase judgement

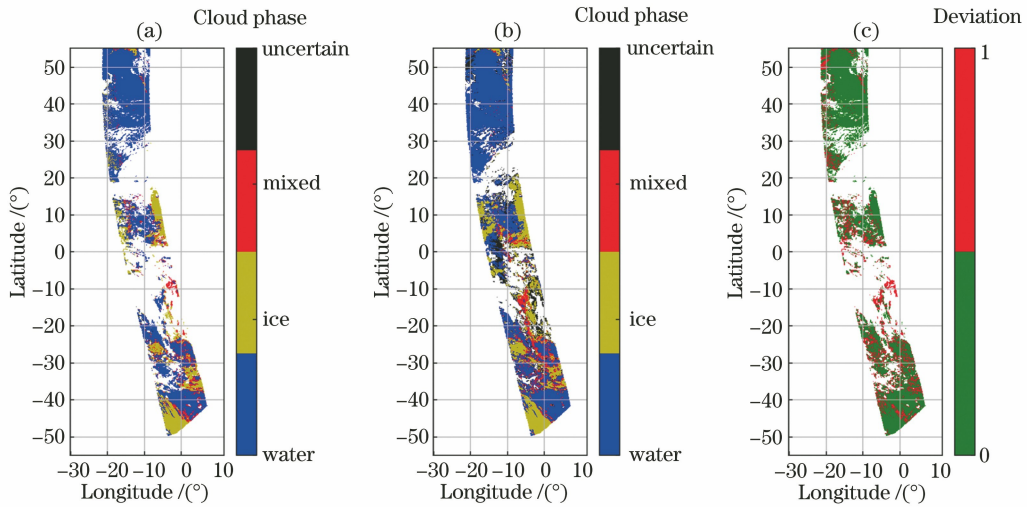


图 8 云相态判别结果。(a)本文算法得到的相态分布;(b)POLDER云相态产品;(c)判别一致性对比

Fig. 8 Results of cloud thermodynamic phase judgement. (a) Thermodynamic phase distribution obtained by our method; (b) POLDER's thermodynamic phase products; (c) comparison of judgmental consistency

表 2 本文相态判别结果与 POLDER 云相态产品的一致性统计

Table 2 Statistics of the consistency between the cloud phase judgement results obtained by our method and POLDER's products

Number of total pixel	Consistency of "WC" pixels	Consistency of "IC" pixels	Consistency of "mixed phase" pixels
26590	87.4%	76.6%	22.8%

综合图 8 和表 2, 可认为本文算法基本实现利用多角度偏振数据获取区域上空云相态的功能。从图 8(c) 可以看出, ( $22^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ ,  $15^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{W}$ ) 存在较多与 POLDER 判别结果不一致的像元。分析该区域 865 nm 多角度偏振数据可以发现, 该区域对应  $90^{\circ}\leq\theta\leq 125^{\circ}$  的散射角, 此范围无法提供虹的偏振信息。另外, 经计算, 对于置信度较高的观测,  $L_{\text{pn}}$  与  $\theta$  的相关系数大于 0.9(水云)、-0.9(冰云), 而该区域的相关系数低于 0.3。云层不均匀可能是导致低相关和低判别置信度的原因(POLDER 的判别数值为 79, 证实了判别结果的低置信度)。另外, 从表 2 可知, 混合云的判别一致性较低, 这可能是由阈值设

置差异以及混合云本身的复杂性导致的。通过以上分析可以得出, 利用多角度偏振数据可以判别云相态, 但是对于空间分布不均匀、混合相态的云或者当观测角度受到限制的情形, 判别的不确定度增加。

## 4 云光学厚度反演

### 4.1 原理及算法实现

由图 1 可知, 当地表反射贡献不大时, 大气顶端反射率对云光学厚度有很好的敏感性。如果已知观测几何并且可将地表反射特性、大气分子和气溶胶廓线以及云微物理特性作为先验知识, 即可通过反射率反演出云的光学厚度。反演光学厚度的查找表见表 3。

表 3 云光学厚度查找表

Table 3 Look up table for deriving cloud optical thickness

Parameter	Value
Wavelength $\lambda$ /nm	670 (for land); 865 (for the ocean)
Cloud thermodynamic phase for water cloud	Mie model and modified Gamma distribution with $r_{\text{eff}}=10\ \mu\text{m}$
Cloud thermodynamic phase of ice cloud	Yang13 model with $r_{\text{eff}}=20\ \mu\text{m}$
Optical thickness $\tau$	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 40, 50
Solar zenith $\theta_0/(\text{^\circ})$	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90
Viewing zenith $\theta_v/(\text{^\circ})$	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90
Relative azimuth $\varphi/(\text{^\circ})$	0, 45, 90, 135, 180
Albedo of land	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0
BRDF of the ocean	Cos and Munk's model (1956)

基于云检测结果和相态识别结果, 对一个像元所有有效观测角度进行云光学厚度反演, 接着以所有方向的平均值作为该像元的光学厚度。多角度观测的优势不仅在于可以有效避开耀光区域, 其反演结果的均值和标准差还可以为云的非均质程度和平面平行大气假设的准确度提供评判标准<sup>[14]</sup>。

### 4.2 反演结果对比

POLDER 的云光学厚度算法同样使用 670 nm 和 865 nm 分别作为陆地和海洋上空的反演波段, 冰云模型采用各向异性六边形单晶假设(IHM)<sup>[26]</sup>, 水云模型采用球形粒子假设<sup>[27]</sup>。而 MODIS 的冰云模型为“Baum05”<sup>[28]</sup>, 对二者云光学厚度产品的对比研究揭示: 由于 POLDER 与 MODIS 的空间分辨率、观测角度数以及所采用云微物理模型的不同, POLDER 云光学厚度系统性小于 MODIS 云光学厚度<sup>[29]</sup>。

由本文算法得到的云光学厚度与 POLDER 云

光学厚度产品的对比如图 9 所示。

从反演结果来看, 多数像元的光学厚度与 POLDER 的光学厚度有较好的一致性, 但同时可以看到, 在视场右边缘存在两块误差较大的区域。图 9(d) 显示了纬度分别为(从上到下):  $42^{\circ}\text{N}$ ,  $7^{\circ}\text{N}$ ,  $25^{\circ}\text{S}$  的三处光学厚度沿经度的分布, 其中  $7^{\circ}\text{N}$ ,  $25^{\circ}\text{S}$  分别穿过图 9(c) 中的两片大误差区域。分析造成这些误差的原因可能是: 1) 该区域对应虹或靠近后向散射方向, 云粒子相函数在此区间不光滑, 导致角度插值引入的误差增大。要减小这一类误差, 可将该方向的辐射分为单次散射和多次散射两部分, 其中单次散射部分通过计算获得, 仅对多次散射部分插值查表<sup>[30]</sup>。2) 由图 1 可知, 反射率对光学厚度的敏感度随光学厚度的增大而下降, 当光学厚度大于 20 后, 反演误差变大。除此之外, 还可能因辐射模型不一致带来的误差以及第 3 节云相态判别不



一致产生的误差。图 9(e)显示了本文反演结果与 POLDER 反演结果的相关性,二者的 Pearson 相关系数  $\rho$  为 0.89。综合图 9 可认为,本文的算法在利

用多光谱、多角度数据反演光学厚度方面具有可行性,但仍需要提升模型和计算的准确性,并对结果进行更广泛的验证。

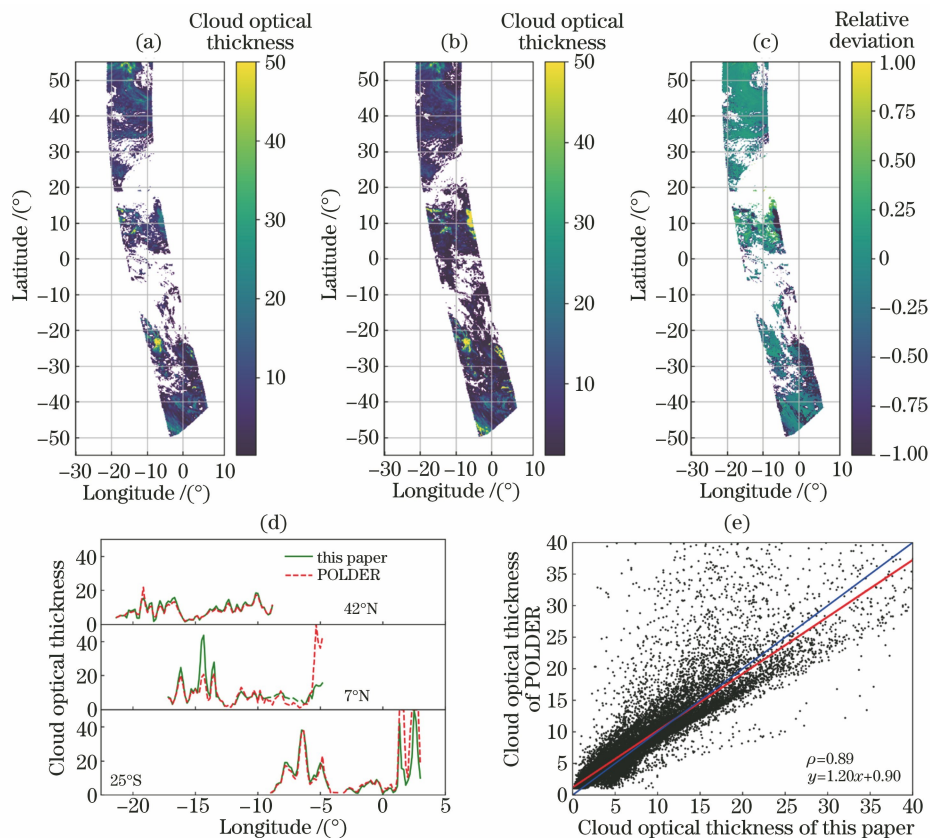


图 9 云光学厚度反演结果对比。(a)本文算法得到的云光学厚度;(b) POLDER 云光学厚度产品;(c)二者相对偏差;(d)不同纬度下云光学厚度沿经度的分布;(e)反演结果相关性

Fig. 9 Comparison of the inversion results of cloud optical thickness. (a) Cloud optical thickness obtained by our method; (b) POLDER's cloud optical thickness products; (c) relative deviation; (d) distributions of cloud optical thickness along longitudes in different latitudes; (e) correlation of inversion results

## 5 结 论

针对 DPC/POLDER 的多光谱、多角度偏振观测数据,发展了一套数据处理算法,可实现:1)单轨数据所有像元的云检测;2)云像元的相态识别;3)云像元光学厚度的反演。将算法应用于 POLDER 的一轨观测数据,并将结果与 POLDER 相应的产品对比以验证算法可行性,得出判云一致性、判晴一致性分别为 93.3%和 92.9%;水云、冰云、混合云的判别一致性分别为 87.4%,76.6%和 22.8%;光学厚度的相关系数为 0.89,从而证明该算法可行有效。由于 DPC 与 POLDER 在观测原理和数据结构上的相似性,该算法可在调整像元分辨率后应用于 DPC 数据,为发展 DPC 业务化的云产品提供参考。

之后的工作可从以下三方面展开:1)建立更合理的物理模型以提高算法精度。如:在云检测算法

中,用 DPC 的实测晴空数据建立陆地 BRDF 模型代替朗伯体假设;建立考虑风速矢量的海面 BRDF 模型代替标量假设;增加氧 A 带的云高检测等。在相态识别算法中,可加入云高判据。在光学厚度反演算法中,引入球面大气假设并分开考虑单次散射和多次散射的影响,采用更符合实际情况的冰云模型等。2)将算法应用于 DPC 数据并完成同其他平台观测数据的对比验证,例如 MODIS、CALIPSO、CLOUDSAT 和 AERONET 数据。3)进一步开发应用于月平均全球统计观测数据的云参数检索算法。

## 参 考 文 献

- [1] Rossow W B, Delo C, Cairns B. Implications of the observed mesoscale variations of clouds for the earth's radiation budget [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(6): 557-585.

- [2] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation: 2<sup>nd</sup> edition[M]. Dmowska R, James R, Rossby H, et al. An introduction to atmospheric radiation. California: Academic Press, 2002, 84: 348-427.
- [3] Platnick S, King M D, Ackerman S A, et al. The MODIS cloud products: algorithms and examples from terra[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 459-473.
- [4] Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, et al. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2011, 4(7): 1383-1395.
- [5] Zhang M M, Meng B H, Luo D G, et al. Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0812004.  
张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 等. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0812004.
- [6] Sun B, Jäkel E, Schäfer M, et al. A biased sampling approach to accelerate backward Monte Carlo atmospheric radiative transfer simulations and its application to Arctic heterogeneous cloud and surface conditions[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 240: 106690.
- [7] Emde C, Buras-Schnell R, Kylling A, et al. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1)[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(5): 1647-1672.
- [8] Huete A R. Remote sensing for environmental monitoring[M]// Artiola J F, Pepper I L, Brusseau M L. Environmental monitoring and characterization. Burlington: Academic Press, 2004: 183-206.
- [9] Saunders R W, Kriebel K T. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(1): 123-150.
- [10] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. Space Science Reviews, 1974, 16(4): 527-610.
- [11] Goloub P, Deuze J L, Herman M, et al. Analysis of the POLDER polarization measurements performed over cloud covers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(1): 78-88.
- [12] Cox C, Munk W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. Journal of the Optical Society of America, 1954, 44(11): 838-850.
- [13] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831-844.
- [14] Buriez J C, Vanbauce C, Parol F, et al. Cloud detection and derivation of cloud properties from POLDER[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(13): 2785-2813.
- [15] Bréon F M, Colzy S. Cloud detection from the spaceborne POLDER instrument and validation against surface synoptic observations[J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(6): 777-785.
- [16] Zeng S, Parol F, Riedi J, et al. Examination of POLDER/PARASOL and MODIS/Aqua cloud fractions and properties representativeness[J]. Journal of Climate, 2011, 24(16): 4435-4450.
- [17] Parol F, Buriez J C, Vanbauce C, et al. First results of the POLDER "earth radiation budget and clouds" operational algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1597-1612.
- [18] Chepfer H, Goloub P, Riedi J, et al. Ice crystal shapes in cirrus clouds derived from POLDER/ADEOS-1[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D8): 7955-7966.
- [19] Bréon F M, Goloub P. Cloud droplet effective radius from spaceborne polarization measurements[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(11): 1879-1882.
- [20] Goloub P, Herman M, Chepfer H, et al. Cloud thermodynamical phase classification from the POLDER spaceborne instrument[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D11): 14747-14759.
- [21] Hansen J E. Multiple scattering of polarized light in planetary atmospheres. Part I. the doubling method[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1971, 28(1): 120-125.
- [22] Nakajima T, King M D. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: theory[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1990, 47(15): 1878-1893.
- [23] Han Q Y, Rossow W B, Lacis A A. Near-global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using ISCCP data[J]. Journal of Climate, 1994, 7(4): 465-497.
- [24] Yang P, Bi L, Baum B A, et al. Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100  $\mu\text{m}$ [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(1): 330-347.

- [25] Riedi J, Goloub P, Marchand R T. Comparison of POLDER cloud phase retrievals to active remote sensors measurements at the ARMSGP site [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(11): 2185-2188.
- [26] Labonnote L C, Brogniez G, Doutriaux-Boucher M, et al. Modeling of light scattering in cirrus clouds with inhomogeneous hexagonal monocrystals. Comparison with *in situ* and ADEOS-POLDER measurements [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(1): 113-116.
- [27] Buriez J C. An improved derivation of the top-of-atmosphere albedo from POLDER/ADEOS-2: narrowband albedos [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(D5): D05202.
- [28] Baum BA, Heymsfield A J, Yang P, et al. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part I: microphysical data and models [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44 (12): 1885-1895.
- [29] Zhang Z, Yang P, Kattawar G, et al. Influence of ice particle model on satellite ice cloud retrieval: lessons learned from MODIS and POLDER cloud product comparison [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(18): 7115-7129.
- [30] Leroy M, Deuzé J L, Bréon F M, et al. Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 17023-17037.