

# 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响

李树<sup>1,2</sup>, 孙晓兵<sup>1</sup>, 提汝芳<sup>1</sup>, 黄红莲<sup>1</sup>, 陈震霆<sup>1,2</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** 为研究不同散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响, 计算了不同光学厚度下, 一般种类混合模型(GHM)、实心柱状模型(SC)和聚合物实心柱状模型(ASC)取不同有效粒子半径时的反射率。理论分析了不同散射模型及其不同有效粒子半径对卷云光学厚度反演结果的影响。使用基于倍加累加法的矢量辐射传输模型 RT3 计算 3 种模型卷云光学厚度查找表, 基于 POLDER 数据, 采用查找表法进行卷云光学厚度反演实验, 实验结果与理论分析一致。结果可知: 采用不同散射模型反演得到的卷云光学厚度存在较大差异, 相比 GHM 和 SC 模型, ASC 模型卷云光学厚度反演结果更接近 POLDER 产品; 有效粒子半径越大, 光学厚度反演结果越大, GHM 和 SC 的增幅较大, 而 ASC 增幅很小。因此, 在不具备有效粒子半径反演能力时, 建议采用 ASC 模型反演卷云光学厚度, 以减小有效粒子半径变化对反演结果的影响。上述研究对我国 GF-5 卫星的卷云光学厚度反演的散射模型选取及反演结果评价具有参考价值。

**关键词** 大气光学; 卷云; 光学厚度; 反演; 有效粒子半径

中图分类号 P407.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0701001

## Influence of Scattering Model and Effective Particle Radius on Cirrus Cloud Optical Thickness Retrieval

Li Shu<sup>1,2</sup>, Sun Xiaobing<sup>1</sup>, Ti Rufang<sup>1</sup>, Huang Honglian<sup>1</sup>, Chen Zhenting<sup>1,2</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** In order to investigate the influence of different scattering models and effective particle radii on the cirrus cloud optical thickness retrieval, we simulate the reflectance of different effective radii based on General Habit Mixture (GHM), Solid Column (SC) and Aggregates of Solid Column (ASC) under different cirrus cloud optical thicknesses. The influence of different scattering models and effective radii on the retrieval results of the cirrus cloud optical thickness is theoretically analyzed. The cirrus cloud optical thickness look-up tables of GHM, SC and ASC are calculated by radiative transfer model RT3 based on vector doubling-adding method. The cirrus cloud optical thickness is retrieved by the look-up table method based on the POLDER data. It is found that the retrieval results are consistent with the theoretical analysis. The theoretical analysis and retrieval results show that, for different models, the cirrus cloud optical thickness retrieval results are obviously different. Compared with the GHM and SC models, the retrieval results of cirrus cloud optical thickness by the ASC model are closer to POLDER products. In addition, for these models, the retrieval results of the cirrus cloud optical thickness increase with the increase of effective radius. The results of the ASC model are no obvious increase with the increase of the effective radius, and the results of the GHM and SC models increase greatly with the increase of effective radius. Therefore, when the instrument lacks the ability to retrieve the effective radius, it is suggested that the ASC model can be used to retrieve the cirrus cloud optical thickness, so as to reduce the influence of the effective particle radius variation on

收稿日期: 2017-11-20; 收到修改稿日期: 2018-01-26

基金项目: 国家国防科工局高分专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(32-Y20A22-9001-15/17)、中国资源卫星应用中心支持项目

作者简介: 李树(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事大气光学遥感方面的研究。E-mail: lishu\_owen@sina.com

导师简介: 孙晓兵(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学遥感技术方面的研究。

E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn(通信联系人)

the retrieval results. This study can help to develop cirrus cloud optical thickness algorithms for GF-5 satellite in China.

**Key words** atmospheric optics; cirrus cloud; optical thickness; retrieval; effective particle radius

**OCIS codes** 010.0280; 010.1310; 010.1615; 290.1090

## 1 引 言

卷云的垂直分布主要从对流层的上部到平流层的下部,水平分布从几千米到上百万米,其分布具有全球性,约覆盖地球上空 20%~30%的区域。卷云对大气的辐射收支具有重要的作用,在气候系统中扮演着重要的角色<sup>[1]</sup>。一般认为,大多数卷云的净辐射强迫是积极的(如大气变暖)<sup>[2-3]</sup>,但是对其引起全球变暖的机制认识还很不足<sup>[4]</sup>。目前,在大气环流模式(GCMs)中,卷云的参数化依旧比较粗糙。为了提高对卷云在气候扮演角色的认知,需对卷云进行全球范围的连续观测。卫星观测具有全球连续观测卷云的能力,特别是大幅宽的有效载荷,如MODIS、POLDER等。MODIS有36个通道,光谱范围从0.415  $\mu\text{m}$ 到14.235  $\mu\text{m}$ ,星下点空间分辨率随通道在250 m $\times$ 250 m到1 km $\times$ 1 km之间变化<sup>[5]</sup>。POLDER有9个通道,光谱范围从0.443  $\mu\text{m}$ 到1.02  $\mu\text{m}$ ,其中3个通道是偏振通道,星下点空间分辨率约为5.3 km $\times$ 6.2 km<sup>[6]</sup>。我国GF-5号卫星搭载了由中国科学院安徽光学机械精密研究所研制的多角度偏振成像仪(DPC)<sup>[7]</sup>,DPC通道设置与POLDER基本一致。

通过MODIS与POLDER的观测数据可以反演大多数云参数,对云辐射强迫起决定性作用的云光学厚度(COT)就是其中一个参数。MODIS采用Baum05<sup>[8]</sup>模型作为卷云体散射模型,使用查找表方法同时反演卷云光学厚度和有效粒子半径。POLDER采用非均匀六角柱晶体模型(IHM)<sup>[9]</sup>作为卷云散射体模型,使用查找表方案,反演卷云光学厚度。由于在POLDER光谱覆盖范围内冰晶吸收很弱,因此POLDER不具备反演卷云有效粒子半径的能力<sup>[2]</sup>。

云光学厚度反演与云的体散射模型和有效粒子半径有关。卷云由不同形状和尺度的冰晶粒子组成,冰晶粒子的形状复杂多样,包括柱状、板状、子弹花、过冷水滴、聚合物粒子等<sup>[10]</sup>,目前还很难给出能精确表征卷云散射特性的模型。冰晶粒子的单次散射特性研究一直是国际研究的一个热点,其中Yang等<sup>[10-11]</sup>做了大量的工作,建立多种冰晶粒子从紫外到远红外谱段的单次散射特性数据库。Baum等<sup>[12]</sup>

在2014年公布了一般种类混合模型(GHM)、实心柱状模型(SC)和聚合物实心柱状模型(ASC)3种模型的体散射数据库。研究这3种体散射模型是为了找到与实际观测的卷云微物理特性、偏振反射率一致性较好的散射模型,及不同波段下与光学厚度有较好一致性的散射模型,从而改善不同载荷及不同通道得到的卷云特性不一致的问题。GHM模型由表面严重粗糙的板状、过冷水滴、中空和实心柱状、中空和实心子弹花、聚合物实心柱状、一个小和一个大的聚合物板状9种粒子形状按比例组成;SC模型只由表面严重粗糙的实心柱状粒子组成;ASC模型只由表面严重粗糙的聚合物实心柱状粒子组成。IHM模型定义冰晶为六面体,且冰晶体内存在气泡或气溶胶粒子。与IHM模型相比,GHM模型考虑了更多的冰晶粒子形状的组合,SC模型结构更简单,ASC模型结构较为复杂。以上4种散射模型各有特点,目前没有充分证据证明哪种模型能更好地反映卷云散射的本质。根据文献<sup>[2]</sup>,在反演卷云光学厚度时,如果选取的散射模型与实际情况不符,反演结果会呈现出虚假的季节性变化。因此,在遥感应用中,应该根据应用场合和应用背景选择合适的散射模型对卷云特性进行反演。

本文将模拟分析GHM、SC和ASC3种体散射模型及不同有效粒子半径对卷云光学厚度的影响,然后使用POLDER数据进行反演实验,对比分析3种模型的反演结果,并与POLDER官方的产品进行比较分析。试图通过上述工作,找出光学厚度反演结果与卷云散射模型及其有效粒子半径的关系,为我国GF-5号卫星卷云光学厚度反演的散射模型选取和反演结果评价提供参考依据。

## 2 理论基础

### 2.1 卷云体散射特性计算

非球形冰晶粒子的散射特性计算方法主要有:T矩阵法<sup>[13]</sup>、有限差分域法(FDTD)<sup>[14]</sup>、离散偶极子近似法(ADDA)<sup>[15]</sup>和改进几何光学法(IGOM)<sup>[16]</sup>等。尽管非球形粒子单次散射特性的计算方法有很多种,但目前没有一种方法能单独有效地计算所有尺度和形状的非球形粒子的单次散射特性。一般采用多种散射计算方法联合求解任意形

状、任意尺度的非球形粒子的单次散射特性。Yang等<sup>[11]</sup>使用 ADDA、T 矩阵和 IGOM 联合计算波长从 0.2 μm 到 100 μm、粒子尺度从 2 μm 到 10000 μm 各种形状冰晶粒子的散射特性。

有效粒子半径是决定粒子单次散射特性的一个重要参数,对于体散射,有效粒子半径可以表示为

$$R_{\text{eff}} = \frac{1}{2}D_{\text{eff}} = \frac{3}{4} \frac{\sum_{h=1}^M \left[ \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} V_h(D) f_h(D) n(D) dD \right]}{\sum_{h=1}^M \left[ \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} A_h(D) f_h(D) n(D) dD \right]}, \quad (1)$$

式中:  $D_{\text{eff}}$  为有效粒子直径;  $V_h(D)$  为每种粒子体积;  $A_h(D)$  为每种粒子垂直于入射辐射的投影面积;  $f_h(D)$  为每种粒子在粒子体中占的百分比;  $n(D)$  为粒子的分布函数(云粒子一般服从 Gamma 分布);  $M$  为组成散射体的冰晶粒子种类个数;  $D_{\min}$ 、 $D_{\max}$  分别为粒子分布中的最小和最大粒子尺寸。

对于特定波长的体散射特性计算如下:

$$\bar{\sigma}_{\text{sca}}(\lambda) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M \sigma_{\text{sca},h}(D,\lambda) f_h(D) \right] n(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M f_h(D) \right] n(D) dD}, \quad (2)$$

式中:  $\bar{\sigma}_{\text{sca}}(\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  的体散射截面。

$$\bar{\sigma}_{\text{ext}}(\lambda) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M \sigma_{\text{ext},h}(D,\lambda) f_h(D) \right] n(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M f_h(D) \right] n(D) dD}, \quad (3)$$

式中:  $\bar{\sigma}_{\text{ext}}(\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  的体消光截面。

$$\bar{\omega}(\lambda) = \frac{\bar{\sigma}_{\text{sca}}(\lambda)}{\bar{\sigma}_{\text{ext}}(\lambda)}, \quad (4)$$

式中:  $\bar{\omega}(\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  的体单次散射反照率。

$$\bar{Q}_{\text{ext}}(\lambda) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M Q_{\text{ext},h}(D,\lambda) A_h(D) f_h(D) \right] n(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M A_h(D) f_h(D) \right] n(D) dD}, \quad (5)$$

式中:  $\bar{Q}_{\text{ext}}(\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  的体消光因子;  $A_h(D)$  为粒子尺度为  $D$  时的投影面积。

$$\bar{\beta}_{\text{exp}}(\lambda) = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M Q_{\text{ext},h}(D,\lambda) A_h(D) f_h(D) \right] n(D) dD, \quad (6)$$

式中:  $\bar{\beta}_{\text{exp}}(\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  的体消光系数。

$$\bar{P}(\Theta,\lambda) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M P_h(\Theta,D,\lambda) \sigma_{\text{sca},h}(D,\lambda) f_h(D) \right] n(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M \sigma_{\text{sca},h}(D,\lambda) f_h(D) \right] n(D) dD}, \quad (7)$$

式中:  $\bar{P}(\Theta,\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  的体散射相函数,  $\Theta$  为散射角。

$$\bar{g}(\lambda) = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M g_h(D,\lambda) \sigma_{\text{sca},h}(D,\lambda) f_h(D) \right] n(D) dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \left[ \sum_{h=1}^M \sigma_{\text{sca},h}(D,\lambda) f_h(D) \right] n(D) dD}, \quad (8)$$

式中:  $\bar{g}(\lambda)$  表示波长为  $\lambda$  的体不对称因子。由 (2)~(8) 式可计算体散射的单次散射特性。

## 2.2 矢量辐射传输方程

平面平行大气模型的矢量辐射传输方程可表示为<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned} \mu \frac{d\mathbf{I}(\tau,\mu,\phi)}{d\tau} = & -\mathbf{I}(\tau,\mu,\phi) + \\ & \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\mu,\phi;\mu',\phi') \mathbf{I}(\tau,\mu',\phi') d\mu' d\phi' + \\ & \frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp\left(\frac{-\tau}{\mu_0}\right) \mathbf{M}(\mu,\phi;-\mu_0,\phi_0) [1\ 0\ 0\ 0]^T + \\ & (1-\omega) \mathbf{B}(T) [1\ 0\ 0\ 0]^T, \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{I}$  为 Stokes 矢量; 等式右边第二项为多次散射贡献; 第三项为单次散射贡献;  $\omega$  为单次散射反照率;  $\tau$  为光学厚度;  $\mu$  为出射光天顶角余弦值;  $\phi$  为相对于太阳出射光线的方位角;  $\mu_0$  和  $\phi_0$  分别为太阳天顶角和方位角;  $F_0$  为大气顶的太阳辐射通量;  $\mathbf{B}$  为普朗克函数<sup>[17]</sup>;  $\mathbf{M}$  为单次散射相矩阵  $\mathbf{P}$  进行参考平面转换后的矩阵。卷云的单次散射相矩阵  $\mathbf{P}$  可以通过 2.1 节介绍的方法计算。

将 Stokes 矢量  $\mathbf{I}$  和矩阵  $\mathbf{M}$  进行傅里叶变换后, 结合 (9) 式可得每个傅里叶分量的辐射传输方程<sup>[18]</sup>:

$$\begin{aligned} \mu \frac{d\mathbf{I}(\tau,\mu)}{d\tau} = & -\mathbf{I}(\tau,\mu) + \frac{(1+\delta_{0m})\omega}{4} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\mu,\mu') \times \\ & \mathbf{I}(\tau,\mu') d\mu' + \frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp(-\tau/\mu_0) \mathbf{M}(\mu,-\mu_0) [1\ 0\ 0\ 0]^T. \end{aligned} \quad (10)$$

辐射传输方程的各种数值模式最后都可以归结为对 (10) 式的离散过程, 一般采用高斯数值积分对系数方程进行离散化。为方便求解, 矢量辐射传输方程求解将散射相矩阵中的各分量进行勒让德多项式展开。非球形粒子的单次散射相矩阵具有 6 个独立元素, 如下所示:

$$\mathbf{P}(\Theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\Theta) & P_{12}(\Theta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\Theta) & P_{22}(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\Theta) & P_{34}(\Theta) \\ 0 & 0 & -P_{34}(\Theta) & P_{44}(\Theta) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

散射相矩阵  $\mathbf{P}$  中各元素的勒让德多项式展开为

$$P_{ij}(\cos \Theta) = \sum_{n=0}^{N-1} C_n \cdot P_n(\cos \Theta), \quad (12)$$

式中:  $P_{ij}(\cos \Theta)$  为散射相矩阵中各独立元素;  $N$  为勒让德展开的项数,  $C_n$  为第  $n$  项勒让德多项式系数,  $P_n(\cos \Theta)$  为勒让德多项式第  $n$  项。

通过求解矢量辐射传输方程可以得到总辐射信息和偏振辐射信息。本文采用反射率  $R$  和偏振反射率  $R_p$  来表征卫星接收到的总辐射信息和偏振辐射信息, 其定义为

$$R = \pi I / (\mu_s E_0), \quad (13)$$

$$R_p = \pi \sqrt{Q^2 + U^2} / (\mu_s E_0), \quad (14)$$

式中:  $I, Q, U$  为 Stokes 参数;  $\mu_s$  为太阳天顶角的余弦;  $E_0$  为大气顶太阳的辐射通量。

### 3 体散射模型及有效粒子半径对光学厚度反演的影响

#### 3.1 反射率及偏振反射率对卷云光学厚度变化的敏感性分析

采用基于倍加累加法的矢量辐射传输模型 RT3<sup>[19]</sup> 模拟计算不同卷云光学厚度对反射率和偏振反射率的影响。在模拟计算时, 将大气分为 3 层: 底层为大气分子和气溶胶层、中间层为卷云层、上层为大气分子层。本文主要讨论海洋上空卷云光学厚度的反演, 波长取 865 nm, 地表类型设为海洋类型, 气溶胶为典型的海洋气溶胶类型。

假设卷云散射模型为 GHM 模型, 气溶胶光学厚度、地表反照率、卷云有效粒子半径恒定时, 改变云的光学厚度, 使用 RT3 模拟计算 865 nm 的反射率和偏振反射率。模拟条件: 卷云的有效粒子半径为 10  $\mu\text{m}$ , 地表反照率为 0.02, 太阳天顶角为 20°, 观测天顶角 14 个 (84°~180°), 云的光学厚度分别取 1, 2, 3, 10, 20, 30, 40。模拟结果如图 1 所示。

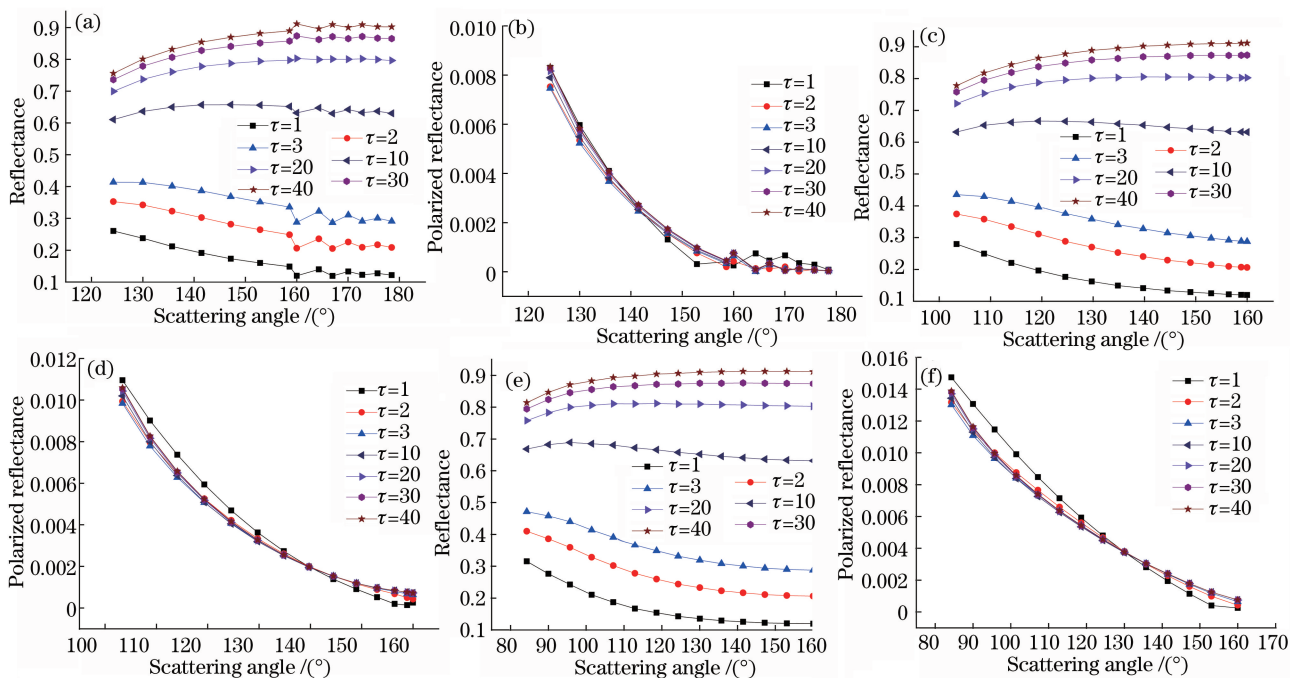


图 1 不同卷云光学厚度的反射率和偏振反射率随散射角的变化。

(a) (b) 相对方位角为 0°; (c) (d) 相对方位角为 90°; (e) (f) 相对方位角为 180°

Fig. 1 Values of reflectance and polarized reflectance as a function of scattering angle for different COT and relative azimuth angles of (a) (b) 0°, (c) (d) 90° and (e) (f) 180°

从图 1(a)、(c)、(e) 中可以看出, 散射角在 84° 到 180° 范围内, 反射率随光学厚度的增大而增大, 散射角越大, 反射率增幅越大。光学厚度从 1 增到

40 时, 散射角为 84° 和 180° 所对应的反射率增幅分别为 0.50 和 0.75。同时也看到, 随着光学厚度的增大, 反射率的增幅逐渐减小。当光学厚度从 10 增大

到 20 时,反射率的最大增幅为 0.16,而当光学厚度从 30 增大到 40 时,反射率的最大增幅只有 0.04 左右。说明光学厚度不是很大时,反射率对光学厚度的变化敏感,能很好地表征光学厚度的变化信息。图 1(b)、(d)、(f)反映了偏振反射率对卷云光学厚度变化的敏感性,从图中可以看出,偏振反射率基本不随卷云光学厚度的变化而变化,即偏振反射率对卷云光学厚度变化不敏感。综上所述,反射率可以用于卷云光学厚度,而偏振反射率不适合用于卷云光学厚度的反演。因此,可以建立光学厚度与反射率关系查找表,使用查找表法反演卷云光学厚度。

### 3.2 不同体散射模型对卷云光学厚度反演的影响

卷云单次散射相函数反映光经过卷云散射后,散射辐射的角度分布,可以详细地描述卷云的双向反射率。而对于光学厚度大的云层,其反射特性主要由光学厚度尺度  $\tau'_c$  决定<sup>[20]</sup>。相同条件(如云光学厚度相同)下, $\tau'_c$ 越大,反射率越大。 $\tau'_c$ 表达式为

$$\tau'_c = (1 - \omega g)\tau_c, \quad (15)$$

式中: $\tau_c$ 为云光学厚度; $g$ 为不对称因子。由于卷云在 865 nm 通道没有吸收,因此单次散射反照率  $\omega = 1$ 。不对称因子定义为前向散射与后向散射之比<sup>[2]</sup>,用于粗略地描述散射辐射的角度分布,是决定卷云反射率函数的一个重要参数。由(15)式可知,不对称因子越大,光学厚度尺度越小。

图 2(a)为 3 种模型有效粒子半径均为  $10 \mu\text{m}$  时的散射相函数。从图 2(a)可以看出,3 种模型的前向散射明显大于后向散射,当散射角大于  $50^\circ$  时,3 种模型的散射相函数具有明显差异。散射角从  $50^\circ$  到  $180^\circ$ ,ASC 的散射相函数比 GHM 和 SC 的函数大;散射角从  $50^\circ$  到  $105^\circ$ ,SC 的散射相函数大于 GHM 的函数;散射角大于  $105^\circ$  时,GHM 的散射相函数大于 SC 的函数。图 2(b)为太阳天顶角  $20^\circ$ 、观测天顶角  $41^\circ$ 、相对方位角  $180^\circ$ 、卷云有效粒子半径取  $10 \mu\text{m}$  时,反射率随卷云光学厚度的变化。从图 2(b)可以看出,GHM 和 SC 模型反射率随光学厚度的变化曲线基本一致,相同的光学厚度值,ASC 模型的反射率要明显大于 GHM 模型和 SC 模型。当偏振反射率为 0.75 时,GHM、SC、ASC 对应的光学厚度值分别为 20.5,20.8,18.0。说明在相同条件下,使用 ASC 模型反演得到的光学厚度明显小于 GHM 模型和 SC 模型,ASC 与 GHM 和 ASC 与 SC 的相对误差都大于 10%。

### 3.3 有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响

有效粒子半径是卷云一个重要的物理特性参

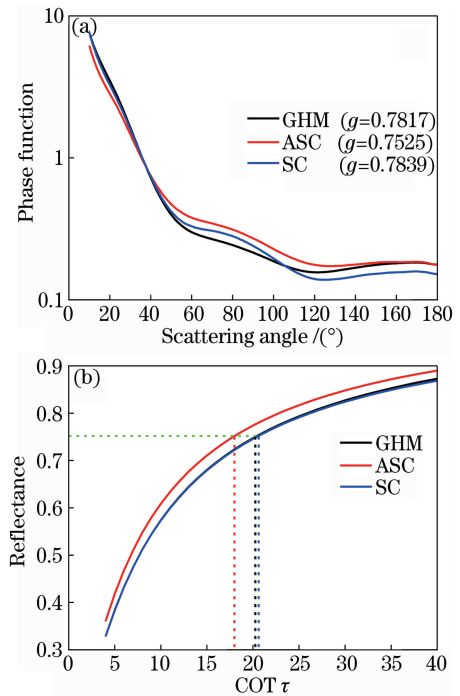


图 2 (a)不同模型的散射相函数;(b)不同模型反射率对光学厚度的变化

Fig. 2 (a) Phase function of different scattering models; (b) values of reflectance as a function of COT for different scattering models

数,不同有效粒子半径的卷云具有不同散射特性。由于 POLDER 缺少冰晶吸收谱段,如 MODIS 的  $2.11 \mu\text{m}$  通道,因此基于 POLDER 的观测数据无法反演卷云有效粒子半径。本节讨论 GHM、ASC、SC 3 种模型不同有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响。

图 3(a)、(b)、(c)分别为 GHM、ASC、SC 模型不同有效粒子半径对应的散射相函数。可以看出,当散射角大于  $80^\circ$  时,GHM、SC 两种模型的散射相函数随有效粒子半径的增大明显增大,而 ASC 模型的散射相函数随有效粒子半径的变化不明显,基本保持不变。图 3(d)为 3 种模型不对称因子随有效粒子半径的变化情况。可以看出, GHM、SC 模型的不对称因子随有效粒子半径的增大而增大。有效粒子半径从  $5 \mu\text{m}$  到  $60 \mu\text{m}$ ,GHM 的不对称因子从 0.7740 增到 0.8161,SC 的不对称因子从 0.7752 增到 0.8095。ASC 模型不对称因子随有效粒子半径的变化很小,变化范围从 0.7500 到 0.7560,小于 GHM 模型和 SC 模型。

使用 RT3 计算 GHM、ASC、SC 3 种模型,有效粒子半径为 5,10,20  $\mu\text{m}$ ,太阳天顶角  $20^\circ$ 、观测天顶角  $41^\circ$ 、相对方位角  $180^\circ$ ,光学厚度从 1 到 40 的反射

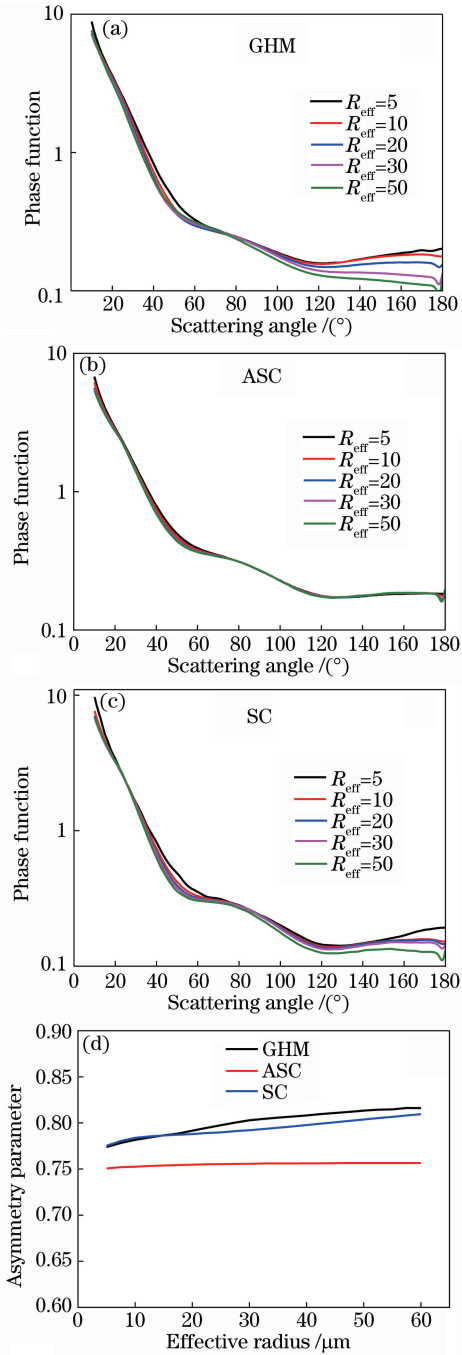


图 3 (a) GHM, (b) ASC, (c) SC 模型不同有效粒子半径的散射相函数; (d) 不对称因子与有效粒子半径的关系

Fig. 3 Phase functions for different effective radii in models of (a) GHM, (b) ASC, (c) SC; (d) asymmetry parameter as a function of effective radius

率,如图 4 所示。

由图 4(a)可知,在相同条件下使用 GHM 模型反演卷云光学厚度时,模型有效粒子半径越大反演得到的光学厚度就越大。当反射率为 0.7 时,有效粒子半径为 5, 10, 20  $\mu\text{m}$  对应的的光学厚度值分别为 15.8, 16.5, 17.3, 最大相对误差约为 9.5%。结合

图 3(d)可知,不对称因子越大反演得到的光学厚度越大,与(15)式相符。由于 GHM 模型的不对称因子随有效粒子半径的增大明显增大,因此在卷云光学厚度反演中采用的有效粒子半径不同,反演结果会有较大差异。

由图 4(b)可知,在相同条件下使用 ASC 模型反演卷云光学厚度时,光学厚度反演结果基本不随有效粒子半径的变化而变化。在反射率为 0.7 时,有效粒子半径从 5  $\mu\text{m}$  增到 20  $\mu\text{m}$ ,光学厚度从 13.5 变为 14.3,相对误差约为 6%。ASC 的不对称因子基本不随有效粒子半径的变化而变化,使用 ASC 模型进行卷云光学厚度反演,不同有效粒子半径对应反演结果的相对误差基本在 6%左右。

由图 4(c)可知,在相同条件下使用 SC 模型反演卷云光学厚度时,有效粒子半径越大反演得到的

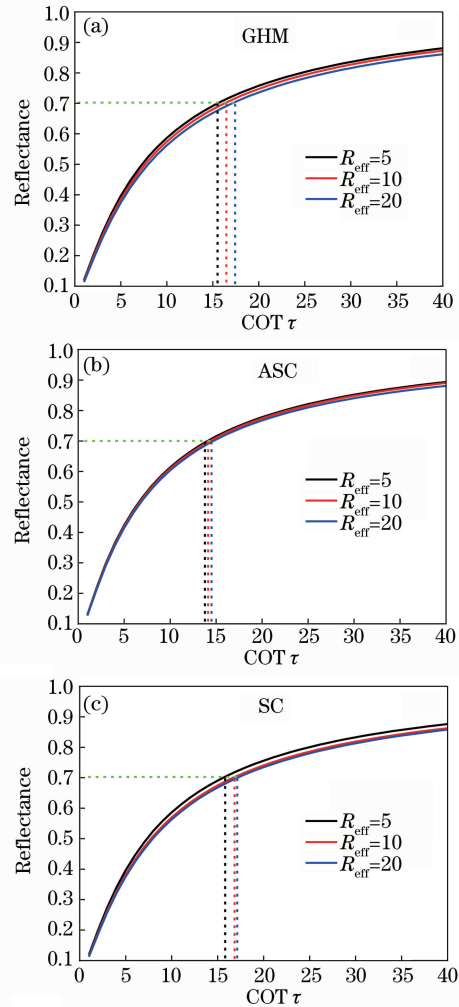


图 4 不同有效粒子半径反射率随光学厚度的变化。

(a) GHM; (b) ASC; (c) SC

Fig. 4 Values of reflectance as a function of COT for different effective radii. (a) GHM; (b) ASC; (c) SC

光学厚度越大。在反射率为 0.7 时,有效粒子为 5, 10, 20  $\mu\text{m}$ , 对应的光学厚度值分别为 16, 16.8, 17, 可以看到有效粒子半径为 10  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  时, 光学厚度变化不大。这是由于这两个有效粒子半径对应的不对称因子基本相同, 分别为 0.7854 和 0.788。当 SC 模型有效粒子半径 5  $\mu\text{m}$  增大到 60  $\mu\text{m}$ , 对应的不对称因子从 0.7854 增到 0.8095, 这个增量会引起光学厚度的反演结果大幅增加。

综合上述分析, GHM、SC 模型有效粒子半径的变化对卷云光学厚度的反演有较大影响, 采用大的有效粒子半径反演得到的光学厚度大于采用小的有效粒子半径反演得到的结果。ASC 模型的有效粒子半径变化对光学厚度反演结果的影响较小, 不同有效粒子半径反演得到的光学厚度相对误差基本在 6% 左右。

#### 4 基于 POLDER 数据的反演实例及结果分析

本节将采用 RT3 模拟计算 GHM、ASC、SC 3 种模型, 采用有效粒子半径为 10  $\mu\text{m}$  的卷云光学厚度查找表。选取 2007 年 8 月 1 日海洋上空北纬 1° 至 17.5°、东经 148.8° 至 158.4° 区域的 POLDER 数据进行卷云光学厚度反演, 反演流程如图 5 所示。

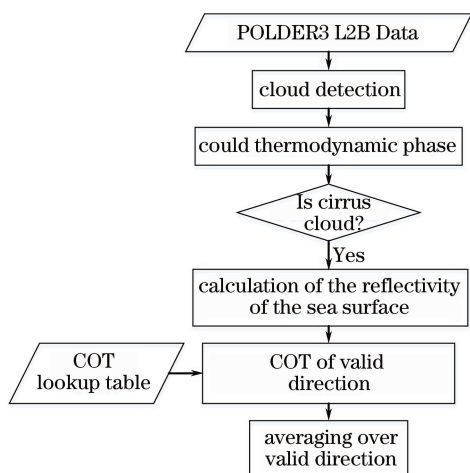


图 5 基于 POLDER 数据的海洋上空卷云光学厚度反演流程图

Fig. 5 Flow chart of COT retrieval over ocean by PLODER3 data

POLDER L2B 产品的空间分辨率  $3 \times 3$  像元空间分辨率(约  $18 \text{ km} \times 18 \text{ km}$ ), 包含观测几何数据、反射率数据、云产品、风速、风向等气象数据以及经纬度数据等。其中反射率数据是经过大气吸收校正后的数据, 海洋上空提供的是 865 nm 通道的反射

率, 陆地上空为 670 nm 通道的反射率。本文使用 865 nm 通道的反射率数据, 采用图 5 的反演流程, 反演海洋上空卷云光学厚度, 反演结果如图 6 所示。

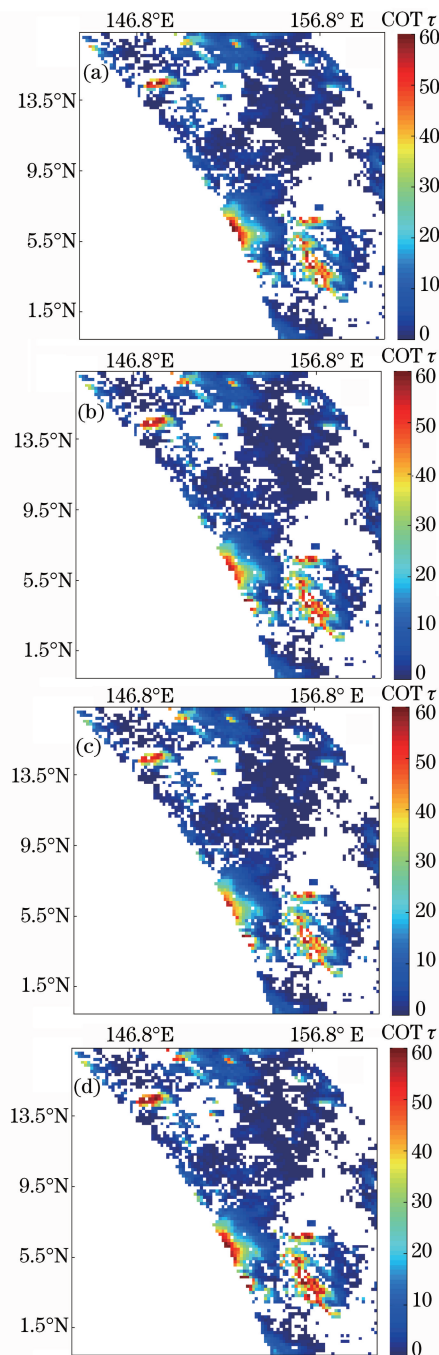


图 6 卷云光学厚度反演结果。(a) POLDER; (b) GHM; (c) ASC; (d) SC

Fig. 6 Inverse results of COT.

(a) POLDER; (b) GHM; (c) ASC; (d) SC

图 6(a) 为 POLDER 官方公布的卷云光学厚度产品, 反演采用的散射模型为 IHM; 图 6(b)~(d) 分别为采用 GHM、ASC、SC 3 种体散射模型, 使用查找表法反演得到的卷云光学厚度。表 1 为得到

图 6 反演结果所采用的体散射模型参数。从图 6 中可以看出,GHM、ASC、SC 3 种模型与 POLDER 产品的卷云光学厚度具有很好的 consistency,光学厚度的

大、小值分布基本一致。为了充分了解 4 个反演结果之间的差异,对 4 个结果进行两两比较分析,如图 7 所示。

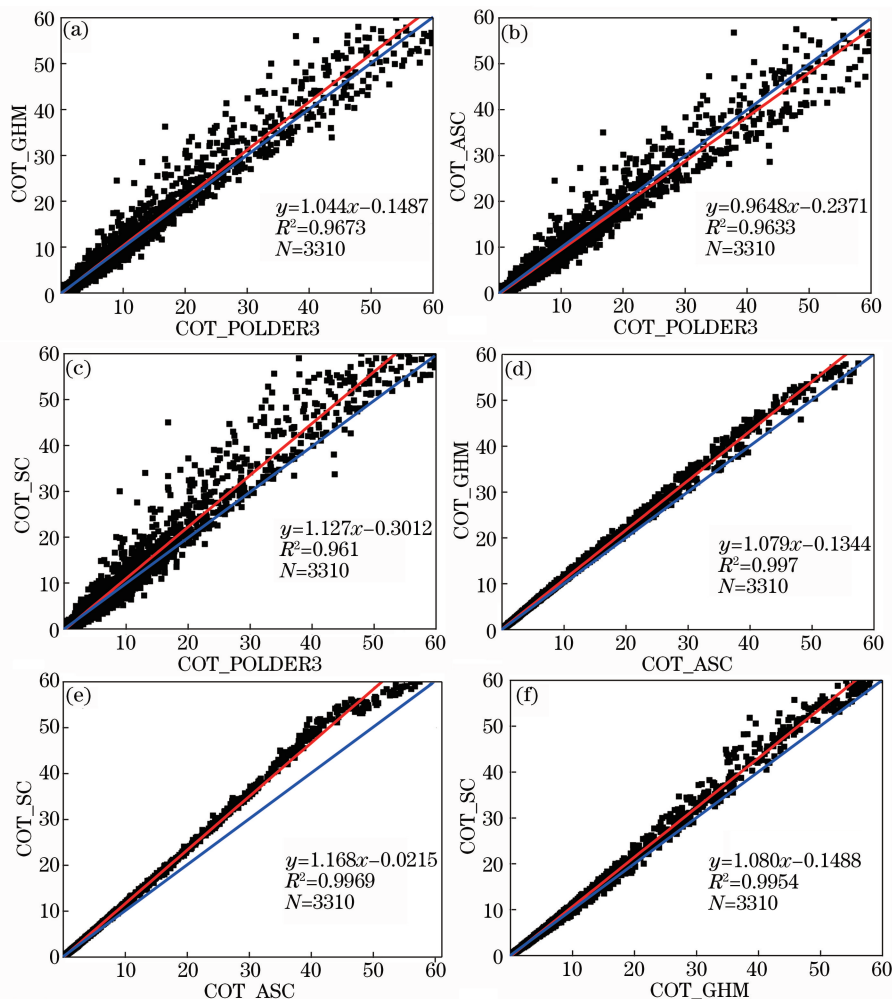


图 7 不同模型卷云光学厚度反演结果对比。(a) POLDER 与 GHM; (b) POLDER 与 ASC; (c) POLDER 与 SC; (d) ASC 与 GHM; (e) ASC 与 SC; (f) SC 与 GHM

Fig. 7 Comparison of the COT based on different cirrus bulk scattering models. (a) POLDER and GHM; (b) POLDER and ASC; (c) POLDER and SC; (d) ASC and GHM; (e) ASC and SC; (f) SC and GHM

表 1 GHM、ASC、SC 模型及 POLDER 产品参数  
Table 1 Parameters of GHM, ASC, SC models and POLDER product

Model	Effective radius / $\mu\text{m}$	Asymmetry parameter
IHM	10	0.7665
GHM	10	0.7817
ASC	10	0.7525
SC	10	0.7839

图 7(a)~(c)分别为使用 GHM、ASC、SC 3 种模型反演得到的卷云光学厚度与 POLDER 反演得到的卷云光学厚度的对比图。从图中可以看出 GHM、ASC、SC 3 种模型的反演结果与 POLDER 的反演结果都具有很好的相关性,相关系数  $R^2$  分

别为 0.9673,0.9633,0.9610,拟合直线的斜率分别为 1.044,0.9648,1.1270。说明使用 GHM 和 SC 模型反演得到卷云光学厚度总体上比 POLDER 的反演结果要大,而使用 ASC 模型反演得到卷云光学厚度总体比 POLDER 的反演结果小。随着光学厚度的增大,使用 GHM、ASC、SC 3 种模型反演得到的光学厚度与 POLDER 的光学厚度差值越大,其中使用 SC 模型反演得到的结果与 POLDER 结果相差最大。GHM、ASC、SC 3 种模型卷云光学厚度反演结果与 IHM 模型产品存在差异的主要因素有: 1)反演过程中细节处理可能存在差异; 2)采用的散射模型不同。相比 GHM 和 SC 模型,ASC 模型卷云光学厚度反演结果更接近于 POLDER 产品。



图 7(d)~(f) 分别为 GHM 与 ASC, SC 与 ASC, GHM 与 SC 的反演结果之间的对比图。从图 7(d)~(f) 中可知, GHM、ASC、SCS 3 个模型反演结果相互之间相关度很大, 相关系数  $R^2$  都超过 0.995。GHM 模型反演得到的光学厚度都大于 ASC 模型反演得到的光学厚度, SC 反演得到的光学厚度也都大于 ASC 反演得到的光学厚度, 与 3.2 节的理论分析一致。由于 GHM 模型和 SC 模型的散射相函数在散射角为  $105^\circ$  左右时存在交叉的情况, 因此即使 SC 模型的不对称因子大于 GHM 模型, 但仍然会存在某些点 GHM 模型光学厚度反演结果大于 SC 模型的情况。3 种模型反演结果之间的相对误差范围如表 2 所示。此 3 种模型反演结果存在差异的主要原因是这 3 种模型的散射特性不同。

表 2 GHM、ASC 和 SC 3 种模型反演结果之间的  
相对误差范围

Table 2 Relative error range of retrieval results between  
GHM, ASC and SC

Model	Relative error range
GHM and ASC	7% to 21%
GHM and SC	3% to 16%
SC and ASC	12% to 30%

由上述可知, 实际数据反演得到的结果与理论分析的一致, 即模型之间的散射相函数不存在交叉时, 模型的不对称因子越大反演得到的光学厚度越大。因此, 在建立查找表时, 如果将 GHM、ASC、SC 3 种模型的有效粒子半径增大, 则相同模型下使用上述数据反演得到的卷云光学厚度 GHM、SC 模型的结果会有较大增加, 而 ASC 模型结果增幅较小。

综上所述, 选择不同模型反演卷云光学厚度得到的结果会有较大的差异, 相比于 GHM 和 SC 模型, ASC 模型卷云光学厚度反演结果更接近于 POLDER 产品。GHM 和 SC 模型不同的有效粒子半径反演得到的结果也会有很大差异, 而 ASC 模型不同有效粒子半径反演得到的结果相差不大。在不具备有效粒子半径反演条件下, 为减小有效粒子半径对卷云光学厚度反演结果的影响, 建议采用 ASC 模型进行反演。

## 5 结 论

本文分析 GHM、ASC、SC 3 种散射模型及不同有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响。通过使用 RT3 模拟分析不同模型、不同有效粒子半径对光

学厚度反演结果的影响, 得出: 1) 散射角在  $50^\circ \sim 105^\circ$  范围内, 光学厚度反演结果从大到小的模型排序为 GHM 模型、SC 模型、ASC 模型, 散射角从  $105^\circ \sim 180^\circ$  时, 光学厚度反演结果从大到小的模型排序为 SC 模型、GHM 模型、ASC 模型; 2) GHM 和 SC 模型不同的有效粒子半径反演得到的结果也会有很大差异, 而 ASC 模型不同有效粒子半径反演得到的结果相差不大。基于 GHM、ASC、SC 3 种模型建立查找表, 使用 POLDER 数据进行卷云光学厚度反演实验。实验结果表明: GHM、ASC、SC 3 种模型的反演结果与 POLDER 官方公布的产品具有较好的相关性, 总体上光学厚度反演结果从大到小的模型排序为 SC 模型、GHM 模型、POLDER 产品、ASC 模型, 相比 GHM 和 SC 模型, ASC 模型卷云光学厚度反演结果更接近于 POLDER 产品。

综合上述, 卷云光学厚度的实际反演结果与理论分析基本一致。说明在卷云光学厚度反演时, 需要充分考虑不同模型对反演结果造成的影响, 而对于类似于 POLDER 不具备卷云有效粒子半径反演的载荷, 建议使用反演结果随有效粒子半径变化不大的 ASC 模型进行卷云光学厚度反演。通过本文研究工作, 为我国 GF-5 号卫星的卷云光学厚度反演的散射模型选择及反演结果的评价提供有价值的参考。

## 参 考 文 献

- [1] Liou K N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective[J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(6): 1167-1199.
- [2] Zhang Z. Satellite-based remote sensing of cirrus clouds: hyperspectral radiative transfer modeling, analysis of uncertainties in *in-situ* cloud extinction measurements and inter comparison of cirrus retrievals from A-train instruments [D]. Texas: Texas A & M University, 2009: 78-135.
- [3] Zhou C, Dessler A E, Zelinka M D, *et al.* Cirrus feedback on interannual climate fluctuations[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(24): 9166-9173.
- [4] Houghton J T, Ding Y H, Griggs J, *et al.* Climate change 2001: the scientific basis [M]. New York: Cambridge University Press, 2001: 349-416.
- [5] Salomonson V V, Barnes W L, Maymon P W, *et al.* MODIS: advanced facility instrument for studies of the Earth as a system [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1989, 27(2): 145-153.
- [6] Waquet F, Cornet C, Deuzé J L, *et al.* Retrieval of

- aerosol microphysical and optical properties above liquid clouds from POLDER/PARASOL polarization measurements[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(4): 991-1016.
- [7] Yang W F, Hong J, Qiao Y L. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822005.  
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822005.
- [8] Baum B A, 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.
- [9] C-Labonnote L, Brogniez G, Buriez J C, *et al.* Polarized light scattering by inhomogeneous hexagonal monocrystals: validation with ADEOS-POLDER measurements[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001, 106(D11): 12139-12153.
- [10] Yang P, Liou K N, Wyser K, *et al.* Parameterization of the scattering and absorption properties of individual ice crystals[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2000, 105(D4): 4699-4718.
- [11] 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]. Journals of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(1): 330-347.
- [12] Baum B A, Yang P, Heymsfield A J, *et al.* Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100  $\mu\text{m}$ [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 146: 123-139.
- [13] Mishchenko M I, Travis L D, Mackowski D W. T-matrix computations of light scattering by nonspherical particles: a review [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1996, 55(5): 535-575.
- [14] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302-307.
- [15] Yurkin M A, Maltsev V P, Hoekstra A G. The discrete dipole approximation for simulation of light scattering by particles much larger than the wavelength[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 106(1/2/3): 546-557.
- [16] Bi L, Yang P, Kattawar G W, *et al.* Simulation of the color ratio associated with the backscattering of radiation by ice particles at the wavelengths of 0.532 and 1.064  $\mu\text{m}$ [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(22): 2191-2196.
- [17] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation [M]. California: Academic Press, 2002: 317-324.
- [18] Cheng T H, Gu X F, Chen L F, *et al.* Multi-angular polarized characteristics of cirrus clouds [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(8): 5323-5332.  
程天海, 顾行发, 陈良富, 等. 卷云多角度偏振特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(8): 5323-5332.
- [19] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1991, 46(5): 413-423.
- [20] King M D. Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1987, 44(13): 1734-1751.