

# 大天顶角入射下冰云大气偏振辐射传输特性

郭镭力\*, 王明军

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

**摘要** 利用矢量辐射传输的蒙特卡罗法,研究了球形和平面平行大气模式下冰云大气反射率的差异,并计算了三种波长(0.65, 0.85, 1.55  $\mu\text{m}$ )在大天顶角(85°)入射时,冰云大气的偏振辐射传输特性随不同冰晶粒子模型、光学厚度、有效半径、冰水含量、相对方位角和地表反照率的变化关系。结果表明:冰云大气反射率在两种大气模式下的误差随天顶角的增加而增大,误差可达 55%。在球形大气模式下,对于不同波长、冰晶粒子模型和相对方位角,冰云大气反射率的差异较大,且冰云大气偏振度的变化更加复杂。冰云大气反射率和偏振度对冰云光学特性和地表反照率的变化也较敏感,随光学厚度、冰水质量浓度和地表反照率的增加,冰云大气反射率增加,偏振度减小,而随着有效半径的增加,冰云大气反射率减小,偏振度增加。

**关键词** 大气光学; 矢量辐射传输; 蒙特卡罗; 冰晶粒子; 冰云光学特性

中图分类号 P401; P407.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1101002

## Polarized Radiative Transfer Characteristics of Ice Cloud Atmospheres at Large Zenith Angles

Guo Leili\*, Wang Mingjun

School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

**Abstract** Herein, the Monte Carlo method of vector radiative transfer is used for comparing the difference between the reflectances of spherical and plane-parallel ice cloud atmospheres. The variations of polarized radiative transfer characteristics of the ice cloud atmospheres with the optical thickness, effective radius, ice water content, relative azimuth angle, surface albedo, and ice crystal model are calculated. These characteristics are obtained at three wavelengths (0.65, 0.85, and 1.55  $\mu\text{m}$ ) and a large zenith angle (85°). The results denote that the difference between the ice cloud atmospheric reflectances of two atmospheric modes increases with the increasing zenith angle. This difference can reach a maximum of 55%. For a range of wavelengths, ice crystal models, and relative azimuth angles, the atmospheric reflectance of ice clouds is observed to considerably vary in the spherical atmosphere mode, and the variation in the atmospheric polarization of ice clouds is complex. Further, the atmospheric reflectance and ice cloud polarization are sensitive to the changes in the ice cloud optical properties and surface albedos. The ice cloud atmospheric reflectance increases with the increasing optical thickness, mass concentration of ice water, and surface albedo, whereas the polarization degree decreases. Furthermore, with increasing effective radius, the ice cloud atmospheric reflectance decreases, whereas the polarization degree increases.

**Key words** atmospheric optics; vector radiative transfer; Monte Carlo; ice crystal particles; ice cloud optical properties

**OCIS codes** 010.1290; 290.5855; 290.1090

## 1 引 言

分布在大气高层的冰云(ice cloud)由复杂形状的冰晶粒子(如子弹玫瑰状、柱状、平板状和聚合物状等)组成,约覆盖地球表面的 20%~30%<sup>[1-2]</sup>。冰云的辐射传输特性与冰云的光学和微物理特性(如

冰云的光学厚度、粒子有效半径、冰水含量、冰晶粒子的形状和大小)有关。当光波在冰云大气中传输时,由于冰晶粒子的散射和吸收作用,光波辐射的偏振状态会发生改变。精确模拟冰云大气辐射传输特性是平衡地球辐射收支和正确反演大气成分的基础。因此,研究冰云大气的偏振辐射传输特性对大

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-07-01; 录用日期: 2019-07-25

基金项目: 国家自然科学基金(61771385)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、国防重点实验室基金(6142404180301)、陕西省自然科学基金(2018JQ6094)

\* E-mail: guoglx0913@163.com

气探测、激光通信和遥感等具有重要意义。

近年来,众学者对冰云偏振辐射传输特性进行了研究,顾行发等<sup>[3]</sup>、程天海等<sup>[4]</sup>采用累加法,在 $0.865\ \mu\text{m}$ 波长处模拟了冰云和水云的总反射率和偏振反射率。李树等<sup>[5-6]</sup>计算和分析了偏振反射率对卷云散射模型、有效粒子半径、光学厚度和云顶压强的敏感性。Kattawar等<sup>[7]</sup>基于蒙特卡罗方法计算了光学厚度为 $10\sim 100$ 的云层的反射和偏振特性。Liou等<sup>[8]</sup>建立了卷云的偏振辐射传输的理论框架。Stamnes等<sup>[9]</sup>分别利用累加法和离散坐标法计算了卷云的偏振反射和透射。但以上研究都是基于大气是平面平行的假设。有研究表明,当入射天顶角大于 $70^\circ$ 时,基于平面平行大气的假设不再成立,需考虑球形大气的影响<sup>[10-11]</sup>。Dahlback等<sup>[12]</sup>提出了离散纵坐标法(DISORT)的球面模式(SPDISORT),实现了球形大气条件下辐射传输方程的近似求解;Rozanov等<sup>[13]</sup>以伪球面模式为基础,发展了基于picard迭代逼近的组合微分积分(CDIPI)技术,实现了球形大气辐射传输方程的逼近求解;Buras等<sup>[14]</sup>在SPDISORT的基础上开发了C语言版本DISORT(CDISORT),其适用于模拟平面平行大气、伪球面大气下的冰云大气辐射传输特性。以上三种方法均为伪球面近似的标量求解方法,仅考虑了辐射强度分量信息,未考虑辐射的偏振特性。胡帅等<sup>[15]</sup>在球形大气条件下利用矩阵法实现了矢量辐射传输方程的求解,但未考虑云大气。Mayer<sup>[16]</sup>、Emde等<sup>[17-18]</sup>开发了基于后向蒙特卡罗法的矢量辐射传输模型,不仅建立了大气辐射传输的矢量模型,还提高了计算速度和精度,适用于模拟平面平行和球形冰云大气的辐射传输特性。

本文主要研究了球形大气模式下冰云大气的反射偏振辐射特性。利用后向蒙特卡罗方法比较了平面平行和球形大气模式下冰云大气反射率的差异。进一步数值计算和分析球形大气模式下冰云大气反射率和偏振特性随波长和冰晶粒子模型、光学厚度、有效半径、冰水含量(质量浓度,下同)、地表反照率等的变化关系。

## 2 球形冰云大气模式下的偏振辐射传输原理

### 2.1 冰云参数模型

冰云层的辐射传输特征由冰晶粒子的几何形状和单次散射特性决定。冰晶粒子的单次散射特性与冰晶粒子的大小、几何形状和粒子的分布谱有关。

根据Baum等<sup>[19]</sup>、Yang等<sup>[19-20]</sup>计算的单个冰晶粒子的散射特性数据,获得各种波长下6种冰晶粒子模型的散射特性,如六角形板状(plates)、实心/空心柱状(solid/hollow column)、实心/空心子弹玫瑰状(solid/hollow bullet rosettes)和板状聚合物(aggregate of 10 plates)。实际上粒子尺寸分布是不断变化的,但在辐射传输模拟中,通常采用伽马分布近似表征粒子尺度分布谱<sup>[21]</sup>,即

$$n(D) = ND^{1/b-3} \exp\left(-\frac{D}{Rb}\right), \quad (1)$$

式中: $D$ 为粒子尺度参数; $N$ 为单位体积内粒子总数;参数 $R$ 、 $b$ 分别为云层粒子的有效半径和有效方差,典型冰云的 $b$ 值为 $0\sim 0.5$ ,本文取值 $0.25$ 。

冰云有效粒子半径定义为

$$R = \frac{3 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} V(D)n(D)dD}{4 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} A(D)n(D)dD}, \quad (2)$$

式中: $V(D)$ 和 $A(D)$ 分别为冰晶粒子的体积和单位体积的投影面积; $D_{\max}$ 和 $D_{\min}$ 分别为冰晶粒子的最大和最小尺度。

冰云光学厚度用来描述冰云层的衰减特性,定义为

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{\langle Q_{\text{ext}} \rangle \cdot I_{\text{WC}} \cdot \Delta z}{\rho_{\text{ice}} \cdot R}, \quad (3)$$

式中: $\langle Q_{\text{ext}} \rangle$ 、 $I_{\text{WC}}$ 、 $\Delta z$ 和 $\rho_{\text{ice}}$ 分别为平均消光效率、冰水含量、云层几何厚度和冰水密度。

考虑冰云大气的偏振特性,需求解冰云模型的散射相矩阵。图1给出了波长 $\lambda$ 分别为 $0.65, 0.85, 1.55\ \mu\text{m}$ 时6种冰晶粒子模型的散射相函数 $P_{11}$ 和线性偏振度 $-P_{12}/P_{11}$ ,其中, $P_{12}$ 为散射相矩阵的第1行、第2列元素。由图1可知,由于板状(plate)、板状聚合物(aggregate of 10 plates)和实心柱状(solid column)冰晶粒子模型具有基本的六边形结构,散射相函数在 $22^\circ$ 和 $46^\circ$ 附近以及 $140^\circ\sim 160^\circ$ 呈现出极大值,这是由于射线通过 $60^\circ$ 棱镜角两次折射产生了 $22^\circ$ 晕,射线通过 $90^\circ$ 棱镜角两次折射产生了 $46^\circ$ 晕,粒子内部的一次反射和两次反射的叠加产生了 $140^\circ\sim 160^\circ$ 范围内的3个峰值。由于空心柱状(hollow column)冰晶粒子内部缺少散射物质,则未出现 $46^\circ$ 和 $140^\circ\sim 160^\circ$ 范围内的第3个峰值,而且后向散射区域更平坦。子弹玫瑰状(bullet rosettes)冰晶粒子的3个峰值分别出现在 $7^\circ, 22^\circ$ 和 $150^\circ$ 附近。不同冰晶粒子模型下,由于 $1.55\ \mu\text{m}$ 有较大的吸收作用, $1.55, 0.65, 0.85\ \mu\text{m}$ 的散射相函数

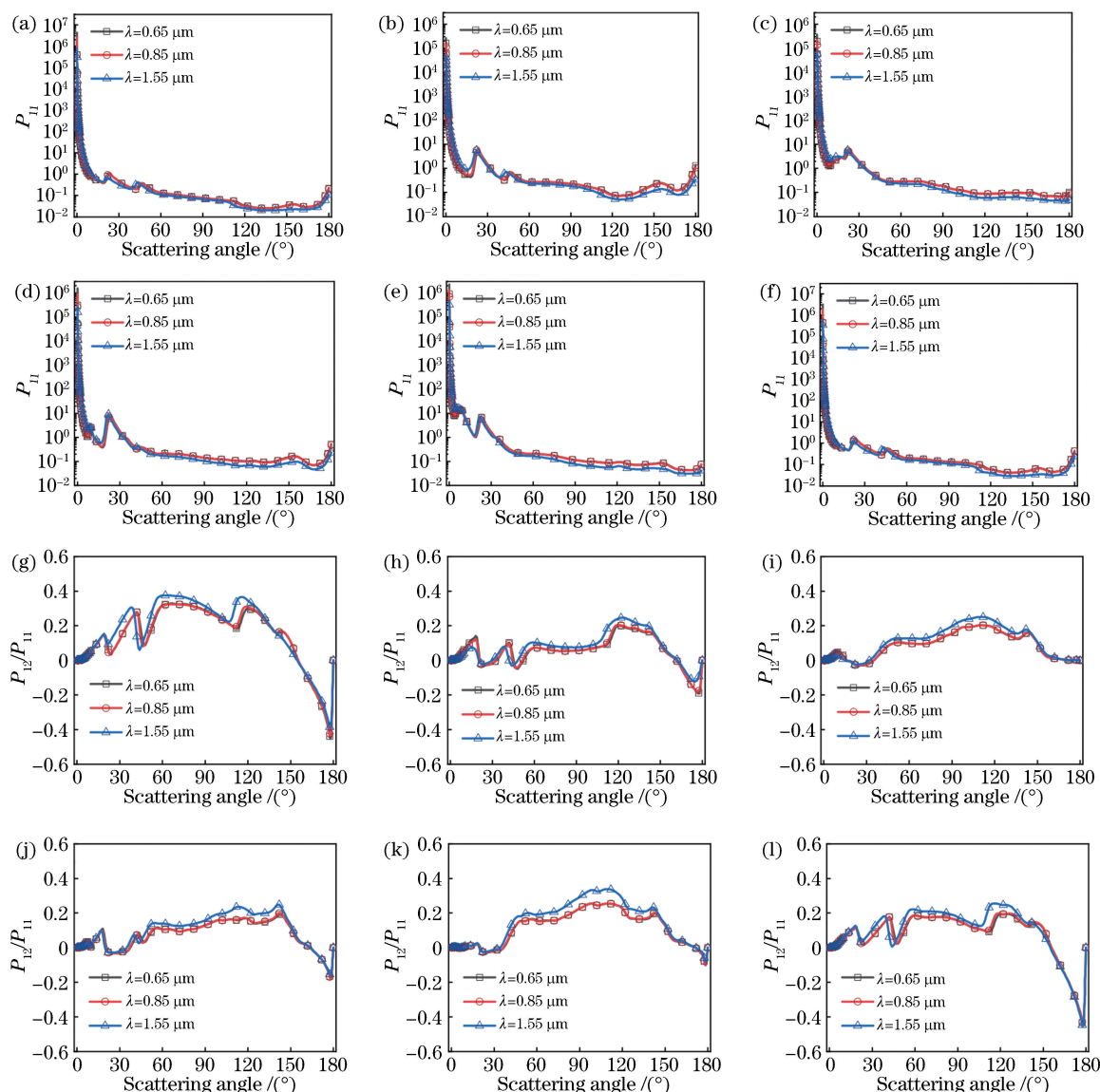


图 1 三种波长下六种冰晶粒子模型的散射相函数  $P_{11}$  和线偏振度  $-P_{12}/P_{11}$ 。(a)(g)板状冰晶粒子模型；(b)(h)实心柱状冰晶粒子模型；(c)(i)空心柱状冰晶粒子模型；(d)(j)实心子弹玫瑰状冰晶粒子模型；(e)(k)空心子弹玫瑰状冰晶粒子模型；(f)(l)板状聚合物状冰晶粒子模型

Fig. 1 Scattering phase function  $P_{11}$  and linear polarization degree  $-P_{12}/P_{11}$  of six ice crystal models at three wavelengths.  
 (a)(g) Plate ice crystal model; (b)(h) solid columnar ice crystal model; (c)(i) hollow columnar ice crystal model;  
 (d)(j) ice crystal model with solid bullet rosette type; (e)(k) ice crystal model with hollow bullet rosette type;  
 (f)(l) ice crystal model with plate polymer type

在后向散射方向  $90^\circ \sim 180^\circ$  有明显差异。在大部分散射角范围内,线性偏振度值均为正,在晕峰位置和后向  $150^\circ \sim 180^\circ$  附近出现负线偏振。板状、板状聚合物和实心柱状冰晶粒子的线性偏振度前两个极大峰值出现在  $22^\circ$  和  $46^\circ$  附近,其与散射相函数的  $22^\circ$  和  $46^\circ$  晕相对应。板状和板状聚合物冰晶粒子在  $60^\circ \sim 100^\circ$  和  $110^\circ \sim 150^\circ$  存在较宽的峰值区域,实心柱状在  $120^\circ \sim 150^\circ$  有较宽峰值,空心/实心子弹玫瑰状和空心柱状冰晶粒子在  $140^\circ$  附近有一个峰值,这

是粒子外部和内部散射叠加的结果。当散射角小于  $20^\circ$  时,空心柱状和空心子弹玫瑰状冰晶粒子的线性偏振度值接近 0,这是由于更多的衍射光线(零偏振)分散在该角度范围,而其他 4 种冰晶粒子模型的线性偏振度有较大正值,这是由于更多的外部反射光线(正偏振)分散在该角度范围。6 种冰晶粒子模型的线性偏振度均在  $150^\circ \sim 180^\circ$  后向散射区域出现负值,这是因为除了外部反射光线(正偏振)和衍射光线(零偏振),还有负偏振的透射光线分散在该角

度范围内<sup>[9, 22-23]</sup>。

### 2.2 基于后向蒙特卡罗法的矢量传输模型

蒙特卡罗法是模拟光子在介质中随机传播的方法,即通过模拟大量光子经过介质的统计规律,以及光子在传播路径上被散射和被吸收的过程。蒙特卡罗方法可以在有云大气中精确追踪光子,从而获得精确的散射特性,为解决云等结构复杂介质中的辐射传输问题提供便利条件。

在球形大气中采用后向蒙特卡罗方法模拟光子的传输过程,如图 2 所示,在球形大气中通过反向追踪光子来模拟光子的传输路径<sup>[24]</sup>。追踪光子到大气层顶后,需统计到达探测器方向的光子,由于很少有光子出射大气层的方向与探测器方向完全一致的情况,因此用在较小立体角内统计的光子数来代表大气层顶向上(TOA)的辐射能量。其中光子沿直线路径被散射的概率由 Lambert-Beer 定律给出,即

$$p = \exp \left[ - \int_0^s k_{\text{ext}}(s') ds' \right], \quad (4)$$

式中: $k_{\text{ext}}(s')$ 为沿光子路径  $s$  的消光系数。

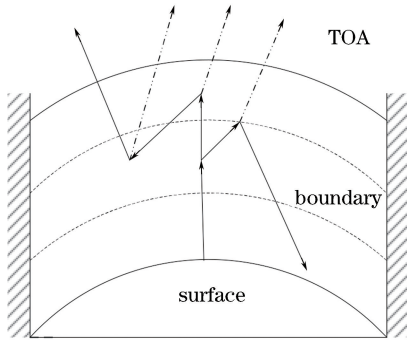


图 2 具有吸收边界条件的球形大气中后向蒙特卡罗法模拟光子传输示意图

Fig. 2 Back Monte Carlo simulation of photon transmission in aspherical atmosphere with absorbing boundary conditions

为了在球形大气下追踪光子,需不断计算光子到下一个球面的路径。如图 3 所示,在球形大气下光子路径可表示为<sup>[24]</sup>

$$(\mathbf{r}_p + s \Delta \mathbf{r})^2 = (z_1 + r_e)^2, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{r}_p$ 为从地球中心指向光子位置的矢量; $\Delta \mathbf{r}$ 为光子的归一化方向矢量; $z_1$ 为从边界到光子路径相交的下一层的高度坐标; $r_e$ 为地球半径。其中光子向上或向下移动路径的解为

$$s_{\text{down/up}} = \frac{\mathbf{r}_p^2 - (z_1 + r_e)^2}{-\mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{r} \pm \sqrt{(\mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{r})^2 - \mathbf{r}_p^2 + (z_1 + r_e)^2}}. \quad (6)$$

由于考虑球形大气时计算区域足够大,大气边

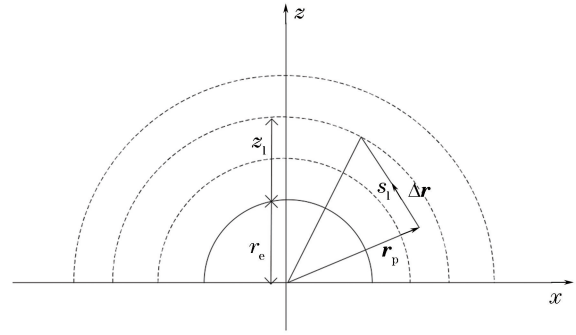


图 3 球形大气下光子路径

Fig. 3 Photon path under spherical atmosphere

界上被吸收的光子可忽略不计。因此,在球形大气下选择吸收边界条件,即认为撞击边界的光子被完全吸收。

光在路径  $s$  中传输时会发生散射并被吸收,使用随机数  $\zeta \in [0, 1]$  表征散射和吸收的发生。光子的散射和吸收均由单次散射反照率  $\omega_0 = k_{\text{scat}}/k_{\text{ext}}$  决定,其中, $k_{\text{scat}}$ 和  $k_{\text{ext}}$ 分别为散射系数和消光系数。 $\zeta \leq \omega_0$  时光子被散射, $\zeta > \omega_0$  时光子被吸收。被吸收的光子无需再追踪,被散射的光子可利用散射相函数确定新方向。最后统计大气顶层的光子数及其方向,即可算出表征大气偏振辐射特性的 Stokes 矢量参数。

## 3 数值结果与分析

### 3.1 球形和平面平行冰云大气反射率的比较

设大气廓线为美国标准大气,云层高度  $h$  为 10 km,几何厚度  $\Delta z$  为 1 km,相对方位角为  $180^\circ$ 。当观测角为  $60^\circ$ 、冰云光学厚度  $\tau$  为 2、有效半径  $R$  为  $40 \mu\text{m}$  时,在球形和平面平行冰云大气(SP-spherical, PP-plane parallel)模式下,分别计算较大天顶角( $70^\circ \sim 90^\circ$ )入射时 2 种大气模式下冰云大气的反射率和误差。

图 4 给出了 2 种大气模式下冰云大气反射率和误差随天顶角的变化关系。由图可知,在较大天顶角时,平面平行模式下冰云大气反射率明显大于球形大气模式。天顶角为  $70^\circ$  时误差接近 0,随着天顶角的增大,2 种大气模式下的误差明显增大,3 种波长对应的最大误差值分别为 40%、55% 和 20%。因此,冰云大气条件下,大天顶角的遥感探测和激光通信有必要考虑大气边界球形几何特性的影响。

### 3.2 球形大气模式下冰云大气反射偏振辐射传输特性模拟

在球形大气模式下,首先模拟计算了 0.65, 0.85, 1.55  $\mu\text{m}$  波长以大天顶角入射冰云大气时不

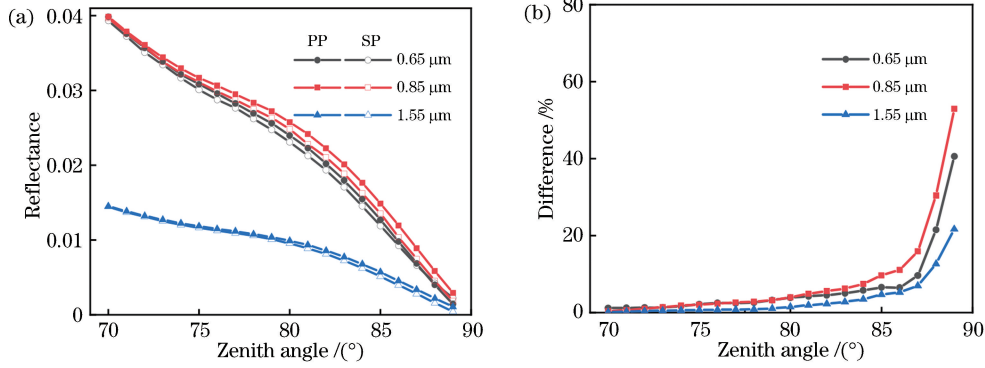


图 4 两种大气模式下冰云大气反射率和误差随天顶角的变化关系。(a)反射率；(b)两种大气模式误差

Fig. 4 Relationship between atmospheric reflectance and difference between ice cloud and zenith angle under two atmospheric modes. (a) Reflectance; (b) differences of two atmospheric modes

同冰晶粒子模型对冰云大气反射率和偏振度的影响。1.55 μm 波长以 85°天顶角入射冰云大气时,进一步分析了冰云光学性质(光学厚度、有效半径和冰水含量),相对方位角和地表反照率的变化对冰云大气反射率和偏振度的影响。仿真计算参数如下:取入射天顶角为 85°,取观测角为 0°~80°,并选择冰云光学厚度在 0.5~5 范围内变化、云底高度为 10~12 km、有效半径为 20~60 μm,由 Wang 等<sup>[25]</sup>从 MODIS 数据的反演可知,这些数值是地球上冰云的典型值。

本研究用反射率  $R(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0)$  (reflectance) 和偏振度  $P$  (degree of polarization) 表征球形大气下冰云大气偏振辐射传输特性,表达式为

$$R(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0) = \frac{\pi I_r(0, \mu, \phi)}{\mu_0 F_0}, \quad (7)$$

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}, \quad (8)$$

式中:  $\mu_0$  和  $\mu$  分别为太阳天顶角和观测天顶角的余弦;  $\phi_0$  和  $\phi$  分别为太阳方位角和观测方位角;  $I_r(0, \mu, \phi)$  为观测方向  $(\mu, \phi)$  上大气层顶处的上行辐射强度;  $F_0$  为大气层顶的入射光强;  $I$  为辐射强度,  $Q$  为垂直和水平方向的线性偏振强度;  $U$  为 ±45° 方向的偏振强度;  $V$  为圆偏振强度。

### 3.2.1 冰云大气反射偏振辐射传输特性随波长和冰晶粒子模型的变化情况

根据不同冰晶粒子模型的散射特性差异(图 1),计算了板状、实心/空心柱状、实心/空心子弹玫瑰状和板状聚合物 6 种不同冰晶粒子模型下 0.65, 0.85, 1.55 μm 波长入射时的冰云大气反射率和偏振度(图 5)。

由图 5 (a)可知,随观测角的变化,板状聚合物冰晶粒子模型的冰云大气反射率明显大于板状冰晶

模型,这是由于板状冰晶的聚合导致冰晶粒子表面漫散射增加,冰晶粒子内部的多次散射减少。由图 5(c)和(e)可知,空心冰晶模型的冰云大气反射率明显小于实心冰晶模型,这是由于空心冰晶粒子内部的散射物质较少,粒子内部的多次散射较少。不同冰云大气反射率曲线的走势均可采用散射角  $\Theta$  与辐射方向  $(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0)$  的关系式<sup>[1,26]</sup>  $\cos \Theta = \sqrt{1-\mu^2} \cdot \sqrt{1-\mu_0^2} \cdot \cos(\phi - \phi_0) - \mu\mu_0$  进行描述,针对图 5(c)所示的冰云大气反射曲线的解释如下,观测角在 0°~80°的变化对应散射角从 95°变化到 175°,针对这种情况,95°~154°和 154°~175°散射角范围对应冰云相位函数值均先减小,然后逐渐增大,在后向散射处有极大值,且 175°对应的值相对较大,冰云大气反射率在 0°~60°和 60°~80°观测角范围内均先减小后增大,80°观测角值最大,前后对应。由于板状、板状聚合物和空心状冰晶粒子模型的散射相位函数在 154°散射角处的变化趋势相对平坦,反射率曲线在 60°观测角附近比较光滑。由图 5(a)、(c)、(e)可知,不同波长、冰晶粒子模型的冰云大气反射率差异较大。

由图 5(b)、(d)、(f)可知,不同冰晶粒子模型和不同波长下的冰云大气的偏振度随观测角的变化更加复杂。观测角小于 60°时,3 种波长下,板状和板状聚合物、实心柱状和实心子弹玫瑰状、空心柱状和空心子弹玫瑰状冰晶粒子模型的冰云大气偏振度值的变化趋势一致,且 0.85 μm 波长冰云大气偏振度小于 0.65 μm 和 1.55 μm 波长;在 0°~60°观测角,板状聚合物冰晶粒子模型的冰云大气偏振度小于板状冰晶粒子模型,但实心柱和实心子弹玫瑰状、空心柱和空心子弹玫瑰状冰晶粒子模型的冰云大气偏振度的幅值变化无明显特点。观测角为 60°~65°时,

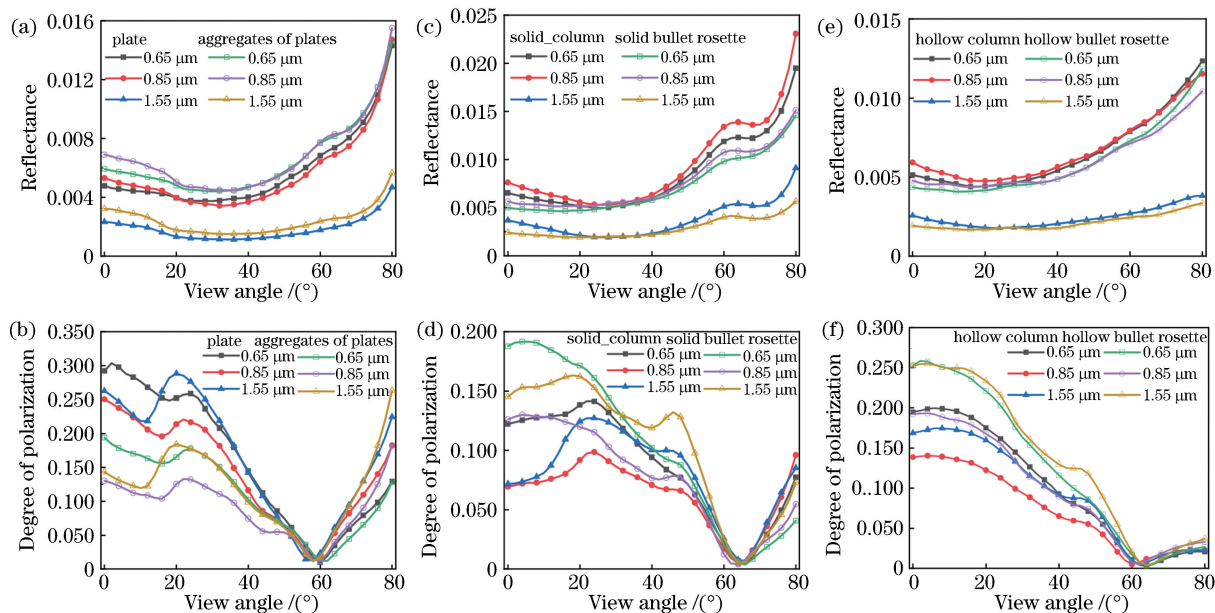


图 5 3 种波长时不同冰晶粒子模型下的冰云大气反射率和偏振度。(a)(b)板状和板状聚合物冰晶粒子模型的冰云大气反射率和偏振度；(c)(d)实心 and 空心柱状冰晶粒子模型的冰云大气反射率和偏振度；(e)(f)实心 and 空心子弹玫瑰状冰晶粒子模型的冰云大气反射率和偏振度

Fig. 5 Atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds at three wavelengths for different ice crystal models. (a)(b) Atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds for plate and plate polymer ice crystal models; (c)(d) atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds for solid and hollow columnar ice crystal models; (e)(f) atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds for ice crystal models with solid and hollow bullet rosette types

3 种波长下不同冰晶粒子模型的冰云大气偏振度趋近 0,这是由于 60°~65°观测角与 155°~160°散射角对应,并且由图 1 可知,155°~160°散射角内存在更多的衍射光线(零偏振),且涉及负偏振的透射光线。观测角大于 65°时,不同波长和不同冰晶粒子模型的冰云大气偏振度增大,这是由于后向散射出的光线强度逐渐增加,导致更多的外部反射光线(正偏振)增加。由图 5(b)、(d)、(f)可知,不同波长、冰晶粒子模型的冰云大气偏振度的变化更加复杂。

### 3.2.2 冰云大气反射偏振辐射传输特性随冰云光学特性的变化情况

当 1.55 μm 波长以大天顶角入射冰云大气时,图 6 模拟计算了光学厚度、有效半径和冰水含量对冰云大气反射率和偏振度的影响。模拟条件选择实心柱状冰云模型,取相对方位角为 180°,地表反照率为 0。

图 6(a)、(c)、(e)分别计算了光学厚度为 0.5, 1, 2, 5, 有效半径为 20, 40, 60 μm, 冰水含量为 0.005, 0.01, 0.01 g/cm<sup>3</sup> 时的冰云大气反射率。由图 6(a)可知,当冰云光学厚度由 0.5 增加到 5 时,冰云大气的反射率随光学厚度的增加而增加,这是由

于光学厚度的增加导致冰云层透射率和吸收减小,云层的单次散射增强,反射率增加。在 0°~75°和 75°~80°观测角范围内,冰云大气反射率最大增值分别为 0.0013 和 0.0004,随着观测角的增大,当光学厚度逐渐增加时,冰云大气反射率的增幅逐渐减小。说明在 0°~75°观测角范围内,光学厚度对冰云大气反射率较敏感。由图 6(c)可知,冰云大气反射率随有效半径的增加而减小,这是由于有效半径的增加导致冰晶粒子内部吸收增加,云层顶部反射出的光强减弱。在 0°~80°观测角范围内,有效半径的变化对冰云大气反射率的影响较明显,有效半径增加,冰云大气反射率最大增值超过 0.006,说明在 0°~80°观测角范围内,有效半径对冰云大气反射率较敏感。由图 6(e)可知,冰云大气反射率随冰水含量的增加而增大,随观测角的增大,当冰水含量逐渐增加时,冰云大气反射率增幅逐渐减小,这与光学厚度改变时冰云大气反射率的变化趋势一致,这是由于冰水含量与光学厚度呈正比关系,冰水含量的增加导致冰云光学厚度增加。

图 6(b)、(d)、(f)分别为光学厚度为 0.5, 1, 2, 5, 有效半径为 20, 40, 60 μm, 冰水含量为 0.005,

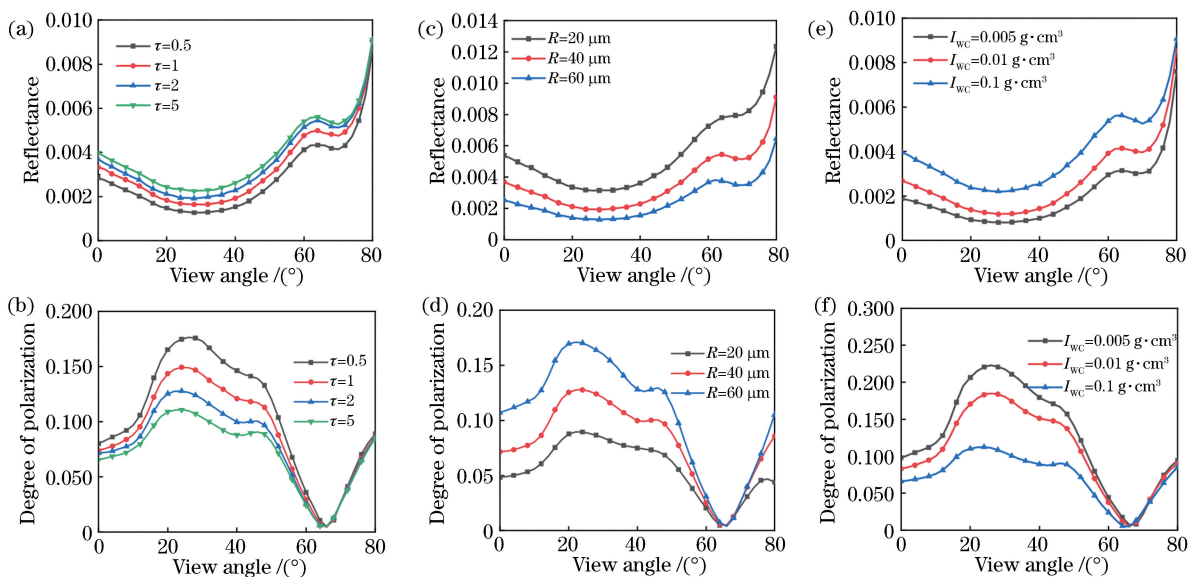


图6 不同光学厚度、有效半径和冰水含量时冰云大气反射率和偏振度随观测角的变化。(a)(b)不同光学厚度时的冰云大气反射率和偏振度;(c)(d)不同有效半径时的冰云大气反射率和偏振度;(e)(f)不同冰水含量时的冰云大气反射率和偏振度

Fig. 6 Variations in atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds with view angle at different optical thicknesses, effective radii, and ice water contents. (a)(b) Atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds at different optical thicknesses; (c)(d) atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds at different effective radii; (e)(f) atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds at different ice water contents

0.01, 0.01 g/cm<sup>3</sup> 时的冰云大气偏振度。由图6(b)、(d)、(f)可知,在0°~64°观测角范围内,冰云大气偏振度随光学厚度和冰水含量的增加而增大,最大增值超过0.05,这是由于光学厚度和冰水含量的增加使云层内部的吸收增加,光波与云层内部的相互作用减弱,导致云层偏振度减小。冰云大气偏振度随有效半径的增加而减小,减小的最大值超过0.05,这是由于有效半径的增加使光波与云层内部的相互作用增强,云层偏振度增加。这说明在0°~75°观测角范围内,光学厚度、冰水含量和有效半径对冰云大气偏振度较敏感。在64°观测角,图6(b)、(d)、(f)中的冰云大气偏振度趋近于0,与图5(d)中的1.55 μm波长的实心柱冰晶粒子模型的零偏振点(160°散射角)对应。在64°~80°观测角范围内,随着光学厚度和冰水含量的增加,偏振度值的变化差异不明显,而有效半径增加,偏振度值变化差异较明显,说明在64°~80°观测角范围内,光学厚度和冰水含量对偏振度不敏感。

### 3.2.3 冰云大气反射偏振辐射传输特性随相对方位角和地表反照率的变化情况

图7模拟计算了1.55 μm波长入射冰云大气时,冰云大气反射率和偏振度随相对方位角和地表

反照率的变化关系。模拟条件为实心柱状冰晶粒子模型的冰云模型,取光学厚度为2、有效半径为40 μm、冰水含量为0.005 g/cm<sup>3</sup>。

图7(a)和(b)为不同相对方位角时冰云大气反射率和偏振度随观测角的变化关系。由图7(a)和(b)可知,相对方位角改变时,冰云大气反射率和偏振度的变化趋势不同,其中90°相对方位角的冰云大气反射率明显大于150°和180°,且150°和180°相对方位角之间的冰云大气反射率的幅值变化比较复杂。不同相对方位角冰云大气偏振度的幅值变化更复杂,无统一变化特征。这是由于相对方位角改变时,观测角所对应的散射角也发生变化,相对方位角为90°、150°和180°时,观察角0°~80°分别对应95°~91°、95°~150°和95°~175°散射角,该结论可用散射角 $\Theta$ 与辐射方向 $(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0)$ 的关系式证明。因此,对于不同的相对方位角,冰云大气反射率和偏振度幅值的变化趋势不同,在不同空间位置处的大气遥感探测中,应选择合理的相对方位角。

图7(c)和(d)取冰云的光学厚度 $\tau$ 为2、有效半径 $R$ 为40 μm和相对方位角为180°,计算了地表反照率 $A$ 为0.0, 0.2, 0.5, 0.8时冰云大气反射率和偏振度随观测角的变化关系。由图7(c)和(d)可知,

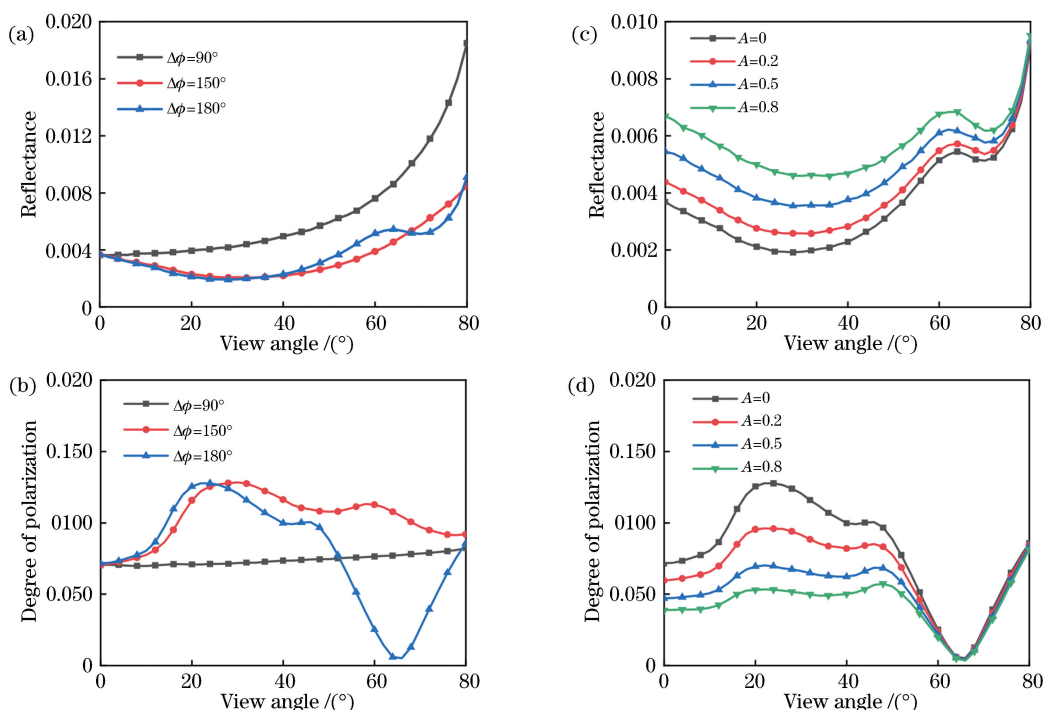


图 7 不同相对方位角和地表反照率时冰云大气反射率和偏振度随观测角的变化。(a)(b)不同相对方位角时冰云大气反射率和偏振度;(c)(d)不同地表反照率时冰云大气反射率和偏振度

Fig. 7 Variations in atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds with view angle at different relative azimuths and surface albedos. (a)(b) Atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds at different relative azimuths; (c)(d) atmospheric reflectance and degree of polarization of ice clouds at different surface albedos

地表反照率对冰云大气的反射率和偏振度有明显的影响。随着观测角的变化,地表反照率增大,冰云大气的反射率增大,偏振度减小,这是由于地表反照率增加了光子被反射回高空的可能性。在  $0^\circ\sim 75^\circ$  观测角范围内,地表反照率从 0 增加到 0.8,冰云大气反射率的增值最大接近 0.003,随着观测角的增大,当地表反照率逐渐增加时,冰云大气反射率的增幅逐渐减小。在  $64^\circ$  观测角冰云大气偏振度的值趋于 0,并且在  $64^\circ\sim 80^\circ$  观测角范围内,地表反照率对冰云大气偏振度的影响不明显。因此,冰云大气的反射率和偏振度中隐含地表信息,在遥感探测中需除去地表信息的影响。

## 4 结 论

利用基于矢量辐射传输方程的蒙特卡罗方法,比较了 2 种大气模式下冰云大气的反射率差异。然后进一步分析计算了球形大气模式下 3 种波长入射冰云大气时,冰晶粒子模型、光学厚度、有效半径、冰水含量、相对方位角和地表反照率对冰云大气反射偏振特性的影响。结果表明:大天顶角入射时,平面平行大气和球形大气对冰云大气反射率有较大的影响。因此,大天顶角入射时必须考虑大气的球面几

何特性。冰晶粒子模型、入射光的波长、云层的光学厚度、有效半径、冰水含量、相对方位角和地表反照率对冰云大气的反射率和偏振度均有影响,且冰晶粒子模型和相对方位角对冰云大气反射率和偏振度的影响变化更加复杂,因此,在不同空间位置的大气激光探测、通信、遥感等工程应用需根据实际情况选择合理的相对方位角和冰云模型。

本研究对考虑球形大气时,不同冰云大气环境下激光探测、激光通信和遥感等实际工程应用有一定的参考价值。由于真实大气环境中的冰晶粒子形状和粒子分布特性比较复杂,需建立更实际的冰云模型用于计算冰云大气的辐射传输特性。

## 参 考 文 献

- [1] Liou K N, Yang P. Light scattering by ice crystals [M]. UK: Cambridge University Press, 2016: 1-5, 30-41.
- [2] Burnashov A V, Feldshtein A, Sibiryakova E, *et al.* Intensity and polarization characteristics of the light scattered by the ice crystals of cirrus clouds with preferred orientations [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6708: 67080X.
- [3] Gu X F, Chen L F, Yu T, *et al.* Multi-angular



- polarized characteristics of cirrus clouds [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(8): 5323-5332.
- 顾行发, 陈良富, 余涛, 等. 卷云多角度偏振特性研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(8): 5323-5332.
- [4] Cheng T H, Gu X F, Yu T, *et al.* Multi-angular polarized radiation characteristics of water clouds[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(4): 267-271.
- 程天海, 顾行发, 余涛, 等. 水云多角度偏振辐射特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(4): 267-271.
- [5] Li S, Sun X B, Ti R F, *et al.* Retrieval of cirrus cloud top height over ocean based on multi-angle polarized information [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(4): 445-453, 458.
- 李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 基于多角度偏振信息反演海洋上空卷云云顶高度[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(4): 445-453, 458.
- [6] Li S, Sun X B, Ti R F, *et al.* Influence of scattering model and effective particle radius on cirrus cloud optical thickness retrieval [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0701001.
- 李树, 孙晓兵, 提汝芳, 等. 散射模型和有效粒子半径对卷云光学厚度反演的影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0701001.
- [7] Kattawar G W, Plass G N. Radiance and polarization of light reflected from optically thick clouds [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(1): 74-80.
- [8] Liou K N, Takano Y. Interpretation of cirrus cloud polarization measurements from radiative transfer theory[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 27.
- [9] Stamnes S, Ou S C, Lin Z, *et al.* Polarized radiative transfer of a cirrus cloud consisting of randomly oriented hexagonal ice crystals: the  $3 \times 3$  approximation for non-spherical particles[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 193: 57-68.
- [10] Mayer B, Kylling A. Technical note: the libRadtran software package for radiative transfer calculations—description and examples of use [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(2): 1319-1381.
- [11] Wendisch M, Yang P. Theory of atmospheric radiative transfer: a comprehensive [M]. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012: 155-207.
- [12] Dahlback A, Stamnes K. A new spherical model for computing the radiation field available for photolysis and heating at twilight [J]. *Planetary and Space Science*, 1991, 39(5): 671-683.
- [13] Rozanov V V, Buchwitz M, Eichmann K U, *et al.* Sciatran—a new radiative transfer model for geophysical applications in the 240-2400 nm spectral region: the pseudo-spherical version[J]. *Advances in Space Research*, 2002, 29(11): 1831-1835.
- [14] Buras R, Dowling T, Emde C. New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(12): 2028-2034.
- [15] Hu S, Gao T C, Li H, *et al.* Analysis on impact of atmospheric refraction on radiative transfer process at visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601005.
- 胡帅, 高太长, 李浩, 等. 大气折射对可见近红外波段辐射传输的影响分析[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601005.
- [16] Mayer B. Radiative transfer in the cloudy atmosphere [J]. *The European Physical Journal Conferences*, 2009, 1: 75-99.
- [17] Emde C, Buras R, Mayer B, *et al.* The impact of aerosols on polarized sky radiance: model development, validation, and applications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(2): 383-396.
- [18] Emde C, Buras-Schnell R, Kylling A, *et al.* The libRadtran software package for radiative transfer calculations (Version 2.0) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(12): 10237-10303.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Yi B Q, Yang P, Liu Q H, *et al.* Improvements on the ice cloud modeling capabilities of the Community Radiative Transfer Model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(22): 13577-13590.
- [22] Zhang L. Study on the radiative transmission and scattering properties of cirrus clouds [D]. Xi'an: Xidian University, 2010: 34-38.
- 张琳. 卷云的辐射传输与散射特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 34-38.
- [23] Takano Y, Liou K N. Radiative transfer in cirrus clouds. Part III: light scattering by irregular ice crystals [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, 52(7): 818-837.

- [24] Emde C, Mayer B. Simulation of solar radiation during a total eclipse: a challenge for radiative transfer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7(9): 2259-2270.
- [25] Wang C X, Yang P, Baum B A, *et al.* Retrieval of ice cloud optical thickness and effective particle size using a fast infrared radiative transfer model [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(11): 2283-2297.
- [26] Coakley J, Yang P. Atmospheric radiation: a primer with illustrative solutions [M]. Liu C, Yin Y, Transl. Beijing: Higher Education Press, 2017: 76-135.
- Coakley J, 杨平. 大气辐射: 含典型案例的入门教程 [M]. 刘超, 银燕, 译. 北京: 高等教育出版社, 2017: 76-135.