

文章编号: 0253-2239(2008)10-1849-07

# 基于多角度偏振特性的云相态识别及验证

程天海<sup>1,2,3</sup> 陈良富<sup>1,3</sup> 顾行发<sup>1,3</sup> 余涛<sup>1,3</sup> 田国良<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039; <sup>3</sup> 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101)

**摘要** 云相态识别是云参数研究的重要组成部分, 为了有效识别水云和冰云, 根据水云和冰云微物理性质的差别, 研究了水云和冰云的单次散射特性, 采用基于倍加累加法的矢量辐射传输方程模拟了水云和冰云的多角度偏振特性。模拟结果表明, 光谱的多角度偏振特性能够体现出水云粒子和冰云粒子微物理性质的差异, 云在特定方向反射的偏振辐射强度对云相态非常敏感, 可以用来进行云相态的识别。在模拟的基础上进行了云相态识别算法的研究, 并利用多角度偏振卫星数据——POLDER 0.865  $\mu\text{m}$  通道数据进行了实例分析。识别结果与 MODIS 云相态产品及其 1.38  $\mu\text{m}$  卷云检测结果进行了比较。分析结果表明, 基于多角度偏振特性云相态识别算法可以有效地进行云相态识别。

**关键词** 矢量辐射传输方程; 云相态识别; 偏振辐射强度; 水云模型; 冰云模型

**中图分类号** TP79; P407.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1849

## Cloud Phase Classification and Validation Based on Multi-Angular Polarized Characteristics of Cloud

Cheng Tianhai<sup>1,2,3</sup> Chen Liangfu<sup>1,3</sup> Gu Xingfa<sup>1,3</sup> Yu Tao<sup>1,3</sup> Tian Guoliang<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China  
<sup>3</sup> Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China)

**Abstract** Cloud phase recognition is important for cloud studies. The single-scattering properties of water cloud and ice cloud were studied to effectively identify them, in the light of the difference of microphysical characteristics between the two kinds of clouds, their polarized radiance was simulated by utilizing the vector radiative transfer equation based on adding-doubling method. The results indicate that the polarized radiance over a large range of scattering angles can show the distinction between water cloud and ice cloud, and can be used to recognize the cloud phase. The algorithm of cloud phase classification based on the simulations is presented and demonstrated by using the data of POLDER 0.865  $\mu\text{m}$ . The results of cloud phase retrieval was compared with the phase products of MODIS and the result of cirrus detection of MODIS based on 1.38  $\mu\text{m}$ . The analysis shows that the cloud phase retrieval method based on near-infrared polarimetric measurements can improve the capability of cloud phase classification through satellites.

**Key words** vector radiative transfer equation; cloud phase classification; polarized radiance; water cloud model; ice cloud model

## 1 引言

云通常覆盖地球大气 50% 左右, 是地气系统辐射收支的主要调解者。云的性质及其在不同空间和

时间尺度上的变化对全球气候变化和天气系统有重要影响。要了解云对气候的反馈作用必须获得不同的云类型及其光学特性, 而云类型和大气热动力学

**收稿日期**: 2007-12-24; **收到修改稿日期**: 2008-04-10

**基金项目**: 国防科技工业民用专项科研技术研究项目(KJSX0601)和国家 863 计划(2006AA06A303)资助课题。

**作者简介**: 程天海(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事利用多角度偏振遥感信息反演云参数等方面的研究。

E-mail: cthy122@126.com

**导师简介**: 顾行发(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事定量化遥感、遥感传感器定标和地表定量方法等方面研究。E-mail: xfgu@irsa.ac.cn

的研究要求认知云相态<sup>[1]</sup>。因此云相态研究对于揭示天气气候系统发生发展的物理机制有着十分重要的意义。

云相态是指云所处的液态或固态,即为水云或冰云。水云主要由球形水滴组成,根据地面站点的观测,液相云滴粒子半径的范围为  $0.5 \sim 50 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。冰云由比球形粒子复杂的冰晶粒子组成,冰晶的形状和大小随环境温度和湿度的变化而变化。根据地基雷达观测,及国外大型卷云观测实验(SUCCESS、FIRE-II、CRYSTAL-FACE等),将冰晶粒子的形状近似表示为如下形状:板状(Plate)、实心柱体(Solid column)、空心柱体(Hollow column)、子弹玫瑰型(Bullet rosettes)、团状(Aggregate)和过冷水滴(Droxtals)等,其冰晶粒子大小约为  $2 \mu\text{m}$  到  $9500 \mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>。

云的辐射特征由云粒子的几何形状和单次散射性质决定。云粒子的单次散射性质与云粒子的复折射指数、云粒子的大小和粒子的谱分布有关。复折射指数是反映云粒子对辐射的散射和吸收能力的基本参数。Hale 和 Query 整理出了从  $0.2 \sim 200 \mu\text{m}$  范围内水粒子的复折射指数;Warren 1984 年编纂的冰粒子从紫外到微波的复折射指数。对于水云粒子,可用米氏散射理论得到半径为  $r$  的球形粒子对波长  $\lambda$  的辐射的散射问题的精确解。而非球形冰晶粒子散射特性的计算在国际上是一个非常活跃的研究课题,近些年发展和改进了很多种研究非球形粒子散射特性的解法<sup>[4]</sup>,其中根据严格的理论的数值解法有:有限时域法(FDTD)、离散偶极子近似法(DDA)、T 矩阵(T Matrix)等方法;根据近似理论的数值解法有:几何光学法(GOM)、逐线积分法(RBRI)等。各种计算方法有各自的优缺点和适用范围。由于冰云模型的复杂性,其散射特性问题,还没有统一的理论可以解决。

利用遥感卫星信息反演云顶粒子相态分布,一直是卫星气象学和大气物理学的研究热点之一。国际上利用卫星数据进行云相态识别工作一般是基于热红外波段的探测信息。1974 年 Liou 研究了卷云在卫星通道  $10 \mu\text{m}$  窗区的发射和散射性质,此通道被用来进行云相态识别的主要通道。Ackerman 等

在研究 FIRE 试验期间的卷云个例中,分析了卷云在  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  窗区的光谱性质,提出了三光谱云相态识别技术<sup>[5]</sup>。在此基础上,MODIS 云顶性质及相态反演小组 Menzel<sup>[6]</sup>综合利用  $8 \mu\text{m}$ 、 $11 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$  的波段信息进行云相态识别。

本文从水云和冰云的微物理特性入手,采用米氏散射理论求解了水云模型的单次散射特性;采用 Baum<sup>[3]</sup>提出的各种方法的组合计算来求解冰云模型单次散射性质,研究了水云和冰云的单次散射特性。采用基于倍加累加法的矢量辐射传输方程模拟了水云和冰云在  $0.865 \mu\text{m}$  处的偏振辐射强度的多角度分布特性,从理论上分析了多角度偏振特性进行云相态识别的可行性。在模拟的基础上进行了云相态识别算法的研究,并进行了实例分析。识别结果与 MODIS 云相态产品及其  $1.38 \mu\text{m}$  卷云检测结果进行了比较,获得了相应的结论。

## 2 原理和方法

### 2.1 多角度偏振辐射特性模拟原理

大气对太阳光的散射辐射具有明显的偏振特性,偏振信息载有介质的属性特征,通过测量散射光的偏振信息,可以得到介质的物理和光学参数<sup>[7]</sup>。云的偏振特性及其变化与云的光学和微观物理特性密切相关,使得偏振遥感技术可以应用于云相态识别的探测<sup>[8]</sup>。

在遥感探测中采用斯托克斯(Stokes)参量  $I, Q, U, V$  来描述偏振光的偏振信息<sup>[9]</sup>,定义如下:

$$\begin{aligned} I &= I_{//} + I_{\perp}, \\ Q &= I_{//} - I_{\perp}, \\ U &= \langle 2a_{//} a_{\perp} \cos(\delta_{//} - \delta_{\perp}) \rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

$$V = \langle 2a_{//} a_{\perp} \sin(\delta_{//} - \delta_{\perp}) \rangle,$$

式中  $I_{//}$  和  $I_{\perp}$  分别表示平行和垂直分量的强度,  $I$  表示总辐射强度,  $Q$  表示平行或垂直于参考平面的线偏振的强度,  $a_{//}$  和  $a_{\perp}$  分别为平行和垂直方向的振幅,  $\delta_{//}$  和  $\delta_{\perp}$  分别为平行和垂直方向的相位,  $\langle \cdot \rangle$  表示对时间的平均,  $U$  表示与参考平面成  $45^\circ$  角上的线偏振的强度,  $V$  表示圆偏振强度<sup>[10]</sup>。

电磁波在平面平行介质(如大气)中的传输及其在分配方式可由矢量辐射传输方程表示<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} \mu \frac{d\mathbf{I}(\tau, \mu, \Phi)}{d\tau} &= -\mathbf{I}(\tau, \mu, \Phi) + \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi; \mu', \Phi') \mathbf{I}(\tau, \mu', \Phi') d\mu' d\Phi' + \\ &\frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right) \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi; -\mu_0, \Phi_0) [1, 0, 0, 0]^T + (1 - \omega) B(T) [1, 0, 0, 0]^T, \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\mathbf{I}$  为 Stokes 矢量, 可表示为

$$\mathbf{I} = [I, Q, U, V]^T, \quad (3)$$

(2) 式中的  $T$  表示为矩阵转置,  $\mu$  为极角余弦, 向上为正, 向下为负,  $\Phi$  为相对于太阳出射光线的方位角,  $\tau$  为光学厚度,  $\omega$  为单次散射反照率,  $F_0$  为大气顶太阳入射辐射通量,  $\mu_0$ 、 $\Phi_0$  为太阳天顶角的余弦和方位角,  $B$  为 Planck 函数,  $\mathbf{M}$  为散射相矩阵。

本文采用了基于倍加累加法的矢量辐射传输模式<sup>[11]</sup>来求解斯托克斯参量  $I, Q, U, V$ 。此模式采用基于矩阵算子理论的倍加累加法, 直接利用傅里叶变化将单次散射相函数  $P$  离散化, 并将  $\delta-M$  方法从标量辐射传输情形推广到矢量辐射传输情形, 保证高前向峰相函数在离散化空间上的归一化。

偏振信息一般采用偏振度  $P$ <sup>[8]</sup>来描述, 由矢量辐射传输方程计算出 Stokes 参数  $(I, Q, U, V)$ , 则其偏振度  $P$  为

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \quad (4)$$

但偏振度  $P$  受云层光学厚度变化的影响较大, 本文采用多角度偏振测量仪 (POLDER) 观测资料定义的归一化偏振辐射强度  $L_p$  来表征云的偏振信息。定义大气顶层卫星接收到的归一化偏振辐射强度可以表示为

$$L_p = \pi \sqrt{Q^2 + U^2} / E_s, \quad (5)$$

其中  $\sqrt{Q^2 + U^2}$  为大气层顶的偏振辐射强度,  $E_s$  为大气层顶的太阳辐射通量密度。辐射强度数据除以太阳天顶角余弦 ( $\cos \theta_s$ ) 就可得到反射率数据, 即归一化偏振反射率  $R_p = L_p / \cos \theta_s$ 。

## 2.2 大气模型

在进行矢量辐射传输模拟过程中, 将大气简化为一个三层介质系统: 在  $0 \sim 2$  km 处为气溶胶和分

子层, 第二层为光学厚度可调云层 (水云或冰云) 介质, 第三层为光学厚度固定的分子散射层。鉴于理论计算的方便性, 地表类型选为海洋, 地表反照率设为 0; 气溶胶类型选为典型的海洋性气溶胶类型<sup>[12]</sup>,  $0.865 \mu\text{m}$  处的光学厚度设为 0.3; 各层分子光学厚度由标准大气模式计算得到, 并需要扣除地理几何高度的影响, 计算  $0.865 \mu\text{m}$  波长处的分子光学厚度, 得在  $0 \sim 2$  km 处的光学厚度为 0.003, 整层的光学厚度为 0.01581。

## 2.3 水云的多角度偏振特性

水云的单次散射特性与水云粒子的形状、大小、粒子谱分布和水云粒子的复折射指数有关。水云主要由球形水滴组成, 云粒子的粒子谱分布具有一定的特征形状, 水云粒子谱的具体形式并不会影响其单次散射相矩阵各分量随角度分布形式, 并鉴于在理论计算上的方便性和有效性, 本文假设云粒子谱分布为 Hansen- $\Gamma$  谱:

$$n(r) = Cr^\alpha \exp[-\beta r^\gamma], \quad (6)$$

式中:  $C = \frac{\gamma \beta^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma[(\alpha+1)/\gamma]}$ ,  $\gamma = 1$ ,  $\alpha = \frac{1-3v_{\text{eff}}}{v_{\text{eff}}}$ ,  $\beta = \frac{1}{r_{\text{eff}} v_{\text{eff}}}$ ,  $r_{\text{eff}}$  为有效半径,  $v_{\text{eff}}$  为有效方差。 $r_{\text{eff}}$  的全球平均值在海洋上空约为  $11 \mu\text{m}$ 、陆地上空约为  $8 \mu\text{m}$ 。

复折射指数反映水云粒子对散射和吸收的基本能力。 $0.865 \mu\text{m}$  波段处复折射指数为  $m = 1.329 + i2.93 \times 10^{-7}$ 。

采用米氏散射理论求解水云的单次散射性质即水云的消光系数、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数。图 1 为水云的相函数和偏振相函数 (散射矩阵的第二个元素) 的分布图。

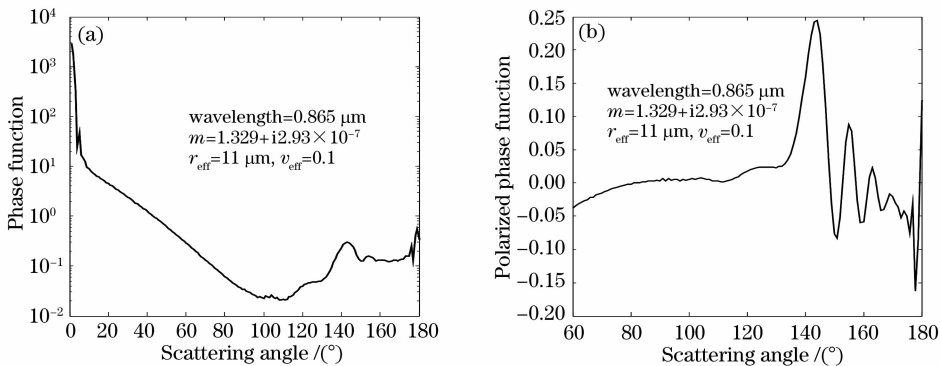


图 1 水云的 (a) 相函数和 (b) 偏振相函数随散射角的变化

Fig. 1 Phase function (a) and polarized phase function (b) of water cloud as a function of scattering angle

由图 1 可知, 水云散射具有强前向衍射特征。相函数在散射角约  $100^\circ$  处有极小值, 在  $140^\circ$  附近处

有峰值, 即为虹特征。与相函数相比, 偏振相函数的虹特征更加明显。

采用基于倍加累加法的辐射传输模式 RT3, 耦合水云的单次散射特性, 模拟了光学厚度为 10 的水云的多角度偏振特性。模拟条件: 入射波长为  $0.865 \mu\text{m}$ 、太阳天顶角为  $30^\circ$ 、观测天顶角为 20 个, 相对方位角为 32 个。图 2 为模拟的水云的多角度辐射特性, 图 2(a) 为水云的多角度归一化辐射强度分布图(BRDF), 图 2(b) 为水云的多角度归一化偏振辐射强度分布图(BPDF), 图为极坐标系, 极径和极角分别为观测天顶角和相对方位角, 颜色表示模拟水云的归一化辐射强度和偏振辐射强度。由图 2(a) 知, 水云的归一化多角度辐射强度有两块亮区域, 上部亮区域的观测天顶角为  $75^\circ$  附近, 相对方位角为

$0^\circ$ , 太阳天顶角为  $30^\circ$ , 对应的散射角  $75^\circ$  附近, 这是因为水云粒子具有强的前向散射特征。下部亮区域呈现圆环形, 经计算圆环对应散射角  $140^\circ$  附近, 这是因为水云在散射角  $140^\circ$  附近有峰值, 为众所周知的虹特征。由于多次散射的影响, 使得 BRDF 的变化并不完全符合相函数的变化; 由图 2(b) 知, 与归一化辐射强度相比, 归一化偏振辐射强度的虹特征更加明显, 可以更有效的表征水云粒子, 且偏振辐射强度受多次散射的影响较少。在观测天顶角为  $90^\circ$  附近, 偏振辐射强度有极大值, 主要是由于临边增亮(Limb brightening)的影响。

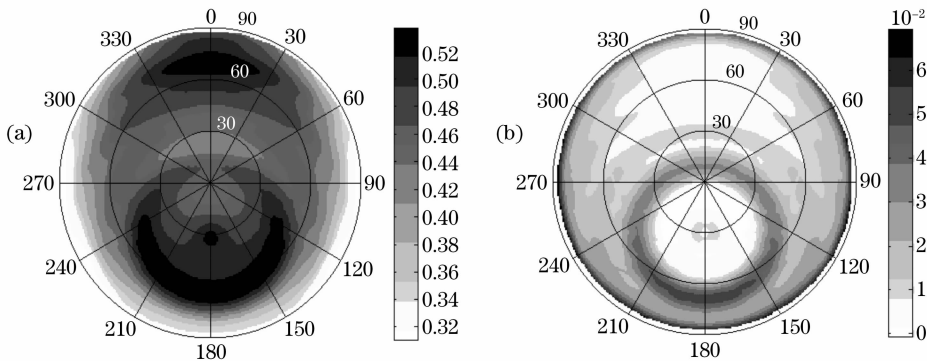


图 2 模拟水云的(a)多角度归一化辐射强度分布图(BRDF)和(b)多角度归一化偏振辐射强度分布图(BPDF)

Fig. 2 (a) BRDFs and (b) BPDFs of simulated water cloud

## 2.4 冰云的多角度偏振辐射特性

冰云是由分布在大气高层的各种形状的冰晶组成, 大约覆盖地球表面的  $20\% \sim 30\%$ 。根据地面观测和卷云的航空实验表明, 单一的冰晶粒子形状并不能符合实际情况, 各种冰晶形状的组合更能有效符合观测的数据<sup>[13]</sup>。Baum 将冰云模型表示如表 1 所示。

本文采用 Baum 提出的冰云组合模型来求解冰云模型单次散射性质。设冰晶有效尺度为  $80 \mu\text{m}$

时, 冰云模型采用由  $15\%$  的子弹玫瑰型、 $50\%$  的实心柱体和  $35\%$  的板状冰晶体组成。计算冰云的相函数和偏振相函数(见图 3)。由图 3 可知, 冰云在散射角  $22^\circ$  晕峰值(通过  $60^\circ$  棱镜角两次折射)、 $46^\circ$  晕峰值(通过  $90^\circ$  棱镜角的两次折射)以及  $155^\circ$  (一次或两次内反射)附近处的峰值现象是比较明显的; 在散射角为  $140^\circ$  水云虹特征处, 冰云的偏振相函数无异常特征。

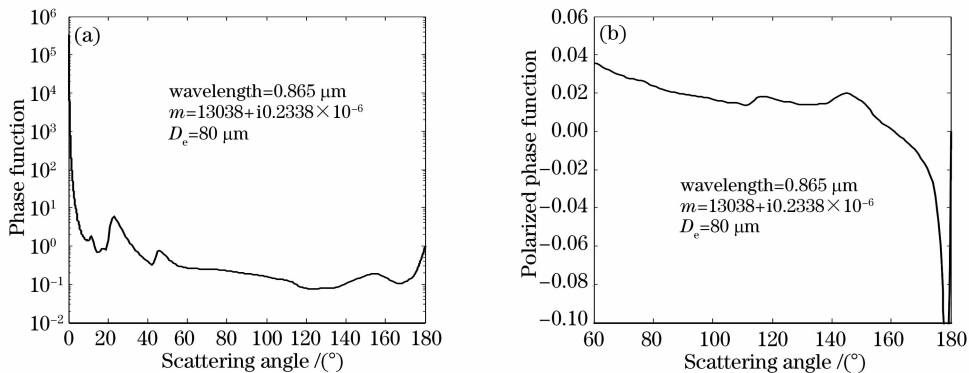


图 3 冰云的(a)相函数和(b)偏振相函数随散射角的变化

Fig. 3 Phase function (a) and polarized phase function (b) of ice cloud as a function of scattering angle

表 1 冰云模型

Table 1 Models of ice cloud

Effective scale of ice crystal particle $D_e$	Ice cloud model
$D_e < 60 \mu\text{m}$	100% droxtals
$60 \mu\text{m} < D_e < 1000 \mu\text{m}$	15% bullet rosettes+50% solid columns+35% plates
$1000 \mu\text{m} < D_e < 2500 \mu\text{m}$	45% hollow columns+45% solid columns+10% aggregates
$2500 \mu\text{m} < D_e < 9500 \mu\text{m}$	97% bullet rosettes+3% aggregates

为研究冰云的多角度偏振辐射强度,采用辐射传输模式 RT3,耦合冰云的单次散射特性,模拟了光学厚度为 10 的冰云的多角度偏振特性,模拟条件与水云的模拟条件相同。

图 4 为模拟的冰云的多角度辐射特性,图 4(a)为冰云的多角度归一化辐射强度分布图(BRDF),图 4(b)为冰云的多角度归一化偏振辐射强度分布图(BPDF)。由图 4(a)知,冰云的归一化多角度辐射强度有两部分亮的区域,上部亮的区域的是因为冰云粒子具有强的前向散射特征。下部亮的区域呈现圆形,经计算,圆形对应的散射角  $155^\circ$  附近,这是

因为冰云的相函数在散射角  $155^\circ$  附近处有峰值;圆形中心区域归一化辐射强度比较高,对应于冰云相函数在  $180^\circ$  处有峰值,但由于多次散射的影响,BRDF 分布特性与相函数分布不完全相同。由于观测几何的限制,图 4(a)没有体现出  $22^\circ$  晕峰值和  $46^\circ$  晕峰值。由图 4(b)知,冰云的归一化偏振辐射强度在散射角  $150^\circ$  到  $175^\circ$  范围内有一暗圆环,符合偏振相函数的分布,圆环区域有一亮区域,对应于偏振相函数在散射角  $180^\circ$  处的峰值。在观测天顶角为  $90^\circ$  附近,冰云偏振辐射强度有极大值,主要是由于临边增亮的影响。

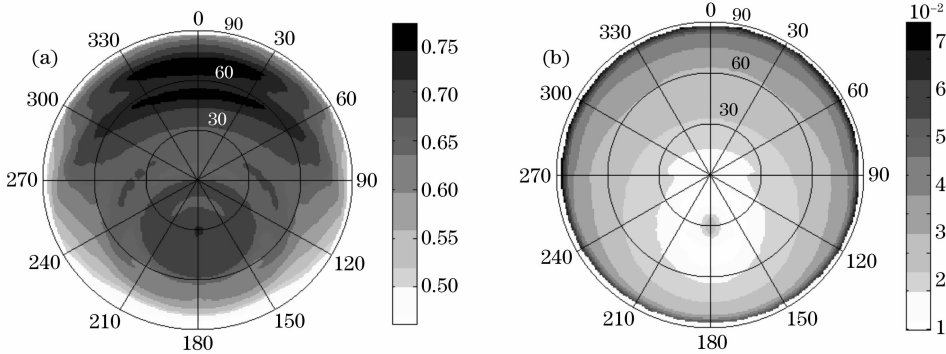


图 4 模拟冰云的(a)多角度归一化辐射强度分布图(BRDF)和(b)多角度归一化偏振辐射强度分布图(BPDF)

Fig.4 (a) BRDF and (b) BPDF of simulated ice cloud

### 2.5 水云与冰云的多角度偏振特性的差异

为了比较水云和冰云偏振辐射强度的角度分布情况,图 5 表示了模拟的归一化偏振辐射强度随散射角的变化情况。为验证矢量辐射传输方程模拟的

反射率和偏振反射率的正确性,比较分析了模拟值和卫星观测值。所选的卫星数据为现有星载多角度偏振测量仪器 POLDER 的  $0.865 \mu\text{m}$  通道数据, POLDER 是第一个可以获得偏振光观测的星载对

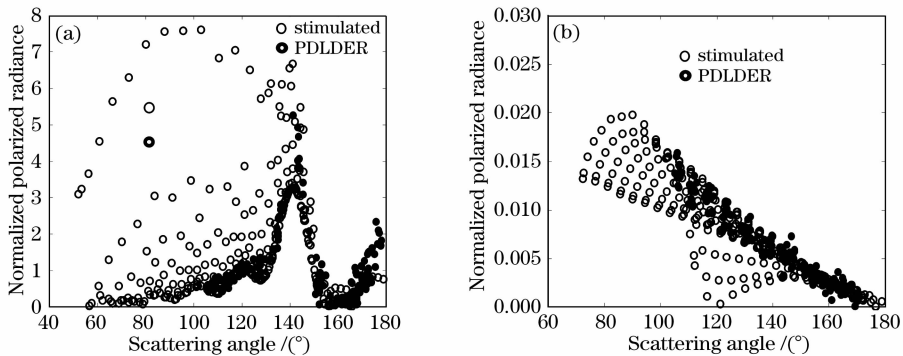


图 5 模拟的归一化偏振辐射强度和 POLDER 观测值随散射角的变化(a)水云(b)冰云

Fig.5 Simulated normalized polarized radiance and observed data of POLDER as a function of scattering angle.

(a) Water cloud, (b) ice cloud

地探测器,为利用多角度偏振遥感信息识别水云和冰云提供了契机。

由图 5 可知两者存在两大差异:(1)水云的偏振辐亮度和卷云的偏振辐亮度的角度分布在散射角为  $140^\circ$  时差异最为明显,水云出现了虹特征;(2)散射

角在  $60^\circ\sim 140^\circ$  范围内,水云偏振辐亮度曲线的斜率为正值,而冰云偏振偏振辐射强度的斜率为负值。本文将水云与冰云偏振辐射强度的这两点差异,总结为如下云相态具体判别准则(见表 2)。

表 2 云相态识别具体判别准则

Table 2 Detailed criteria for cloud phase classification

		Slope in $60^\circ\sim 140^\circ$		
		Negative	Positive	Non-covering
P-Rainbow	No ( $< \text{Threshold\_min}$ )	Ice cloud	Ice cloud/water cloud	Ice cloud
P-Rainbow	Yes ( $> \text{Threshold\_max}$ )	Water cloud	Water Cloud	Water cloud
P-Rainbow	No-covering	Ice/water	Water cloud	Uncertain

表中, P-Rainbow 指是否存在主要的虹现象; Threshold\_min 和 Threshold\_max 分别为判别阈值区域的下限和上限。P-Rainbow 现象为水云和冰云的主要差异,如果存在 P-Rainbow 现象,则为水云;而  $60^\circ\sim 140^\circ$  范围内斜率的判别条件为 P-Rainbow 现象判别条件的有效补充。

### 3 基于 POLDER 数据的云相态反演识别与验证

#### 3.1 POLDER 数据及其云相态识别

根据上述原理基于 POLDER 数据进行云相态识别。POLDER 是第一个可以获得多角度偏振光观测的星载对地探测器,它具有以下几个特点:(1)对太阳光谱的可见光及近红外波段进行偏振辐亮度的观测;(2)可以实现对同一地面目标进行多角度的观测,单个轨道期间,最多能够在 16 个不同的视角下观测同一目标,这样便可以获得各像元在散射角为  $140^\circ$  左右处的偏振信息,使利用多角度偏振遥感信息进行云相态识别成为可能。

POLDER 探测器的 3 个偏振波段的中心波长分别为  $0.443\ \mu\text{m}$ 、 $0.670\ \mu\text{m}$  和  $0.865\ \mu\text{m}$ 。考虑到大气分子光散射的影响,本文采用分子散射较小的近红外偏振波段,即  $0.865\ \mu\text{m}$  波段的多角度偏振辐亮度进行云相态识别。

选择 2003 年 9 月 25 日试验区(N42-N22、E92-E152),图 6 为试验区图像。在进行云相态识别前,首先需要进行云像元的监测,将有云像元和无云像元进行识别。即采用 Breon 1999 年提出的基于单像元的云监测方法<sup>[14]</sup>,然后利用上述原理获得的云相识别的模式对图 6 的云像元进行逐个判断与识别,获得云相态识别结果(见图 7)。

#### 3.2 基于 MODIS 云相态的精度评价

由于缺乏地面雷达观测数据和航空试验数据,

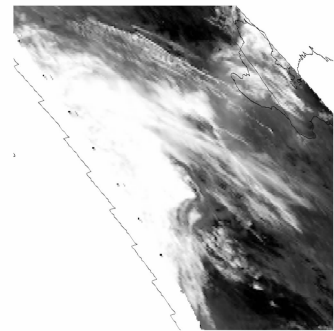


图 6  $0.865\ \mu\text{m}$  波段处反射率图

Fig. 6 Reflectance image at  $0.865\ \mu\text{m}$

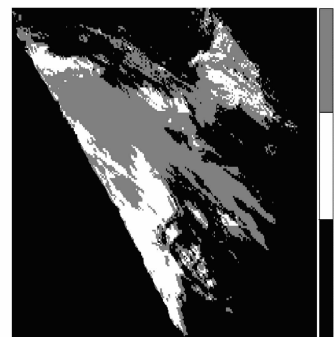


图 7 云相态识别结果图

Fig. 7 Result of cloud phase recognition

本文选用具有云相态产品的卫星数据 MODIS 数据产品进行精度评价。选择和 POLDER 数据同一天的和同一地区的 MODIS 数据,MODIS 样本区位于 N39-N34、E106-E122 范围。MODIS 数据的成像时间为 02:50,POLDER 数据的成像时间为 02:49,成像时间非常相近,对于云相态来说变化不会太大。

MODIS 云相态识别是基于  $8\ \mu\text{m}$ 、 $11\ \mu\text{m}$  和  $12\ \mu\text{m}$  三个热红外波段的三光谱法实现的<sup>[15]</sup>。其基本原理是基于不同相态的云粒子在  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  波谱范围内对相同入射辐射存在较大的吸收差别,即水云在  $11\ \mu\text{m}$  与  $12\ \mu\text{m}$  波长处的亮温差比其在  $8.5\ \mu\text{m}$  与  $11\ \mu\text{m}$  处亮温差大,相反,冰云在  $11\ \mu\text{m}$  与  $12\ \mu\text{m}$  波

长处的亮温差比其在  $8.5 \mu\text{m}$  与  $11 \mu\text{m}$  处亮温差小。由于 MODIS 空间分辨率是  $1 \text{ km}$ , POLDER 空间分辨率是  $6 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ , 一个 POLDER 的像元有 42 个 MODIS 像元。MODIS  $1 \text{ km}$  空间尺度的像元进行加权平均得到一个 POLDER 像元大小的混合像元。在此基础上, 将基于 POLDER 多角度偏振特性的云相态识别结果与 MODIS 云相态识别产品相比较。

MODIS 具有专门用于卷云探测的通道 ( $1.38 \mu\text{m}$ )。由于水汽在  $1.38 \mu\text{m}$  上具有强烈的吸收, 来自地面及中低云的辐射被水汽吸收, 而处于高空的卷云受水汽影响较少,  $1.38 \mu\text{m}$  的辐射基本来自高层的卷云反射太阳的辐射。因此  $1.38 \mu\text{m}$  通常作为卷云探测通道。将  $1.38 \mu\text{m}$  的卷云监测与基于多角度偏振特性的云相态结果图分析对比后发现, 卷云的检测结果与冰云分布有很好的相似, 但在冰云区和水云区的交界处, 云相态识别的结果是水云或不确定性区域, 而  $1.38 \mu\text{m}$  探测的结果为冰云。

结果是可以理解的, 当云相态探测结果为水云时, 我们分析可能的原因: 中低层水云上方覆盖一层薄的卷云, 多角度偏振探测器探测的是中低层水云 and 薄卷云的混合信息, 由于卷云的光学厚度比较小, 对偏振信息的贡献比较少, 故偏振信息整体表现为水云的多角度偏振特征; 而  $1.38 \mu\text{m}$  探测的主要是高空的云信息, 此时薄卷云对信息贡献大于中低水云, 故  $1.38 \mu\text{m}$  的探测结果为冰云。当云相态探测结果为不确定性时, 可能的原因是中低水云上面覆盖高空卷云, 使探测的偏振信息表现为水云和冰云的混合信息, 不能有效地将云相态识别出来。

## 4 结 论

基于水云和冰云的微物理特性, 采用单次散射近似的方法模拟分析了水云和冰云的单次散射辐亮度随散射角的分布特性, 结果表明水云的偏振辐亮度和卷云的偏振辐亮度在水云的虹方向时, 两者差异明显。在此基础上, 本文利用 POLDER 的  $0.865 \mu\text{m}$  通道数据进行的云相态识别试验, 识别结果与 MODIS 云相态产品比较表明, 两者具有很好的一致性。但和  $1.38 \mu\text{m}$  卷云检测结果比较后表明, 基于偏振多角度方法在以下情况下不能进行有效的云相态识别: (1) 云层为薄卷云, 地面贡献较大, 探测器探测到的信息不能有效的反应薄卷云的特性; (2) 云层为混合云层, 即水云层上方覆盖一层冰云层, 此时探测器探测的信息为水云和冰云的混合信息。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. Cloud and radiation I: cloud climatology and radiative effects of clouds [J]. *Sci. Atmos. Sinica*, 1994, **18**: 910~932  
汪宏七, 赵高祥. 云和辐射(I): 云气候学和云的辐射作用[J]. *大气科学*, 1994, **18**: 910~932
- 2 G. L. Stephens, G. W. Paltridge, C. M. R. Platt. Radiation profiles in extended water clouds. III Observations [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35**: 2133~2141
- 3 B. A. Baum, A. J. Heymsfield, P. Yang *et al.*. Bulk scattering models for the remote sensing of ice clouds. Part I: Microphysical data and models[J]. *J. Appl. Meteor.*, 2005, **44**: 1885~1895
- 4 Wei Heli. *The Studies of Infrared Radiative Properties of Cirrus Clouds and the Applications to the Remote Sensing* [D]. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005. 17~22  
魏合理. 卷云红外辐射特性和遥感应用研究[D]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005. 17~22
- 5 Zhou Zhuhua, Bai Jie, Liu Jianwen *et al.*. The application of cloud phase recognition by modis spectral data [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.*, 2005, **16**(5): 678~684  
周著华, 白洁, 刘健文等. MODIS 多光谱云相态识别技术的应用研究[J]. *应用气象学报*, 2005, **16**(5): 678~684
- 6 W. P. Menzel, B. A. Baum, K. I. Strabala *et al.*. *Cloud top Properties and Cloud Phase. Algorithm Theoretical Basis Document* [M]. NASA Goddard Space Flight Center, 2002. 8~28
- 7 Yang Zhiwen, Gao Shenggang, Wang Peigang. Polarization of reflected light by earth objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 241~245  
杨之文, 高胜钢, 王培纲. 几种地物反射光的偏振特性[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 241~245
- 8 Sun Xiaobing, Hong Jin, Qiao Yanli. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(1): 111~115  
孙晓兵, 洪津, 乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(1): 111~115
- 9 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. The numerical analysis on the concentration of the scattering medium and the ratio of the impurity with the method of polarization degree [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2110~2116  
赵一鸣, 江月松, 路小梅. 利用偏振度研究散射介质浓度及杂质比的数值分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2110~2116
- 10 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999~1003  
叶松, 方勇华, 孙晓兵等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 999~1003
- 11 K. F. Evans, G. L. Stephens. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *J. Quant. Spec. Radiat. Transfer*, 1991, **46**(5): 413~423
- 12 M. D. King, Y. J. Kaufman, W. P. Menzel *et al.*. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS) [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sen.*, 1992, **30**(1): 2~27
- 13 P. Yang, B. A. Baum, A. J. Heymsfield *et al.*. Single-scattering properties of droxtals [J]. *J. Quant. Spectros. Rad. Transfer*, 2003. 1159~1169
- 14 Francois-Marie Breon, Stephane Colzy. Cloud detection from the spaceborne POLDER instrument and validation against surface synoptic observations [J]. *J. Appl. Meteor*, 1999. 777~785
- 15 B. A. Baum, P. F. Soulen, K. I. Strabala *et al.*. Remote sensing of cloud properties using MODIS airborne simulator imagery during SUCCESS 2. Cloud thermodynamic phase [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(9): 11781~11792