

引用格式: CUI Yan, LI Dexian, ZHOU Ye, et al. Atmospheric Polarization Properties under Ice Cloud Conditions[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(11):1101001

崔岩,李得先,周野,等. 冰云对天空偏振模式的影响[J]. 光子学报, 2023, 52(11):1101001

冰云对天空偏振模式的影响

崔岩,李得先,周野,陈宇茜,尚子一

(大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 大连 116024)

摘要:不同冰云条件对以偏振模式为导航信息源的偏振导航影响较大,为探究冰云大气相关参数(冰晶粒子形状、有效半径、冰水含量以及光学厚度等)对天空偏振模式的影响,建立了基于蒙特卡罗法的矢量传输模型,利用 libRadtran 模拟了实际冰云大气辐射传输过程,分析了不同冰云大气相关参数对天空偏振模式的影响,并通过图像式测试系统,实地测试了大连地区 10 组实际大气条件下天空偏振模式随冰云大气相关参数的变化情况。结果表明:冰晶粒子形状对冰云大气偏振度影响较大,对冰云大气偏振方位角影响较小。并且冰云大气偏振度随有效半径的增大而增大,随光学厚度和冰水含量的增大而减小,后逐渐趋于稳定的状态。在不同日期同一时刻下,大连地区实际冰云大气偏振度变化规律与仿真基本一致,验证了本文方法的有效性,为偏振导航的在实际冰云大气条件下的工程应用提供了理论支撑。

关键词:大气光学;偏振模式;libRadtran;冰云;大气散射

中图分类号:P427.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235211.1101001

0 引言

根据云内温度和云粒子的相态特性,云可以被分为由水滴组成的水云、由冰晶粒子组成的冰云和混合云等^[1]。冰云主要由形状复杂的冰晶粒子(板状/板状聚合物,空心/实心柱状,空心/实心子弹状等)组成,约覆盖地球表面的 20%^[2]。冰云微物理性质(冰晶粒子的形状、有效半径、冰云的光学厚度、及冰水含量等)的分布特征在空间和时间上都是复杂多变的,其离散随机的性质不可避免的对天空偏振模式产生了影响。因此,量化表征冰云的偏振特性对以偏振模式为导航信息源的偏振导航具有重要的指导意义。

近年来,国内外众多学者对冰云偏振特性进行了研究,YANG P 等^[3]建立了可见光到红外波段范围内卷云中常见冰晶粒子的散射特性数据库,该数据库包含了各种冰晶粒子的消光率、吸收率和相函数等光学特性。BAUMBA 等^[4]基于 YANG P 等建立的光学数据库拟合分析了多次测量得到的冰云散射特性。KEY JR 等^[5]提出了一种基于冰晶形状和大小的参数化方案,用于描述冰晶的光学特性,该参数化方案为描述和模拟冰云的光学特性提供了一种有效的方法。HEINSON Y W 等^[6]利用改进的几何光学法计算了常见冰晶粒子中柱状、板状等的微散射截。LIU C 等^[7]利用开发的冰云模型,结合嵌入 T 矩阵、伪光谱时域和改进的几何算法,计算了冰晶的散射、吸收和偏振特性。李树等^[8]利用 RT3 模拟分析了大气顶层不同波段下偏振反射率对冰云粒子有效半径、光学厚度等的敏感性。胡斯勒图等^[9]分析了球状和柱状冰晶粒子的光学特性,发现冰云的辐射传输特性与粒子形状密切相关。于记华等^[10]数值模拟了冰云和水云大气反射率在球型大气模式下随云散射模型、观测角和方位角等参数的变化关系。郭镭力等^[11]研究了大天顶角入射下冰云大气偏振辐射传输特性,发现不同大气模式下冰云大气发射率和偏振度差异较大。任神河等^[12]利用离散纵标法(CDISORT)比较了特定太阳天顶角下不同波长的冰云大气反射率特性。陈柯等^[13]利用辐射传输模式 DOTLRT 模拟计算太赫兹频段冰云辐射亮温,定量分析了冰晶粒子特性参数和观测几何对冰云太赫兹亮

基金项目:国家自然科学基金(No. 51675076)

第一作者(通讯作者):崔岩, yanc@dlut.edu.cn

收稿日期:2023-05-18;录用日期:2023-07-03

<http://www.photon.ac.cn>

温的影响。汪美华^[14]利用兰州大学环境观测站分析了中国西北半干旱中纬度地区上空冰云的宏、微观物理特性,并利用辐射传输模式模拟了该地区冰云的辐射效应。

综上所述,冰云大气偏振特性的研究主要集中在理论层面的分析,缺乏实际大气条件下冰云参数变化的讨论。因此,定量模拟不同冰云参数下天空偏振模式变化情况,并进行实际大气环境下冰晶粒子对偏振模式影响的研究意义重大。本文主要研究了冰云对天空偏振模式的影响,利用蒙特卡罗法比较了不同冰晶粒子在不同观测角下对天空偏振模式的影响,进而数值计算和分析了冰云偏振模式随冰晶粒子光学厚度、有效半径和冰水含量等因素的变化情况,测试分析了大连地区冰晶粒子对偏振模式的影响规律,对偏振导航在实际冰云大气环境中的应用具有指导意义。

1 冰云条件下的大气偏振模式研究原理

1.1 天空光的偏振特性

本文采用基于蒙特卡罗法的 MYSTIC 矢量辐射传输模型^[15],利用 libRadtran 软件模拟实际大气辐射传输过程^[16],数值计算包含冰晶粒子等参数的矢量传输方程,从而通过矢量传输方程描述光波在大气中传输特性,矢量传输方程^[17]为

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

式中, I 为大气辐射强度, (μ, ϕ) 为反射辐照位置, (μ', ϕ') 漫射辐照位置, (μ_0, ϕ_0) 直射辐照位置, τ 为光学厚度, ω 为单次散射反照率, F_0 为顶层大气太阳光平行入射光强, M 为散射相函数, $B(T)$ 为关于温度 T 的普朗克函数。

利用蒙特卡罗法追踪光子来模拟光子的传输路径,获取光子的最终统计特征,从而通过统计特征计算出表征偏振光分布特性的 Stokes 矢量,表达式为

$$\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T \quad (2)$$

式中, I 代表总光强, Q 表示水平和垂直方向上的线偏振度, U 表示 $\pm 45^\circ$ 方向上的偏振度, V 表示圆偏振度(本文认为 $V = 0$)。

本文采用偏振度 P 和偏振方位角 χ 表征冰云条件下的天空偏振模式,利用基于蒙特卡罗法得到的 Stokes 矢量,可得到偏振度 P 和偏振方位角 χ 的分别定义

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (3)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (4)$$

1.2 冰云参数模型

冰云层的偏振特性主要由冰晶粒子的形状、有效半径、冰云的光学厚度及冰水含量等微物理性质决定。本文通过对不同冰晶粒子物理特性的参数化,描述六种常见冰晶粒子的光学特性,如板状/板状聚合物,空心/实心柱状,空心/实心子弹状。粒子的尺度分布在实际大气环境中变化较大,通常使用修正的伽马分布函数来拟合粒子尺度分布谱^[18],计算冰云中不同尺度粒子数量的分布规律,如式(5)所示,进而得到冰云有效半径和光学厚度等参数。即

$$N(D) = N_0 \frac{(D/\lambda)^k \exp(-D/\lambda)}{\Gamma(k)} \quad (5)$$

式中, $N(D)$ 为粒子尺度为 D 的粒子数量, N_0 为单位体积内粒子的数量, λ 和 k 分别为分布函数的尺度参数和形状参数, Γ 为伽马函数。

对于满足上述分布的冰云,其有效粒子半径定义为

$$R = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} V(D)N(D)dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} S(D)N(D)dD} \quad (6)$$

式中, D_{\max} 和 D_{\min} 分别为粒子尺度分布谱的最大尺度和最小尺度, $V(D)$ 为粒子的有效体积, $S(D)$ 为有效截面积。

冰云的光学厚度是指它对特定波长光线的吸收和散射能力, 将其定义为

$$\tau = \frac{3}{4} \frac{Q_{\text{ext}} I_{\text{WC}}}{\rho_{\text{ice}} R} \Delta z \quad (7)$$

式中, Q_{ext} 、 I_{WC} 、 Δz 和 ρ_{ice} 分别为消光率因子、冰水含量、云层厚度和冰水密度。在可见波段内, 通常取消光率因子 $Q_{\text{ext}} \approx 2$, 冰水密度 $\rho_{\text{ice}} \approx 0.9167 \text{ g/cm}^3$ 。

2 仿真结果与分析

本文计算包含冰云相关参数的大气辐射传输模式, 分析了冰云微物理性质(粒子形状、有效半径、光学厚度和冰水含量)对冰云大气偏振模式的影响。仿真参数选择为: 选取大气模型为中纬度冬季大气模型, 云层高度 h 为 6 km, 云层厚度 Δz 为 1 km, 太阳高度角 Φ 为 30° , 太阳方位角 θ 为 0° , 观测方位角 θ_M 为 0° , 选择观测高度角 φ 在 $0 \sim 180^\circ$, 粒子有效半径 R 在 $5 \sim 50 \mu\text{m}$, 冰云光学厚度 τ 分别在 $0.5 \sim 50$, 冰水含量 I_{WC} 在 $0.001 \sim 0.020 \text{ g/cm}^3$ 范围内变化。由 WANG C 等^[19]通过 MODIS 对地球冰云的反演可知, 所选参数皆为地球冰云参数的典型值。

以 2022 年 11 月 13 日 13:00 的天空偏振模式为例, 冰晶粒子形状分别为板状/板状聚合物冰晶粒子、实心柱/空心柱状冰晶粒子、实心子弹/及空心子弹状冰晶粒子, 粒子有效半径为 $20 \mu\text{m}$, 冰云光学厚度为 2。仿真结果如图 1 所示。

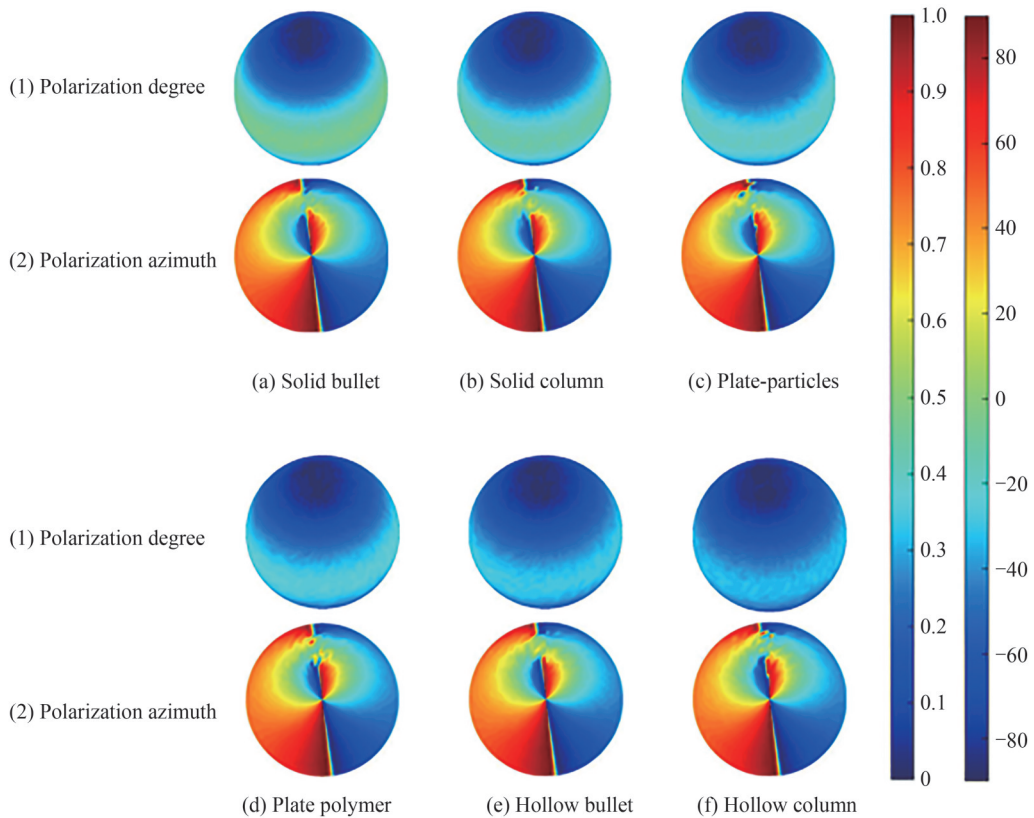


图 1 不同冰晶粒子下天空偏振模式

Fig.1 Simulation diagram of sky polarization mode under different ice crystal particles

图1显示了不同冰晶粒子对最大偏振度的影响较大,各冰晶粒子最大偏振度分别为0.453 2、0.425 5、0.391 9、0.365 6、0.341 2、0.308 8,单个冰晶粒子偏振度沿太阳子午线从0先增大到最大偏振度后又逐渐减小。这是由于沿太阳子午线观察偏振度时,天空中的散射角度会发生变化,在太阳所在位置,散射角度较小,偏振度相对较低;而在太阳天顶方向,散射角接近 90° ,此时偏振度最大。随着观测角度沿太阳子午线继续变化,散射角度会逐渐减小,偏振度也会随之减小。

图1中不同冰晶粒子对偏振方位角的影响较小,偏振方位角分布变化相对稳定且沿太阳子午线呈 ∞ 分布。

2.1 不同冰晶粒子随观测高度角的变化对冰云大气偏振模式的影响

针对不同冰晶粒子模型,仿真分析了板状/板状聚合物、空心/实心柱状和空心/实心子弹状6种不同冰晶粒子模型下偏振模式随观测高度角的变化,仿真结果如图2和图3所示。

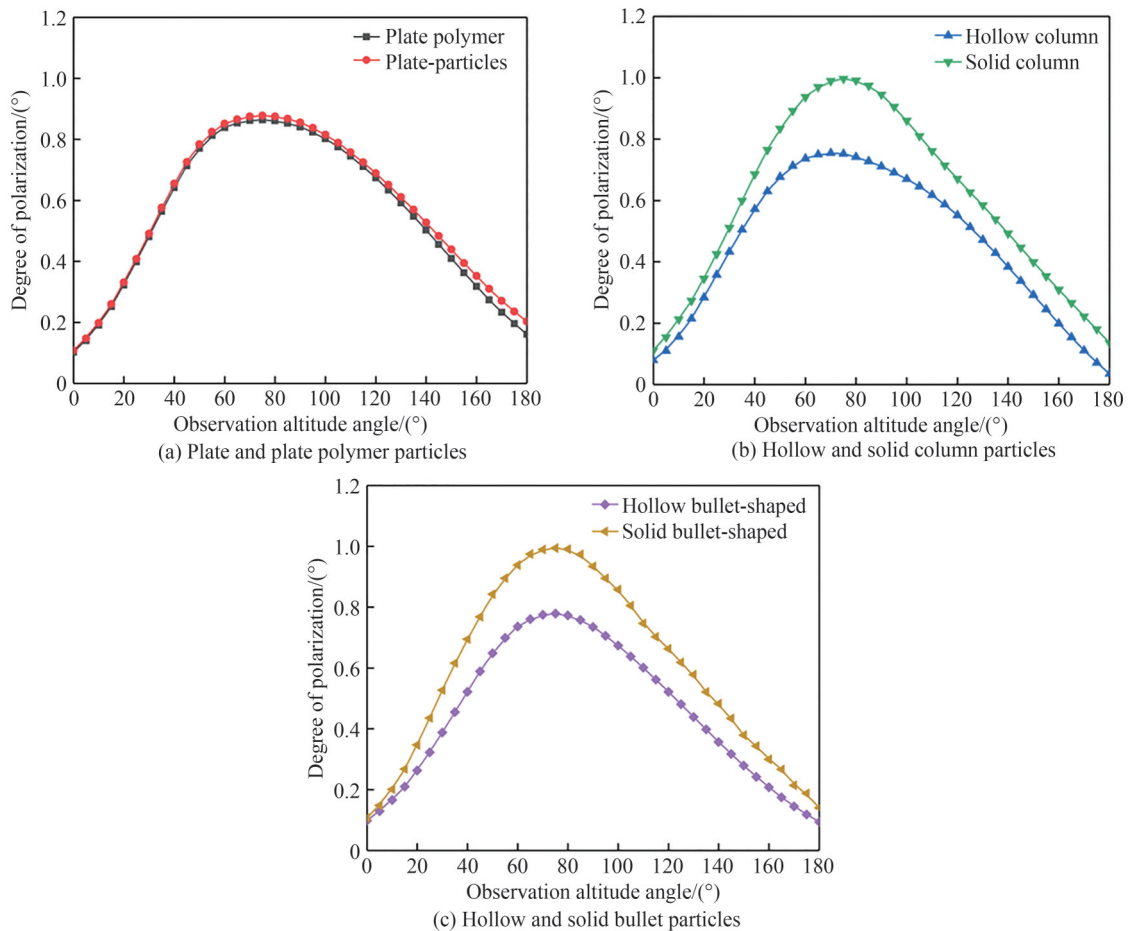


图2 不同冰晶粒子模型下冰云大气偏振度随观测高度角的变化

Fig.2 The degree of polarization of ice cloud with the observation altitude angle under different ice crystal particle models

图2显示了不同冰晶粒子模型下偏振度随观测高度角的变化关系。由图可知,不同冰晶粒子偏振度随观测高度角的增加而逐渐增大,达到峰值后又逐渐减小。最大偏振度值均在观测高度角为 80° 左右时达到最大。由图2(a)可知,板状和板状聚合物粒子随观测高度角变化的最大偏振度值分别为0.863 2、0.884 7,且随着观测高度角的增加,板状聚合物粒子的偏振度始终大于板状粒子的偏振度,这是由于相较于板状粒子,板状聚合物粒子通常具有更大的尺寸分布和更复杂的形状,这使得光线在射入粒子时发生多次散射、反射和折射并产生较大的相位差,导致更强的偏振效应,进而产生较大的偏振度。不同冰晶粒子的偏振度 P 的变化规律可采用与偏振效应对应角度 δ 的关系 $P = \tan^2 \delta$ 进行描述。针对图2(b),(c),实心柱状和空心柱状粒子、实心子弹状和空心子弹状粒子偏振度变化情况解释如下,粒子随观测高度角变化的最大偏振度值分别为0.994 7、0.755 3、0.987 3、0.776 2,且随着观测高度角的增加,实心柱状/实心子弹状粒子的偏振度始终

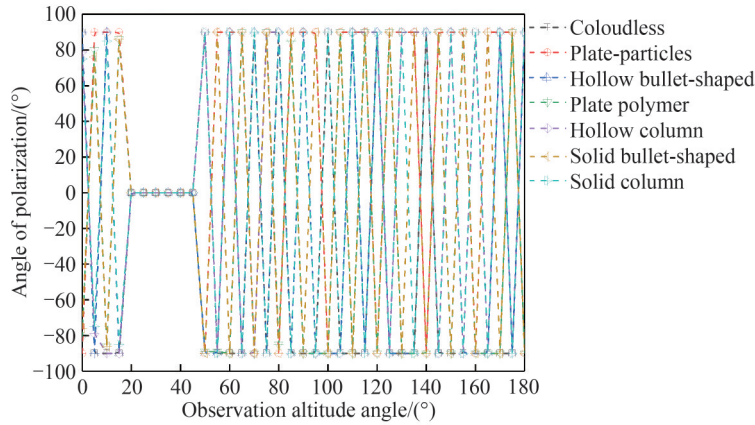


图3 不同冰晶粒子模型下冰云大气偏振方位角随观测高度角的变化

Fig.3 The angle of polarization of ice cloud with the observation altitude angle under different ice crystal particle models

大于空心柱状/空心子弹状粒子的偏振度,这是由于实心柱状/实心子弹状粒子其内部是实心的,粒子内部介质与光线接触面积比空心粒子相对较大,导致散射、反射和折射过程的相位差较大,偏振效应相对较强,因此偏振度较大。

图3显示了不同冰晶粒子模型下偏振方位角随观测高度角的变化。由图可知,偏振方位角的分布较为稳定,观测高度角 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内的偏振方位角为 0° ,其他观测角度对应偏振方位角沿 $\pm 90^{\circ}$ 分布。

由图2可知,观测高度角远离太阳位置处,单个冰晶粒子偏振度的变化明显,且在此位置处不同冰晶粒子偏振度区分较明显;由图3可知,观测高度角远离太阳位置处,各冰晶粒子偏振方位角均呈 $\pm 90^{\circ}$ 分布,规律稳定且明显。虑及测试过程中实际环境对于偏振模式的影响,保持稳定且明显的规律变化,故后续仿真选择观测高度角应远离太阳位置处,即 $\varphi=150^{\circ}$ 。

2.2 有效半径和冰水含量对冰云大气偏振度的影响

根据中国东北地区冰云分布特性^[20-21],选取空间中随机取向的板状冰晶粒子建立冰云模型,设定冰云光学厚度为2,有效半径分别为5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 μm ,冰水含量分别为0.001、0.005、0.010、0.015、0.020 g/cm^3 时,仿真分析冰云大气偏振度随有效半径在不同冰水含量下的变化规律,结果如图4所示。

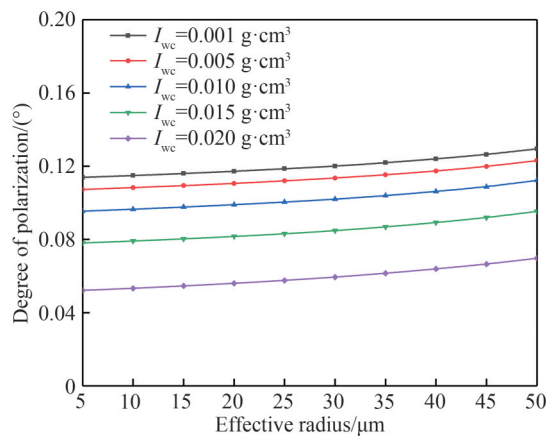


图4 不同有效半径和冰水含量时冰云大气偏振度的变化

Fig.4 Variations degree of polarization of ice clouds at different effective radius and ice water contents

冰云大气偏振度在冰水含量 $0.001\sim 0.0020\text{ g}/\text{cm}^3$ 范围内随有效半径增加而增大,最大增加率分别为14.65%、15.59%、18.94%、23.66%、36.02%,偏振度平均增加率为21.77%,增加率变化明显,这是由于当有效半径较小时,光学厚度为2的云层中光线与粒子的相对大小较为接近,散射、反射和折射光线对偏振效应

的影响相对较弱,而随着有效半径增大,冰晶的表面积和尺寸也随之变大,较大的冰晶表面积和尺寸使得光线在冰晶内部的散射、反射和折射增多,从而导致相位差的增大,产生更强的偏振效应,因此偏振度值也会随之增大,说明冰水含量对冰云大气偏振度的影响随有效半径增加较敏感;冰云大气偏振度在有效半径5~50 μm 范围内随冰水含量增加而减小,最大减小率分别为4.94%、8.77%、15.15%、26.89%,偏振度平均减小率为13.19%,减小率变化不明显,这是由于随着冰水含量的增多,冰晶的数量和密度增加,冰晶之间的相互作用增强,云层对光波的吸收增强,导致偏振度减小,说明有效半径对冰云大气偏振度的影响随冰水含量增加不敏感。

2.3 光学厚度和冰水含量对冰云大气偏振度的影响

根据大气科学相关研究^[22-23],光学厚度 τ 定义了三类冰云:薄冰云($\tau < 1$)、中等厚度冰云($1 < \tau < 5$)和厚冰云($\tau > 5$)。

2.3.1 薄、中冰云光学厚度和冰水含量对冰云大气偏振度的影响

冰云有效半径为20 μm ,光学厚度分别为0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5,冰水含量分别为0.001、0.005、0.010、0.015、0.020 g/cm^3 时,仿真分析冰云大气偏振度随薄、中冰云光学厚度在不同冰水含量下的变化规律,结果如图5示。

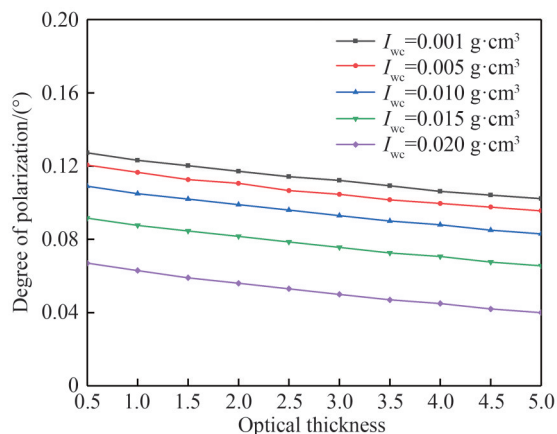


图5 不同冰水含量时冰云大气偏振度随薄、中光学厚度的变化

Fig.5 Variations degree of polarization of ice cloud with thin and medium optical thickness at different ice water contents

冰云大气偏振度在冰水含量0.001~0.002 g/cm^3 范围内随光学厚度的增加而减小,最大减小率分别为14.32%、15.85%、17.85%、24.55%、35.92%,偏振度平均减小率为21.10%,减小率变化明显,这是由于当光学厚度增加时,光线在冰云大气内部的散射、反射和折射次数增多,从而产生更多的相位差,进而导致光线的相位差差异增大,使得光线的偏振性质不稳定,偏振效应减弱,从而偏振度减小,说明冰水含量对冰云大气偏振度的影响随光学厚度变化明显;冰云大气偏振度在光学厚度0.5~5范围内随冰水含量的增加而减小,最大减小率分别为4.89%、8.54%、15.75%、27.11%,偏振度平均减小率为14.07%,减小率变化不明显,这是由于随着冰水含量的增多,冰云层中冰晶粒子的密度增加,光波与冰云层之间的相互作用增强,导致偏振效应减弱,偏振度减小,说明光学厚度对冰云大气偏振度的影响随冰水含量变化不敏感。

2.3.2 厚冰云光学厚度和冰水含量对冰云大气偏振度的影响

冰云有效半径为20 μm ,光学厚度分别为5、10、15、20、25、30、35、40、45、50,冰水含量分别为0.001、0.005、0.010、0.015、0.020 g/cm^3 时,仿真分析冰云大气偏振度随厚冰云光学厚度在不同冰水含量下的变化规律,结果如图6示。

冰云大气偏振度随高光学厚度和冰水含量的增加而减小,在光学厚度5~25时,不同冰水含量下冰云大气偏振度取得的最大减小率分别为62.64%、64.51%、66.27%、65.72%、59.64%,偏振度平均减小率为63.76%,冰云大气偏振度在光学厚度从5增加至25时减小明显;在光学厚度25~50时,不同冰水含量下冰云大气偏振度取得的最大减小率分别为55.24%、55.64%、52.59%、48.20%、44.74%,偏振度平均减小率为

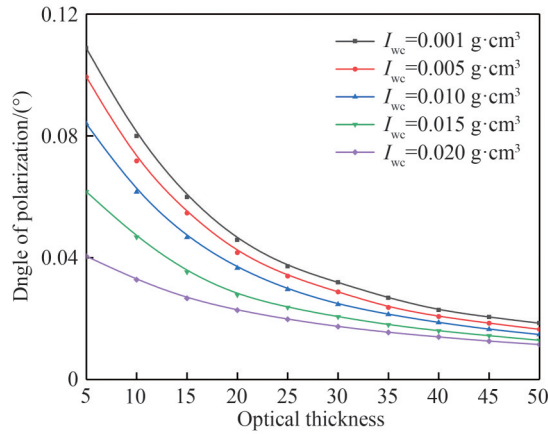


图6 不同冰水含量时冰云大气偏振度随厚光学厚度的变化

Fig.6 Variations degree of polarization of ice cloud with thick optical thickness at different ice water contents

52.67%,冰云大气偏振度在光学厚度从25增加至50时减小较为平缓;不同冰水含量下冰云大气最小偏振度在光学厚度为50时取得,其平均值0.0165,最小值平均偏差率为0.24%。表明在高光学厚度下冰水含量对偏振度的影响较小,且偏振度随光学厚度每隔5增加而逐渐减小并在光学厚度为50时趋向一个稳定的值,这是由于随着光学厚度的增加,光线在介质中的传播路径更长,使得光线的能量被更加均匀地分布在整个冰云层中,当光学厚度增加到一定值时,光线的传播路径和能量分布逐渐趋于稳定状态,从而导致冰云大气偏振度逐渐趋于一个稳定的值。

3 测试结果与分析

本文利用课题组搭建的图像式测试系统^[24],对实际大连地区冰云大气进行天空偏振模式测试。图像式测试系统由线偏振片、连接套筒、感光镜头、CMOS相机和三角架构成,结构如图7所示。



图7 图像式测试系统结构示意图

Fig.7 Framework of image measuring system

3.1 测试原理

基于Stokes矢量法进行天空偏振光检测,检测到的总光强 $I(\psi)$ 为

$$I(\psi) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\psi + U \sin 2\psi) \quad (8)$$

式中, ψ 为偏振片主透光轴与参考轴的夹角。选取的三个不同夹角 ψ 分别为 0° 、 45° 、 90° ,代入式(2)求解得到Stokes矢量

$$\begin{cases} I = I'(0^\circ) + I'(90^\circ) \\ Q = I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \\ U = 2I'(45^\circ) - I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \end{cases} \quad (9)$$

测试过程具体步骤为：

1) 选择较为空旷的地点组装测试系统, 感光镜头与地面垂直并水平校正, 使测试方位沿南北轴向, 调整好后即可进行测试。

2) 基于北京时间在各时刻下采集线偏振片分别为 0° 、 45° 和 90° 下的即时数据。

3) 通过 MATLAB 程序读取采集数据的光强值 $I'(0^\circ)$ 、 $I'(45^\circ)$ 和 $I'(90^\circ)$, 代入式(9)和式(3)求解得出偏振度数值。

4) 最后以伪彩色图的颜色表示对应的偏振度的数值大小, 直观反映天空的偏振状态。

3.2 测试结果与分析

经过大量实验, 选择大连理工大学 ($38^\circ 52' N$, $121^\circ 30' E$) 以下 10 组 13:00 的数据来说明测试结果, 结果如图 8 所示。冰云大气相关参数由国家气象科学数据中心风云 4A 卫星反演获得, 相关数据如光学厚度、有效半径和冰水含量如表 1 所示。

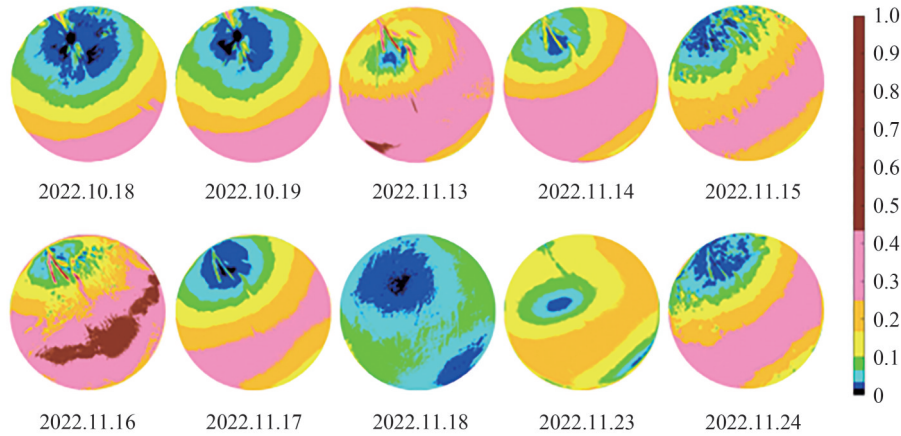


图 8 实际冰云大气偏振度测试图

Fig.8 Actual atmospheric polarization test diagram of the ice cloud

表 1 测试时间及冰云大气相关参数

Table 1 Test time and atmospheric-related parameters of the ice cloud

Time	τ	$R/\mu\text{m}$	$I_{\text{WC}}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$P_{\varphi=150^\circ}$	P_{max}	P_{min}
2022.10.18	9	18	0.010	0.114 5	0.387 5	0.000 5
2022.10.19	11	15	0.011	0.091 4	0.362 9	0.001 1
2022.11.13	5	28	0.006	0.138	0.421 6	0.012 2
2022.11.14	8	24	0.010	0.125 2	0.398 8	0.002 1
2022.11.15	12	12	0.011	0.086 1	0.375 4	0.004 6
2022.11.16	2	35	0.001	0.139 3	0.451 9	0.011 3
2022.11.17	15	10	0.013	0.079 6	0.292 1	0.001 4
2022.11.18	22	5	0.018	0.043 8	0.087 4	0.001 1
2022.11.23	20	8	0.016	0.064 1	0.210 5	0.021 3
2022.11.24	7	26	0.008	0.100 2	0.413 6	0.001 9

由图 8 可知, 不同日期同一时刻下偏振度的变化规律基本一致, 沿太阳子午线先增大后减小, 在太阳位置处最小, 与太阳角距为 90° 时达到最大, 总体上偏振度分布较为稳定, 但太阳位置处偏振度分布较为混乱, 这是由于太阳位置处测试仪器过曝光导致无法准确识别偏振度的变化, 偏振度最小值不全为 0, 11 月 18 日

由于云量占比高达90%以上,导致偏振度分布规律不明显。

图9为实际冰云大气偏振度随光学厚度、有效半径和冰水含量的变化规律。图9(a)显示了在光学厚度为2时 P_{\max} 和 $P_{\varphi=150^\circ}$ 分别取得最大值0.4519、0.1393,在光学厚度为22时分别取得最小值0.0874、0.0438;在光学厚度为20时 P_{\min} 取得最大值0.0213,在光学厚度为9时取得最小值0.0005。图9(b)显示了在有效半径为5时 P_{\max} 和 $P_{\varphi=150^\circ}$ 分别取得最小值0.0874、0.0438,在有效半径为35时分别取得最大值0.4519、0.1393;在有效半径为18时 P_{\min} 取得最小值0.0005,在有效半径为8时取得最大值0.0213。图9(c)显示了在冰水含量为0.001时 P_{\max} 和 $P_{\varphi=150^\circ}$ 分别取得最大值0.4519、0.1393,在冰水含量为0.018时分别取得最小值0.0874、0.0438;在冰水含量为0.016时 P_{\min} 取得最大值0.0213,在冰水含量为0.010时取得最小值0.0005。

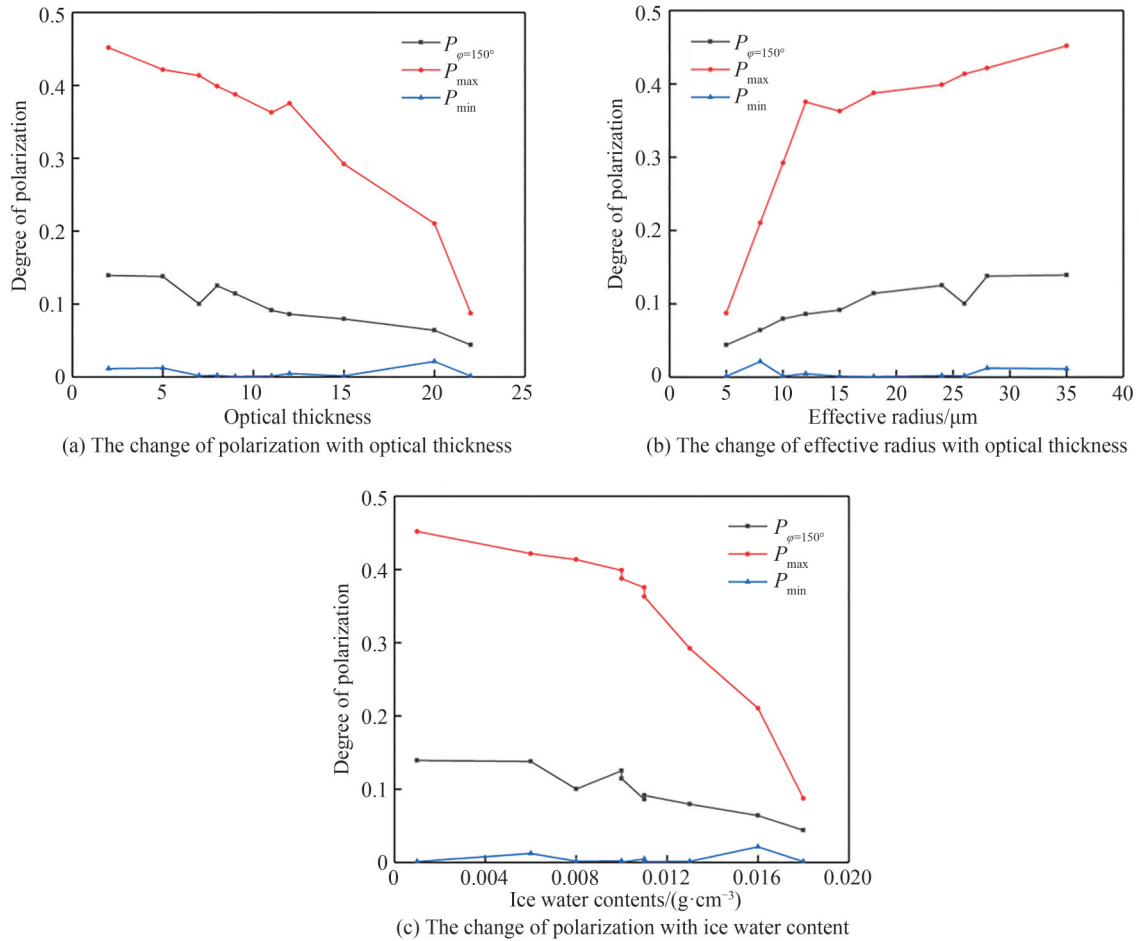


图9 实际冰云大气偏振度变化规律

Fig.9 Actual atmospheric polarization test diagram of the ice cloud

综上所述, P_{\max} 和 $P_{\varphi=150^\circ}$ 随光学厚度和冰水含量的增加偏振度减小趋势明显,随有效半径增加偏振度增加趋势明显,这与仿真结果基本一致;而 P_{\min} 由于太阳位置处仪器过曝光导致偏振度分布规律并不明显,但这并不影响偏振度的总体分布规律。

4 结论

本文在矢量辐射传输方程的基础上,建立了基于蒙特卡罗方法的适量辐射传输模型,并利用libRadtran比较了不同冰晶粒子模型下冰云大气的偏振模式差异,随后在不同板状粒子模型下,进一步模拟计算了光学厚度、有效半径以及冰水含量对冰云大气偏振度的影响,最后实际测试了大连地区实际冰云大气环境下冰云大气相关参数对偏振度的影响。结果表明:1)冰晶粒子形状对偏振度的影响较大,对偏振方位角影响较小。其中板状聚合物粒子偏振度大于板状粒子,实心柱状/子弹状粒子大于空心柱状/子弹状粒子;2)光

学厚度和冰水含量增加导致偏振度减小,而有效半径的增大导致偏振度增大;3)实际测试发现强光和高占比的云量使得偏振度的分布规律更加复杂,但偏振度整体变化规律与仿真一致。本研究有助于深入了解冰云大气对偏振模式的影响,并对偏振导航的实际工程应用提供了一定的理论支撑。

参考文献

- [1] WALLACE J M, HOBBS P V. Atmospheric science: an introductory survey [M]. 2nd ed. Academic Press, 2006.
- [2] LIOU K N, YANG P. Light scattering by ice crystals: fundamentals and applications [M]. Cambridge University Press, 2016.
- [3] 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.
- [4] BAUM B A, YANG P, NASIRI S L, et al. Bulk scattering properties for the remote sensing of ice clouds. Part 3: high resolution spectral models from 100 to 3 250 cm^{-1} [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007, 46: 423-434.
- [5] KEY J R, YANG P, BAUM B A, et al. Parameterization of shortwave ice cloud optical properties for various particle habits [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(D13): 1-10.
- [6] HEINSON Y W, MAUGHAN J B, DING J C, et al. Q-space analysis of light scattering by ice crystals [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2016, 185: 86-94.
- [7] LIU C, YANG P, MINNIS P, et al. A two-habit model for the microphysical and optical properties of ice clouds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(24): 13719-13737.
- [8] LI Shu. Analysis of cloud optical characteristics and main parameter inversion of satellite polarization remote sensing [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
李树. 卫星偏振遥感的云光学特性分析及主要参数反演研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [9] HUSLETU, BAO Yuhai, XU Jian, et al. Radiative characteristics of cirrus clouds based on hexagonal and spherical ice crystal models [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(5): 1165-1168.
胡斯勒图, 包玉海, 许健, 等. 基于六角形和球形冰晶模型的卷云辐射特征研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(5): 1165-1168.
- [10] YU Jihua. Study on the light scattering and radiation transfer characteristics of water clouds and ice clouds [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 55-64.
于记华. 水云和冰云的光散射与辐射传输特性的研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 55-64.
- [11] GUO Leili, WANG Mingjun. Polarized radiative transfer characteristics of ice cloud atmospheres at large zenith angles [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1101002.
郭镭力, 王明军. 大天顶角入射下冰云大气偏振辐射传输特性 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1101002.
- [12] REN Shenhe, GAO Ming, LI Yan, et al. Characteristics of atmospheric reflectance of ice clouds at three laser wavelengths in quasi-spherical mode [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(10): 1300-1306.
任神河, 高明, 李艳, 等. 准球面模式下三种激光波长冰云大气反射率特性 [J]. 激光与红外, 2021, 51(10): 1300-1306.
- [13] CHEN Ke, DONG Shanbin, LI Yingxue, et al. Radiation scattering characteristics of terahertz ice clouds and design of detection parameters [J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26(11): 2204-2218.
陈柯, 董杉彬, 李迎雪, 等. 太赫兹冰云辐射散射特性研究和探测参数设计 [J]. 遥感学报, 2022, 26(11): 2204-2218.
- [14] WANG Meihua. Mid-latitude ice cloud physics and radiation effect research [D]. Lanzhou: Lanzhou university, 2022.
汪美华. 中纬度地区冰云物理特性及辐射效应的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022.
- [15] MAYER B. Radiative transfer in the cloudy atmosphere [J]. European Physical Journal Conferences, 2009, (1): 75-99.
- [16] EMDE C, BURAS-SCHNELL R, KYLLING A, et al. The libradtran software package for radiative transfer calculations [J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(5): 1647-1672.
- [17] LI Jiao, DUAN Minzheng, QIN Jun. A coupled successive order scattering vector radiative transfer model for ocean atmosphere system [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(2): 181-188.
李姣, 段民征, 覃军. 基于逐次散射法的海洋—大气矢量辐射传输模式 [J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(2): 181-188.
- [18] YI B, YANG P, LIU Q, et al. Improvements on the ice cloud modeling capabilities of the community radiative transfer model [J]. Journal of Geophysical Research, 2016, 121(22): 1-14.
- [19] WANG C, 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.
- [20] LIU Shibo, ZHOU Lu, HU Guoquan, et al. Characteristics of ice cloud particle shape and their effects on cloud microphysical properties in autumn over northeastern China [J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(1): 1-13.
刘世波, 周璐, 胡国权, 等. 东北地区秋季冰云粒子形状特征及其对云微物理特性的影响 [J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
- [21] XIAO Haixia. Study on the shape categories and growth and evolution mechanism of ice crystals in clouds in north China

- [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020: 3-20.
肖海霞. 华北地区云中冰晶粒子的形状类别和增长演变机制研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020: 3-20.
- [22] ZHOU Xixun, ZHANG Hua, JING Xianwen. Distribution and variation trends of cloud amount and cloud optical thickness over China[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11(1): 1-13.
周喜讯, 张华, 荆现文. 中国地区云量和云光学厚度的分布与变化趋势[J]. *大气与环境光学学报*, 2016, 11(1): 1-13.
- [23] FAN Sirui, WANG Weijia, LIN Dan. Temporal and spatial distribution of different cloud types in China based on ISCCP cloud data[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2020, 38(2): 213-225.
范思睿, 王维佳, 林丹. 基于ISCCP云资料的中国地区不同类型云的时空分布[J]. *干旱气象*, 2020, 38(2): 213-225.
- [24] CUI Yan, ZHAO Jinyong, ZHANG Xiguang, et al. A fully automatic image type sky polarized light test system: CN107131956A[P]. 2017-09-05.
崔岩, 赵金勇, 张西光, 等. 一种全自动图像式天空偏振光测试系统: CN107131956A[P]. 2017-09-05.

Atmospheric Polarization Properties under Ice Cloud Conditions

CUI Yan, LI Dexian, ZHOU Ye, CHEN Yuqian, SHANG Ziyi

(*State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: Many animals have the strange ability to sense the polarized light and navigate using the stable polarization mode in the sky, and the polarization navigation technology has been studied by mimicking the biological polarization navigation mechanism. As the information source of polarization navigation, the sky polarization mode lacks systematic research in the atmosphere of the ice cloud, which hinders the practical application of polarization navigation technology. To explore the influence of ice cloud atmospheric related parameters, such as ice crystal particle shape, effective radius, ice water content and optical thickness, on the sky polarization pattern. A vector transport model based on the Monte Carlo method, by the radiative transfer process of actual ice clouds. This paper analyzed the change law of atmospheric polarization mode of the ice cloud with different shapes with different observation height angles, the change law of atmospheric polarization of the ice cloud with different effective radii under different ice water content, the change law of atmospheric polarization of ice cloud with thickness and neutralization optical thickness under different ice water content. And through the image-type test system, the variation of sky polarization pattern with effective radius, optical thickness and ice water content in 10 sets of actual atmospheric conditions in Dalian University of Technology were tested. The results shown that the shape of ice crystal particles affects the polarization of the ice cloud and the azimuthal polarization of the ice cloud. The plate polymer particle polarization was greater than plate particles. Because the plate particles, plate polymer particles usually had larger size distribution and more complex shape, which made the light into the particle multiple scattering, reflection and refraction and larger phase difference, leading to a stronger polarization effect, and produced larger polarization. Solid column/bullet particles were larger than hollow column/bullet particles. Because the solid column/solid bullet particles inside were solid, the particle's internal medium and light contact area were larger than the hollow particles, resulting in the scattering, reflection and refraction of the phase difference. The polarization effect was relatively strong, so the polarization was larger. And the atmospheric polarization of the ice cloud increases with the effective radius. Because of the fact that when the effective radius was small. The relative size of the light in the clouds was relatively close to the particles. Scattering and refracted light had relatively weak effects on the polarization effect. While, as the effective radius increases, the surface area and size of the ice crystals were also becoming larger. The larger surface area and size of the ice crystals increase the scattering, reflection, and refraction of light inside the ice crystals. Thus leading to an increased phase difference, Producing stronger polarization effects. Therefore, the degree of polarization value will also increase. The atmospheric polarization of ice clouds decreases with increasing optical thickness and ice water content. After it gradually tended to a stable state. Because the increasing optical thickness, light rays travel through longer paths in the medium, so that the energy of the light is more evenly distributed throughout the ice cloud, when the optical thickness increases to a certain value. Light propagation path and energy distribution gradually tended to a steady

state. Thus, the atmospheric polarization of the ice cloud gradually tended to a stable value. The actual tests were conducted at the same time on different dates and it found that the polarization variation law of the actual ice cloud in the Dalian University of Technology was basically consistent with the simulation, which verified the reliability of the simulation model. The study in this paper provides theoretical support for the engineering application of polarization navigation under the actual ice cloud atmospheric conditions.

Key words: Atmospheric optics; Polarization mode; LibRadtran; Ice cloud; Atmospheric scattering

OCIS Codes: 010.1310; 010.1280; 010.1615; 010.2940