

全天空偏振模式及其影响因素初探

陈伟^{1,2}, 李延飞^{2,3}, 吴太夏⁴, 关桂霞⁵

1. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 北京大学 空间信息集成与3S工程应用北京市重点实验室, 北京 100871;

3. 北京大学 遥感与地理信息研究所, 北京 100871;

4. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100;

5. 首都师范大学 信息工程学院, 北京 100048

摘要: 太阳光入射与地表、大气相互作用, 会在天空中出现较为稳定的天空偏振模式图, 即以太阳为中心, 天空中的偏振信号呈现一定的规律分布。影响天空偏振模式图的强度及形态主要由地表反射性质、空气分子散射性质及气溶胶光学性质共同影响。本研究利用矢量辐射传输模型, 以海洋下垫面为例, 在获取沙尘非球形与煤烟非球形气溶胶单次散射性质的基础上, 模拟了不同气溶胶光学厚度情况下的全天空偏振模式图。结果表明, 天空以太阳入射方向为中心呈现一个较为稳定的天空偏振模式图。沙尘型散射气溶胶光学厚度的增大会减弱该模式图的强度, 而煤烟型吸收气溶胶光学厚度的增大会增大该模式图的强度。利用双模态(沙尘型与煤烟型混合)气溶胶模型, 系统分析不同气溶胶比例情况下的天空偏振模式图, 结果表明全天空偏振模式图的基本模态依旧存在, 但是其强度受气溶胶模型与光学厚度双重影响。因此在利用全天空偏振模式图进行气溶胶光学性质反演时需要注意气溶胶模态信息的选择。

关键词: 偏振, 偏振场, 气溶胶, 偏振模式图

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 陈伟, 李延飞, 吴太夏, 关桂霞. 2018. 全天空偏振模式及其影响因素初探. 遥感学报, 22(6): 989–995

Chen W, Li Y F, Wu T X and Guan G X. 2018. Preliminary research on sky polarization and influential factors. *Journal of Remote Sensing*, 22(6): 989–995 [DOI:10.11834/jrs.20187378]

1 引言

大气是人类赖以生存的重要地理环境, 是人类不可缺少的自然资源。地球辐射收支平衡由大气中的气溶胶、云、大气气体及地表反射辐射共同决定。气溶胶、云和大气气体会吸收和散射入射太阳光并且辐射长波红外(任通, 2011)。目前对大气气溶胶气候效应的模拟由于气溶胶性质反演的复杂多变性而仍处于高度不确定的状态。大气气溶胶是液体或固体微粒均匀分散在气体中形成的相对稳定的悬浮体系(Cheng 等, 2016)。气溶胶的粒子大小可以为几纳米到上百微米(尺度可以跨越5个数量级)。大气气溶胶有存在时间短, 空间分

布不均匀的特点, 且与大气辐射、云及其他大气成分有着复杂的相互作用。从起源来看, 气溶胶可以分为自然产生的气溶胶和人为产生的气溶胶。大气中气溶胶粒子的精确建模与反演, 不仅对气候建模有重要意义, 还对居民健康有重要影响(Guo 等, 2009)。

偏振遥感信息对于大气中的细颗粒物的形态、粒径及消光性质极为敏感, 这也为利用偏振遥感信息反演大气气溶胶光学性质, 乃至细颗粒物浓度提供了理论基础。由于大气散射具有强烈的偏振特性, 国内外针对气溶胶的偏振特性开展了一系列研究, 并于20世纪90年代相继提出了一系列的偏振传感器计划, 包括法国的POLDER

收稿日期: 2018-03-05; 预印本: 2018-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41701391); 国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA121806)

第一作者简介: 陈伟, 1987年生, 男, 副教授, 研究方向为偏振遥感及气溶胶环境遥感。E-mail: chenw@cumt.edu.cn

(POLarization and Directionality of Earth Reflectance) 和美国的EOSP (Earth Observing Scanning Polarimeter, 后改称为APS (Aerosol Polarimetry Sensor))。偏振信息的引入使得POLDER可以进一步反演气溶胶的复折射系数及形状(球形与非球形)(Breon 等, 2002)。因此, 利用全天空偏振信息对大气粒子信息进行反演成为研究热点之一。

陈伟等人(2013)利用矢量辐射传输模型对海洋上空气溶胶的偏振特性进行敏感性分析, 结果表明全天空偏振信息与海洋气溶胶的光学厚度与模态密切相关。吴太夏等人(2013)基于中国首次大气中性点偏振航飞数据表明, 利用大气偏振模式图及偏振中性点可以获取更多的地表信息。Li等人(2014)基于进一步采用全天空偏振角信息对气溶胶光学信息进行了全方面反演。Boesche等人(2006)则分析了气溶胶粒子性质对全天空偏振度的影响。Kreuter和Blumthaler(2013)通过实验发现, 全天空偏振成像更加有利于气溶胶性质的反演, 而Emde等人(2010)则通过Monte Carlo方法验证了该论点。此外Zhang等人(2016)利用PARASOL/POLDER中偏振信息精确地反演了气溶胶光学信息。

综上所述发现, 在大气中存在着一个较为稳定的天空偏振矢量场, 该矢量场主要是天空偏振模式图及大气偏振中性点区域性质综合而成。大气偏振矢量场的形成受到分子及气溶胶粒子的双重影响。空气分子对入射太阳光起着初始起偏作用, 形成了天空中偏振场的基本形态。气溶胶粒子则对全天空偏振场起着一定程度的扰动作用。

本文主要研究气溶胶粒子对全天空偏振模式的影响, 采用矢量辐射传输模型模拟的方法, 针对不同气溶胶类型的情况, 分析了不同气溶胶模式情况下全天空偏振模式图变化情况。

2 原理与方法

2.1 大气偏振原理

偏振光的描述有电矢分量方法、琼斯矢量方法、邦加球表示法以及斯托克斯(Stokes)矢量表示法。其中英国物理学家斯托克斯于1852年提出的斯托克斯参量, 由于其提供了描述偏振光的3个宏观可测参量, 从而成为最常选用的表征偏振光的形式, 即:

$$\begin{aligned} I &= \langle E_1 E_1^* + E_r E_r^* \rangle \\ Q &= \langle E_1 E_1^* - E_r E_r^* \rangle \\ U &= \langle E_1 E_r^* + E_r E_1^* \rangle \\ V &= -i \langle E_1 E_r^* - E_r E_1^* \rangle \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示时间平均, $*$ 表示复共扼, I 表示光强, Q 表示水平方向的线偏振光分量, U 表示45°方向的线偏振光分量, V 表示圆偏振光分量(一般可以忽略不计)。遥感上一般采用反射率的方式表示斯托克斯参量, 即:

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{\pi I r_0^2}{F_0 \cos \theta_s} \\ R_p &= \sqrt{R_Q^2 + R_U^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, R_1 、 R_p 分别为反射率与偏振反射率, r_0 是日地距离因子, θ_s 是太阳天顶角, F_0 则是指太阳常数。

2.2 矢量辐射传输模型

在进行全天空偏振场计算的过程中, 主要依靠的是矢量辐射传输模型。本文采用基于逐次散射方法的矢量辐射传输模型SOSRT (Successive Orders of Scattering Radiative Transfer model), 通过设定地表反射与偏振特性, 大气气溶胶特性来进行全天空偏振场效应的研究。SOSRT是由美国NASA和LOA-PHOTONS (CNRS)联合建立的全球气溶胶观测网(AERONET)进行气溶胶光学性质反演的标准辐射传输模型, 可模拟球形气溶胶、非球形气溶胶的TOA及BOA偏振、光强信息, 已经在AERONET产品中得到广泛应用(Dubovik 等, 2006, 2011)。在SOSRT中, 基本原理为假设电磁波在平面平行大气中的辐射传输可以表达为一个辐射传输方程:

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial \mathbf{I}(\tau, \mu, \phi)}{\partial \tau} &= \mathbf{I}(\tau, \mu, \phi) - \frac{\omega_0}{4\pi} \\ &\int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} \mathbf{P}(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') \mathbf{I}(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' - \\ &\frac{\omega_0}{4\pi} e^{\left(\frac{\tau}{\mu}\right)} \mathbf{P}(\tau, \mu, \phi, \mu_s, \phi_s) \mathbf{E}_s \end{aligned} \quad (3)$$

式中, τ 为大气光学厚度, ω_0 为大气单次散射反照率, μ 为天顶角的方向余弦, ϕ 为方位角, E_s 为太阳辐射照度, $\mathbf{I}$ 为光的斯托克斯矢量表达。其中相函数 $\mathbf{P}(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi')$ 可以进一步表达为

$$\mathbf{P}(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') = \mathbf{L}(-\chi) \mathbf{P}(\cos \Theta) \mathbf{L}(\chi') \quad (4)$$

式中, $P(\cos\Theta)$ 为大气相函数, Θ 为散射角, $L(-\chi)$ 是旋转矩阵可以表示为

$$L(-\chi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\chi & \sin 2\chi & 0 \\ 0 & -\sin 2\chi & \cos 2\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

求解辐射传输方程是一个求解非线性方程的过程。目前一般采用的方法是采用对方位角进行傅里叶展开的方法, 假设入射为太阳辐射且无偏振, 则有:

$$\begin{bmatrix} I(\tau, \mu, \phi) \\ Q(\tau, \mu, \phi) \\ U(\tau, \mu, \phi) \\ V(\tau, \mu, \phi) \end{bmatrix} = \sum_{m=0}^{2M} \begin{bmatrix} I_m \cos m(\phi - \phi_0) \\ Q_m \cos m(\phi - \phi_0) \\ U_m \cos m(\phi - \phi_0) \\ V_m \cos m(\phi - \phi_0) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, 散射矩阵可以表达为

$$\mathbf{M} = \sum_{m=0}^{2M-1} (\mathbf{M}_m^c \cos m(\phi - \phi_0) + \mathbf{M}_m^s \sin m(\phi - \phi_0)) \quad (7)$$

式中, $\mathbf{M}_m^c$ 与 $\mathbf{M}_m^s$ 分别表示余弦及正弦式, 对于每一个傅里叶成分均有一个辐射传输方程, 在此基础上可以求角矢量辐射传输方程的数值解。

2.3 气溶胶单次散射性质

实际上, 大气中的颗粒(分子和气溶胶)与光的作用是一个多次散射过程, 而多次散射过程又是由无数的单次散射过程叠加而成。对于多次散射的计算需要在已知单次散射性质的基础上进行数值运算。也就是说, 本文所研究的单次散射内容是研究多次散射的基础, 是进行多次散射计算及辐射传输计算的输入的基础。

相较于空气分子, 气溶胶粒子尺度跨度达5个量级, 相当部分的气溶胶粒子的尺度要与入射波波长相当甚至大于入射波波长, 在假设气溶胶为

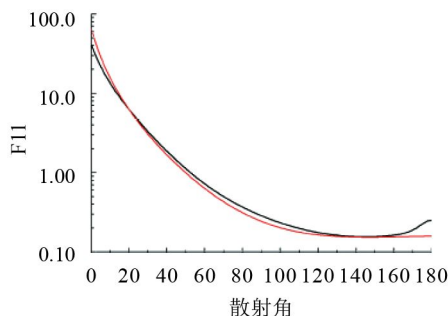
球形的条件下, 一般采用MIE散射理论求解气溶胶的散射特征。在某些情况下, 非球形气溶胶粒子的影响较大(如大气气溶胶中占主导成分为沙尘型)时, 单纯采用MIE散射理论对大气气溶胶的单次散射特征进行模拟则会有较大的误差。由于沙尘型气溶胶主要为机械作用所产生, 其颗粒较大(一般为1 μm 以上), 其形状一般无法用规则球形描述。国际上针对沙尘型气溶胶的反演采用球形粒子比的方式来近似, 以假定气溶胶为球形与非球形两种粒子组成, 非球形粒子为不同长轴短轴比的椭圆形气溶胶平均而成。针对非球形气溶胶粒子, 采用TMatrix及几何光学方法计算了非球形粒子的单次散射特性。主要模拟了非球形的沙尘型(粗粒子散射型)及煤烟型(细粒子吸收型)为主导及混合气溶胶的性质, 两种气溶胶模型的性质如表1所示。气溶胶谱分布均为对数正态分布:

$$\frac{dN}{dr} = \frac{A}{\sqrt{2\pi r \ln \sigma}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln r - \ln r_m}{\ln \sigma} \right)^2} \quad (8)$$

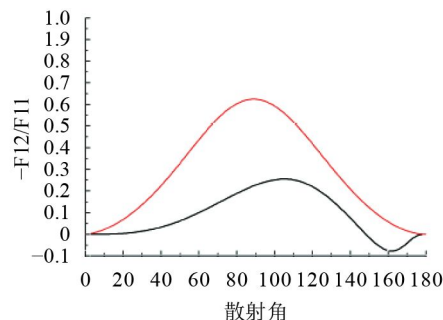
式中, N 为粒子数, r 为粒子半径, σ 为标准差, r_m 为中位数半径, A 为常数。两种典型的气溶胶的相函数如图1所示。可以看出, 粗粒子与细粒子气溶胶的相函数有着较大的差异, 尤其是偏振相函数。

表1 沙尘型及煤烟型气溶胶参数设置
Table 1 Parameters of dust and soot aerosol

参数	沙尘型	煤烟型
是否非球形	是	是
复折射系数	1.53+0.008i	1.69+0.44
谱分布函数	对数正态	对数正态
中位数半径	0.5 μm	0.0118 μm
标准差	2.99	2.00



(a) 相函数 F11
(a) Phase function F11



(b) 相函数 -F12/F11
(b) Phase function -F12/F11

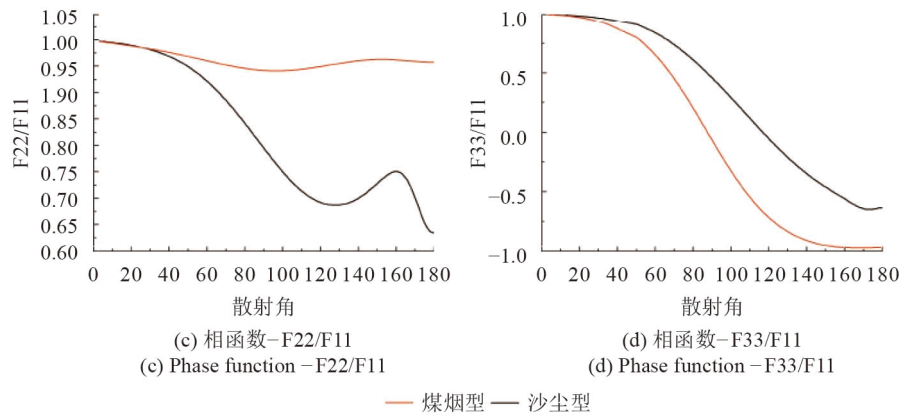


图1 两种气溶胶类型的相函数
Fig. 1 Phase functions of two typical aerosol types

2.4 下垫面性质

以海洋下垫面为例,研究了不同气溶胶类型情况下全天空偏振模式图。在开阔海洋地区海洋下垫面基本可以被认为是一均一的地表,其反射特征可表示为3个部分:水体的散射、水面浮沫反射及耀斑反射。在实际研究中,水体的散射(离水散射)可以被认为是无偏振的,主要由海洋中色素浓度及盐度等条件引起的。水面浮沫反射与耀斑反射是主要的偏振来源,主要由海浪引起。在本节中,海洋的偏振效应被认为是水面波浪引起的破碎单元镜面反射所造成的。

3 结果与分析

为了分析在不同气溶胶模型与气溶胶光学厚度情况下全天空偏振分布,采用SOSRT辐射传输模型对海洋全天空偏振信号进行全天空偏振性质模拟,气溶胶模态性质如表1所示。

3.1 沙尘型气溶胶全天空偏振模式图

假定气溶胶为散射型沙尘气溶胶,通过矢量辐射传输模型SOSRT可以模拟出在4种不同气溶胶扰动情况下(AOD=0.01, 0.1, 0.3, 0.5)的全天空偏振模式图,结果如图2所示。图2中极径表示天顶角,极角表示方位角,太阳入射天顶角为 30° ,方位角为 180° 。可以看出,随着气溶胶光学厚度增加,全天空偏振度逐渐由最大值50%降低至30%以内。当气溶胶光学厚度小于0.01时,天空偏振场最大偏振度约为50%,主要出现在镜面反射方向及大观测天顶角的情况下。随着气溶胶光学厚度增加至0.5以上时,全天空偏振度均降至30%以内。此

时,虽然全天空偏振模式图的基本形式还在,但是已经无法有效地区分出大气偏振中性点区域。总的来说,在太阳入射方向(热点方向),偏振度最低,在镜面反射方向偏振度较大;在大观测天顶角的部分,偏振度较大。随着沙尘型气溶胶的增大,全天空偏振度逐渐减少,即削弱全天空偏振模式图的强度。

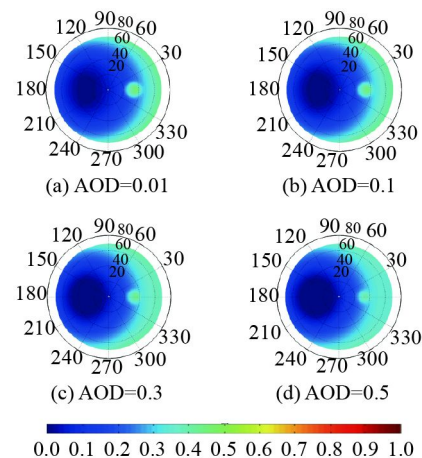


图2 不同气溶胶光学厚度情况下沙尘气溶胶全天空偏振度
Fig. 2 Sky degree of polarization under different dust aerosol optical depth

3.2 煤烟型气溶胶全天空偏振模式图

假定气溶胶为吸收型煤烟气溶胶,通过矢量辐射传输模型SOSRT可以模拟出在4种不同气溶胶扰动情况下(AOD=0.01, 0.1, 0.3, 0.5)的全天空偏振模式图,结果如图3所示。可以看出,在煤烟型气溶胶的情况下,全天空也呈现出类似沙尘型气溶胶的偏振分布模式图。在太阳入射角方向,偏振度最低,接近于0;在镜面反射方向及前向大观测天顶角的方向,偏振度极大。然而与沙尘型气溶

胶不同的是,随着AOD的增大,煤烟型气溶胶情况下的全天空偏振度并没有随之减少,而是不断增大。从图3可以看出,随着AOD的增大,镜面反射方向的偏振度由40%左右增至50%以上,而大观测天顶角方向的偏振度则增大至70%以上。由此得出,如果气溶胶类型是吸收型的小粒子,气溶胶光学厚度的增大会使得全天空偏振度增大,增强全天空偏振模式图的强度。这一特性与散射型大气气溶胶粒子的性质完全不同。

3.3 双模态气溶胶全天空偏振模式图

在实际中,气溶胶的单模态分布相对较为少见,一般情况下用双模态(粗模态与细模态相结合)来表征气溶胶的谱分布。从图2、图3可发现,粗模态的散射气溶胶与细模态吸收型气溶胶不仅在散射相函数上不同,在全天空偏振分布模式图上也有不同的作用。

图4表示在煤烟型与沙尘气溶胶不同混合比例情况下的全天空偏振模式图。以总气溶胶光学厚度为0.2为例,沙尘气溶胶所占光学厚度从0.2以

0.02的步长降低至0.02(从左上第一幅至最后一幅)。可以看出,在双模态混合气溶胶的情况下,全天空偏振模式图的基本模式并没有发生变化,还是在太阳入射方向的偏振度最低,而镜面反射方向及前向大观测天顶角方向天空偏振度较大。

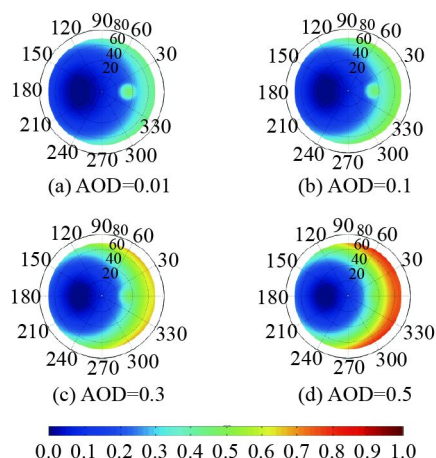


图3 不同气溶胶光学厚度情况下煤烟气溶胶全天空偏振度
Fig. 3 Sky degree of polarization under different soot aerosol optical depth

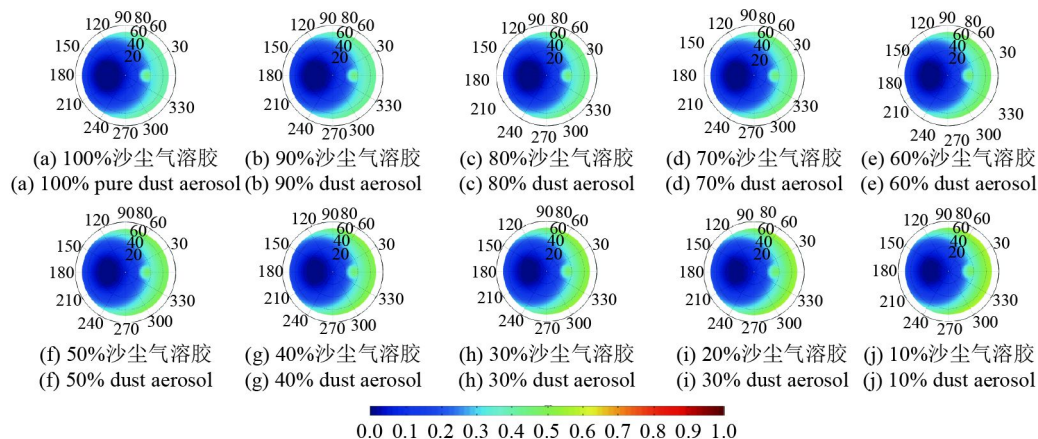


图4 煤烟与沙尘双模态混合气溶胶全天空偏振模式图(AOD=0.2)

Fig. 4 Sky degree of polarization under different dust and soot aerosol optical depth(AOD=0.2)

然而,随着不同气溶胶模式组分的变化,全天空偏振模式图的强度有明显的变化。随着煤烟气溶胶所占比例的增大,全天空偏振度的强度在增大,而随着沙尘气溶胶所占的比例增大,全天空偏振度的强度在减少。而总光学厚度在这10种模拟状态中是一致的,均为0.2。由此得出,气溶胶模式信息会改变全天空偏振度的强度,而不会改变其基本形态。在利用全天空偏振模式图进行气溶胶信息反演时,需要注意气溶胶模式信息。

4 结 论

本研究主要探讨了全天空偏振模式图的形态与强度,通过矢量辐射传输模型结合不同气溶胶粒子的单次散射特征综合分析了海洋下垫面情况下的全天空偏振模式图的强度,研究了不同气溶胶模型对于全天空偏振模式图的影响。

本文的研究结果表明空偏振模式图是大气分子与气溶胶粒子对入射太阳光综合作用的结果。

其中, 空气分子散射形成了天空偏振的基本模态, 而气溶胶粒子对该场的形态与强度进行扰动。本文利用矢量辐射传输模型, 分析了两种气溶胶模态(沙尘型与煤烟型)的单次散射性质, 发现两者有较大的差异。以海洋下垫面为例, 进一步分析两种气溶胶粒子的全天空偏振模式图, 发现粗粒子沙尘型溶胶粒子的存在会大幅度削弱全天空偏振模式图的强度, 使之分布模式减弱, 而细粒子煤烟型气溶胶则会大幅度增强全天空偏振模式图的强度, 使之分布模式增强。因此, 气溶胶性质的设定对于全天空偏振模式图的精度计算起着至关重要的作用。

本文的研究结果采用的是两种典型的气溶胶模型, 对于更复杂的非球形模式, 如圆柱状、片状及链状气溶胶粒子未有深入讨论。而这些形态气溶胶对于全天空偏振模式图的影响尚不明朗。此外, 大气中吸收性成分, 如水汽、二氧化碳的作用也没有深入研究。未来的研究需要对这些情况进行进一步研究。

参考文献(References)

- Boesche E, Stammes P, Ruhtz T, Preusker R and Fischer J. 2006. Effect of aerosol microphysical properties on polarization of skylight: sensitivity study and measurements. *Applied Optics*, 45(34): 8790–8805 [DOI: [10.1364/AO.45.008790](https://doi.org/10.1364/AO.45.008790)]
- Breon F M, Tanré D and Generoso S. 2002. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. *Science*, 295(5556): 834–838 [DOI: [10.1126/science.1066434](https://doi.org/10.1126/science.1066434)]
- Chen W, Yan L and Yang S Q. 2013. Multi-angular polarized characteristics of ocean aerosol. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(3): 600–607 (陈伟, 晏磊, 杨尚强. 2013. 海洋气溶胶多角度偏振辐射特性研究. *光谱学与光谱分析*, 33(3): 600–607) [DOI: [10.3964/j.issn.1000-0593\(2013\)03-0600-08](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2013)03-0600-08)]
- Cheng T, Gu X, Xie D, Li Z, Yu T and Chen H. 2012. Aerosol optical depth and fine-mode fraction retrieval over East Asia using multi-angular total and polarized remote sensing. *Atmospheric Measurement Techniques*, 5(3): 501–516 [DOI: [10.5194/amt-5-501-2012](https://doi.org/10.5194/amt-5-501-2012)]
- Dubovik O, Sinyuk A, Lapyonok T, Holben B N, Mishchenko M, Yang P, Eck T F, Volten H, Muñoz O, Veihelmann B, van der Zande W J, Leon J F, Sorokin M and Slutsker I. 2006. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. *Journal of Geophysical Research*, 111(D11): D11208 [DOI: [10.1029/2005JD006619](https://doi.org/10.1029/2005JD006619)]
- Dubovik O, Herman M, Holdak A, Lapyonok T, Tanré D, Deuzé J L, Ducos F, Sinyuk A and Lopatin A. 2011. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5): 975–1018 [DOI: [10.5194/amt-4-975-2011](https://doi.org/10.5194/amt-4-975-2011)]
- Emde C, Buras R, Mayer B and Blumthaler M. 2010. The impact of aerosols on polarized sky radiance: model development, validation, and applications. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2): 383–396 [DOI: [10.5194/acp-10-383-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-383-2010)]
- Guo Y M, Jia Y P, Pan X C, Liu L Q and Wichmann H E. 2009. The association between fine particulate air pollution and hospital emergency room visits for cardiovascular diseases in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 407(17): 4826–4830 [DOI: [10.1016/j.scitotenv.2009.05.022](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.022)]
- Kreuter A and Blumthaler M. 2013. Feasibility of polarized all-sky imaging for aerosol characterization. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(7): 1845–1854 [DOI: [10.5194/amt-6-1845-2013](https://doi.org/10.5194/amt-6-1845-2013)]
- Li L, Li Z, Li K, Blarel L and Wendisch M. 2014. A method to calculate Stokes parameters and angle of polarization of skylight from polarized CIMEL sun/sky radiometers. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 149: 334–346 [DOI: [10.1016/j.jqsrt.2014.09.003](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.09.003)]
- Ren T. 2011. Remote sensing of atmospheric aerosol with stationary satellite. Beijing: Peking University (任通. 2011. 静止卫星遥感大气气溶胶. 北京: 北京大学)
- Wu T X, Zhang L F, Cen Y, Huang C P, Zhao H Q and Sun X J. 2013. Neutral point consideration for atmospheric correction in polarization remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 17(2): 235–247 (吴太夏, 张立福, 岑奕, 黄长平, 赵恒谦, 孙雪剑. 2013. 偏振遥感的中性点大气纠正方法研究. *遥感学报*, 17(2): 235–247) [DOI: [10.11834/jrs.20132156](https://doi.org/10.11834/jrs.20132156)]
- Zhang Y, Li Z Q, Qie L L, Zhang Y, Liu Z H, Chen X F, Hou W Z, Li K T, Li D H and Xu H. 2016. Retrieval of aerosol fine-mode fraction from intensity and polarization measurements by PARASOL over East Asia. *Remote Sensing*, 8(5): 417 [DOI: [10.3390/rs8050417](https://doi.org/10.3390/rs8050417)]

Preliminary research on sky polarization and influential factors

CHEN Wei^{1,2}, LI Yanfei^{2,3}, WU Taixia⁴, GUAN Guixia⁵

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing) Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Spatial Information Integration and 3S Application, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;

4. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

5. Information Engineering College, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: This paper discusses the status of full sky polarization pattern and the major factors affecting its strength. These factors are Aerosol Optical Depth (AOD) and aerosol models (described by the single scattering properties of aerosol particles). The different results of AOD and aerosol models are demonstrated.

A relatively stable and regular sky polarization pattern is suggested to exist in the sky centering the position of the sun through the comprehensive results of incident solar light with underlying surface and atmosphere. This complex process can be described and calculated by vector radiative transfer models with the output of polarization components. The full sky polarization signals exhibit a certain regular distribution in the sky. The strength and pattern of full sky polarization are affected by the combination of surface reflective properties (including polarized reflectance and bidirectional reflectance), atmosphere molecule-scattering properties, and aerosol optical properties. This study simulated different full sky polarization patterns under various AOD conditions based on vector radiative transfer models. For example, the underlying surface is assumed to be an ocean surface. The land surface is omitted in this study because its basic pattern is similar to that of the ocean surface.

The single scattering properties of dust nonspherical and soot nonspherical aerosol particles were calculated using a TMatrix-Geo model. Phase functions and other single scattering properties were then obtained as the basic inputs of vector radiative transfer model. Results demonstrated a relatively stable sky polarization pattern centering the direction of incident solar light. However, different effects were observed between dust and soot aerosol on full sky polarization pattern. The increase in dust-scattering AOD weakens the pattern of sky polarization from a maximum degree of polarization of 50% to less than 30%. Meanwhile, an increase in soot-absorbing AOD strengthens the pattern of sky polarization from the maximum degree of polarization of 50% to >70%. With the bimodel (mixture of dust and soot aerosol) aerosol model, the sky polarization patterns were systematically analyzed with different ratios of soot-to-dust aerosols. The basic sky polarization pattern is suggested to still exist in the sky, but the strength is influenced by both aerosol model and AOD. With increased soot AOD, sky polarization tends to increase despite the total AOD being the same. When retrieving aerosol optic properties with sky polarization pattern, paying attention to the selection of aerosol model information is necessary.

Key words: polarization, polarization field, aerosol, sky polarization pattern

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41701391); National High Technology Research and Development Program (No.2008AA121806)