

# 非球形气溶胶对近红外偏振辐射传输的影响及等效球形误差分析

胡帅, 高太长\*, 李浩, 程天际, 陈鸣, 刘磊, 张婷  
(解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101)

**摘要:**为定量评估非球形气溶胶对偏振辐射传输的影响,基于T矩阵模型及自主开发的矢量辐射传输模式MACAR\_VSPART,讨论了漫射光辐亮度及偏振辐亮度对粒子形状的敏感性,分析了气溶胶球形假设造成的漫射光模拟偏差.结果表明,不同方向漫射光的辐亮度及偏振辐亮度对形状的敏感性不一致,且其形状敏感强度的空间分布呈现特定的特征,该特征可为气溶胶遥感过程中有效观测数据的选取提供依据.等效球形假设可造成较大的漫射光模拟偏差,其中偏振辐亮度尤为显著;天顶上行漫射光对粒子形状的敏感性远强于地面下行漫射光.

**关键词:**非球形气溶胶;偏振辐射传输;形状敏感系数;等效Mie散射误差

**中图分类号:**P407.6 **文献标识码:**A

## Analysis on the impact of non-spherical aerosol on polarized radiative transfer in near-infrared band and its equivalent-sphere errors

HU Shuai, GAO Tai-Chang\*, LI Hao, CHENG Tian-Ji, CHEN Ming, LIU Lei, ZHANG Ting  
(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101 China)

**Abstract:** In order to estimate the impact of non-spherical aerosol on polarized radiative transfer, the sensitivity of radiance and polarized radiance to aerosol shape was analyzed based on T Matrix method and MACAR\_VSPART. In addition, the simulation errors due to the approximation that taking the non-spherical particles as sphere ones were discussed. The simulation results show that, for radiance and polarized radiance, shape sensitivities are different at different directions. The angular distributions of shape sensitivity coefficient are typical for specified solar zenith angles, which is helpful for the data selection of remote sensing process to avoid the influence of aerosol shape. Obvious simulation errors are caused by taking the non-spherical aerosol particles as sphere ones, especially for polarized radiance. The impact of shape on upwelling diffuse light at the top of atmosphere is much stronger than down-welling diffuse light at surface.

**Key words:** non-spherical aerosol, polarized radiative transfer, sensitivity coefficient of shape, equivalent Mie scattering error

**PACS:** 42.68. Wt, 42.68. Mj, 42.68. Jg, 95.30. Jx, 42.68. Ay

### 引言

气溶胶的时空分布及其光学特性的不确定性是制约辐射传输模拟的重要因素<sup>[1]</sup>. 多年的IPCC报告表明<sup>[2]</sup>,气溶胶直接辐射强迫的评估精度虽然有

所提高,但仍存在 $-0.9 \sim -0.1 \text{ W/m}^2$ 的不确定度,其中气溶胶光学特性信息的不足是造成该不确定性的主要影响因素之一. 因此,快速、准确获取大范围气溶胶的光学特性至关重要<sup>[3]</sup>.

随着卫星遥感技术的发展,大范围的气溶胶光

收稿日期:2016-03-14,修回日期:2016-10-08

Received date: 2016-03-14, revised date: 2016-10-08

基金项目:国家自然科学基金(41575025)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(41575025)

作者简介(Biography): 胡帅(1990-),男,江西靖安人,博士研究生. 主要研究领域为大气探测与遥感. E-mail: hushuai2012@hotmail.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: 2009gaotc@gmail.com

学遥感成为可能. 目前气溶胶遥感技术主要分为两类, 一类是基于辐射强度信息的反演方法(称为“标量遥感法”), 遥感器包括 AVHRR 和 MODIS 等<sup>[4]</sup>, 这类方法可有效反演气溶胶光学厚度, 但反演精度受到两个方面的制约: 一方面, 卫星观测的辐亮度受地面反射和大气后向散射的耦合作用, 在反演过程中无法完全有效地剥离地表因素的影响; 另一方面, 气溶胶光学厚度的反演需要借助辐射传输模式, 而在模式中, 气溶胶的散射特性主要是在球形假设下通过 Mie 散射理论模拟的, 大量研究证明, 非球形对气溶胶的散射特性影响显著, 特别在大散射角处<sup>[5]</sup>, 这必然导致反演结果的不确定性. 随着偏振遥感技术的发展, 出现了基于多角度偏振信息的气溶胶反演方法, 也就是第二类气溶胶遥感技术, 主要的遥感器包括 EOSP 和 POLDER/PARASOL 等. 由于偏振辐亮度仅对气溶胶敏感, 而对地面反射不敏感, 因此可有效剥离地表反射的影响而反演气溶胶光学厚度, 所以相比标量遥感法, 偏振遥感法表现出独特的优势. 但由于实际气溶胶形状是未知的, 在正演模型中, 多数情形下气溶胶粒子仍作为球形粒子处理, 而受粒子非球形性的影响, 部分方向的漫射光模拟值失真<sup>[6]</sup>. 为解决上述问题, Cheng T. 等<sup>[7]</sup>系统分析了非球形气溶胶对不同方向反射率及偏振反射率的影响, 并讨论了漫射反射率及偏振反射率对气溶胶模式、形状及光学厚度的敏感性; 部分学者尝试将非球形性作为描述气溶胶的一个参数引入至反演过程, 目前该方法已用于气溶胶形状参数与光学厚度的同时反演, 可一定程度改善反演效果<sup>[8]</sup>, 但在该方案中, 粒子形状通常采用椭球等规则粒子进行近似, 而实际气溶胶的形状复杂多样, 因此虽然增加了一维形状变量, 但实际气溶胶穆勒矩阵与规则粒子的模拟值不可能完全一致<sup>[6]</sup>, 这必然导致部分方向的漫射光强度及偏振特性仍与观测值相差较大<sup>[7]</sup>, 若采用了这些方向的辐射信息进行气溶胶遥感, 则依旧可能导致反演结果的偏差, 因此在反演过程中如何减小形状因素的影响是气溶胶遥感中亟待解决的问题之一. 随着 AERONET 等观测网的建设<sup>[9]</sup>, 地基气溶胶偏振遥感取得较大发展, 其中 CE318DP 及 CE318-2 等仪器不仅可实现可见近红外波段光强信息的测量, 还可实现偏振信息的获取. 但与天基遥感相似, 地基气溶胶偏振遥感也遇到了非球形气溶胶的问题. 基于以上分析, 为提高气溶胶卫星遥感精度, 有必要系统分析非球形对偏振辐射传输的影响, 讨论球形假设导致的漫射光模拟偏差;

有必要挑选并剔除对粒子形状过于敏感方向的观测数据, 以减小反演过程不确定性, 提高反演精度.

基于此, 本文基于 T 矩阵理论<sup>[10]</sup> 辐射传输模式 MACAR\_VSPART<sup>[11-12]</sup> 系统讨论了不同方向漫射光对沙尘型气溶胶形状畸变的敏感性, 明确了地面及天顶漫射光对形状较为敏感的观测方向, 分析了球形假设导致的漫射光辐亮度及偏振辐亮度模拟误差. 模拟过程中, 波长取 0.865 μm, 该波长为 PARASOL 的一个通道, 也与 CE318 的偏振通道 (0.870 μm) 相近.

## 1 研究方法

### 1.1 方法及思路

首先采用 T 矩阵模型生成不同形状气溶胶的散射特性数据库; 以散射数据库为输入, 基于辐射传输模式 MACAR\_VSPART<sup>[11-12]</sup>, 在不同气溶胶有效半径、太阳入射角及气溶胶光学厚度 (AOD) 条件下, 分别模拟对应的漫射光 Stokes 矢量; 进而分析漫射光归一化辐亮度  $L_I$  和偏振辐亮度  $L_P$  对形状的敏感性及其等效球形假设造成的模拟误差, 其中  $L_I$  和  $L_P$  的定义如式 (1) 和式 (2) 所示, 式中  $\theta$  和  $\varphi$  为观测天顶角和方位角,  $\mu_0$  为太阳入射角余弦,  $F_0$  为大气顶的太阳辐射通量密度,  $I$ 、 $Q$  和  $U$  为 Stokes 矢量的前三个元素.

$$L_I(\theta, \varphi) = \frac{\pi I(\theta, \varphi)}{\mu_0 F_0} \quad (1)$$

$$L_P(\theta, \varphi) = \frac{\pi \sqrt{Q^2(\theta, \varphi) + U^2(\theta, \varphi)}}{\mu_0 F_0} \quad (2)$$

### 1.2 辐射传输模式介绍

矢量辐射传输模式 MACAR\_VSPART 由解放军理工大学气象海洋学院军事大气探测实验室开发研制<sup>[11]</sup>, 该模式主要包括大气及地表参数化、辐射传输方程求解两个模块, 可实现包含大气折射过程的辐射传输仿真.

大气及地表参数化模块中, 气体吸收采用了逐线积分和  $k$  分布模式两种方案, 耦合的散射模型包括 Mie 散射理论及 T 矩阵模型, 地表采用的是朗伯面; 辐射传输方程求解模块中耦合的辐射传输方程求解方法包括 DISORT、RT3/PolRadtran、SPDISORT、MACAR 和 VSPART, MACAR 和 VSPART 是自主研发的, 两者均实现了包含大气折射过程的辐射传输过程模拟, 其中 MACAR 是基于 Monte Carlo 体制的, VSPART 是基于累加-倍加法体制的, 具体请

参见文献<sup>[11]</sup>.

### 1.3 T 矩阵法

T 矩阵法是计算非球形粒子散射特性的有力工具<sup>[10]</sup>. 在 MACAR\_VSPART 中, T 矩阵模型被改写为气溶胶模式的一个内嵌函数. 本文研究的粒子形状包括椭球形、圆柱形及切比雪夫粒子. 椭球形粒子的形状参数采用横轴和纵轴之比  $a/b$  (Aspect ratio) 表示, 圆柱形粒子采用直径高度比  $D/L$  表示, 切比雪夫粒子形状采用切比雪夫多项式 ( $r(\theta) = r_0 [1 + \varepsilon \cos(n\theta)]$  ( $|\varepsilon| < 1$ )) 表示, 其中  $\varepsilon$  为畸变参量,  $n$  是多项式阶数.

## 2 不同方向漫射光对粒子形状的敏感性分析

采用 T 矩阵法分别模拟椭球形、圆柱形及切比雪夫形气溶胶的散射效率因子、单散射反照率和穆勒矩阵, 并生成散射特性库, 其中气溶胶类型取沙尘型, 尺度谱服从对数正态分布谱 (如式 (3)),  $r_{\text{mod}}$  为平均半径,  $\sigma$  取 2.99, 最大半径  $r_{\text{max}} = 20 \mu\text{m}$ , 最小半径  $r_{\text{min}} = 0.005 \mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>, 复折射率取为  $1.53 - 4.0 \times 10^{-3}i$  (波长  $\lambda = 0.865 \mu\text{m}$ ); 椭球粒子轴比  $a/b$  从 0.68 变化至 1.52, 步长取 0.04; 圆柱形粒子的  $D/L$  从 0.68 变化至 1.52, 变化步长为 0.04; 切比雪夫粒子, 形状畸变因子  $\varepsilon$  从 -0.1 变化至 0.1, 阶数  $n$  分别取 2、4、8 和 16, 部分粒子散射特性的模拟结果如图 1 所示. 以粒子散射特性为输入, 采用 VSPART 模型分别模拟天顶向上漫射光及地面下行漫射光的归一化辐亮度和偏振辐亮度 (每种形状模拟一次). 在模拟过程中, 大气廓线取 AFGL 热带大气廓线, 大气分 33 层, 不考虑云的影响, 地表反射率均设为 0.01, 太阳方位角设为  $0^\circ$ . 在模式中, 气溶胶也假设为分层均匀的, 各层气溶胶粒子的光散射特性假设相同, 各层气溶胶粒子的数密度随高度的变化采用的 e 指数函数进行描述, 标高设为 1 km. 为定量评估不同方向漫射光辐亮度及偏振辐亮度对气溶胶形状的敏感性, 进一步定义形状敏感系数  $K_{\text{sensitivity}}$ , 其计算方法如式 (4) 所示, 该参数表征的是不同形状条件下模拟结果的分散性.

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r \ln \sigma}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln r - \ln r_{\text{mod}}}{\ln \sigma} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$K_{\text{sensitivity}}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i(\theta, \varphi) - \bar{X}(\theta, \varphi))^2} / \bar{X}(\theta, \varphi) \times 100\% \quad (4)$$

上式中  $X_i(\theta, \varphi)$  表示第  $i$  种形状条件下模拟的漫射

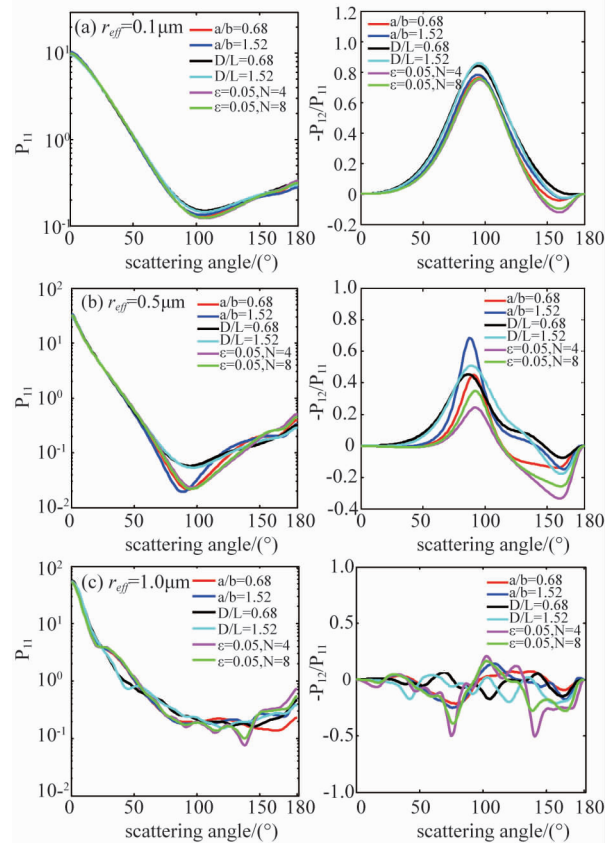


图 1 不同有效半径的非球形粒子穆勒散射矩阵  $\mathbf{P}$  随散射角的变化. 左一列为散射相函数  $P_{11}$ , 右一列为  $-P_{12}/P_{11}$

Fig. 1 Variation of Müller scattering matrix  $\mathbf{P}$  with scattering angle. The left column shows the variation of scattering phase functions, the right column shows the variation of  $-P_{12}/P_{11}$

光辐亮度或偏振辐亮度,  $\bar{X}(\theta, \varphi)$  为  $X(\theta, \varphi)$  的平均值,  $N$  为模拟形状的总数, 其中椭球、圆柱粒子各为 22 个, 切比雪夫粒子共 16 个.

### 2.1 不同有效半径条件下的形状敏感性分析

在不同粒子有效半径条件下分析漫射光对气溶胶形状的敏感性. 取太阳入射角为  $30^\circ$ , AOD 为 1.0, 分别设粒子有效半径为  $0.1 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$  和  $1 \mu\text{m}$ , 模拟天顶及地表处不同方向漫射光归一化辐亮度及偏振辐亮度的形状敏感系数如图 2 所示. 图中第一、二列分别表示地面下行漫射光辐亮度和偏振辐亮度的形状敏感系数分布, 第三、四列表示天顶上行漫射光的敏感系数的分布 (图 3、图 4 布局与图 2 相同).

由图可知, 随着粒子有效半径增大, 漫射光对形状的敏感性显著增强, 其中有效半径为  $0.1 \mu\text{m}$  时, 漫射光辐亮度的形状敏感系数最大仅为 1.73%, 而当有效半径为  $1.0 \mu\text{m}$  时, 辐亮度形状敏感系数最大达 8.3%. 对于地面下行漫射光, 当有效半径较小

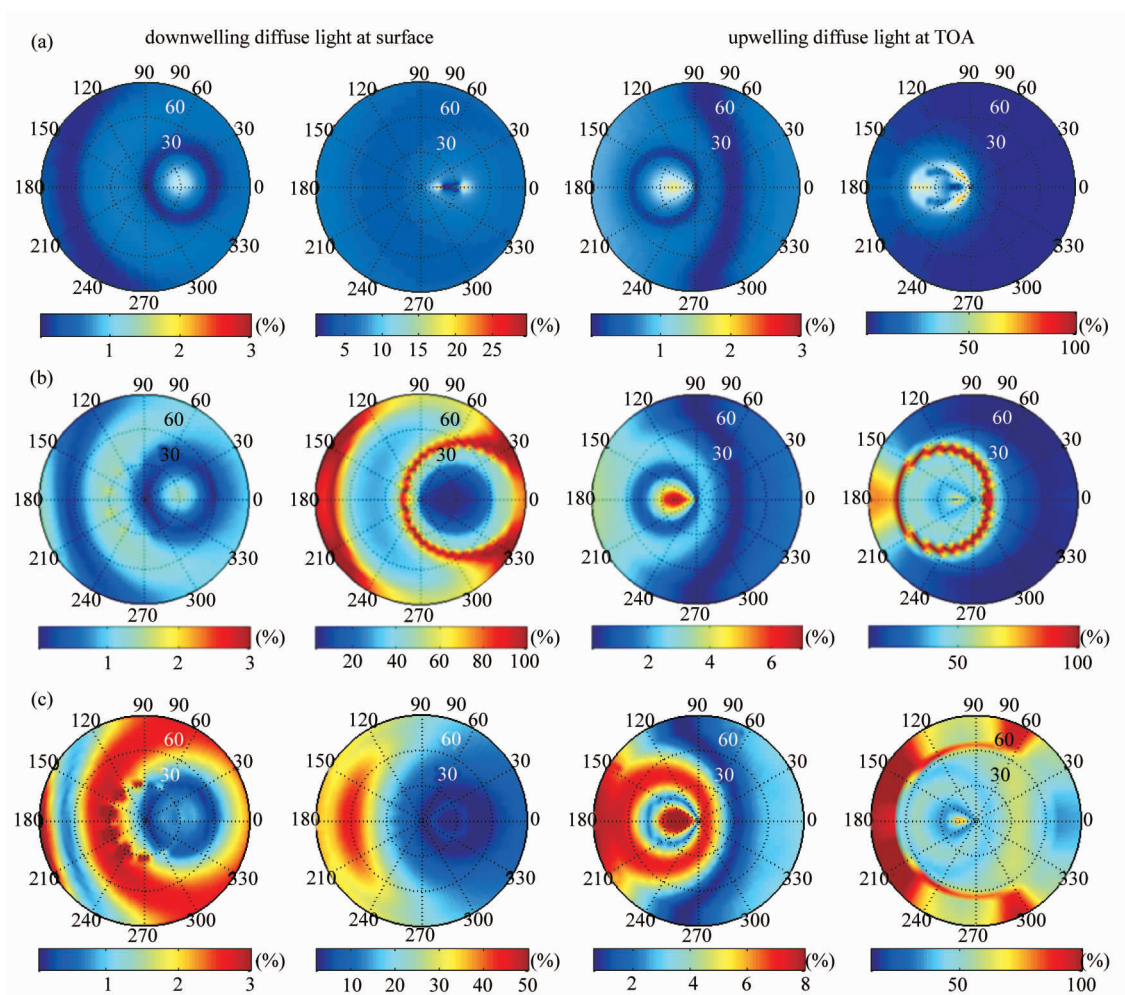


图2 不同气溶胶有效半径条件下的敏感性分析结果. 图(a)至图(c)分别为有效半径为 $0.1\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 和 $1\ \mu\text{m}$ 条件下的敏感系数空间分布

Fig. 2 The results of sensitivity analysis for different effective radius. Fig. (a) to Fig. (c) are the angular distribution of the sensitivity coefficients for effective radius =  $0.1\ \mu\text{m}$ ,  $0.5\ \mu\text{m}$  and  $1\ \mu\text{m}$ , respectively

时,辐亮度的形状敏感系数较高的区域包括三部分,入射光方向区域、围绕入射光方向的环状带(约与入射方向呈 $30^\circ\sim 60^\circ$ )及背向太阳一侧的天边区域(约与入射方向呈 $120^\circ$ ,圆弧状).在与入射方向约呈 $30^\circ$ 角的环状区域内,漫射光辐亮度对形状并不敏感,其原因是由于在散射角 $30^\circ$ 处附近,散射相函数对气溶胶微物理参数不敏感所致;在与入射光方向约呈 $90^\circ$ 方向的弧状区域内,辐亮度对粒子形状的敏感性也始终较低.随着有效半径增大,入射光方向的形状敏感性逐渐减弱,而另外两个敏感区域的形状敏感性逐步增强.对于偏振辐亮度,太阳入射方向区域的形状的敏感性始终较低,这是由于前向散射基本不改变入射光偏振状态所致.在入射光方向周围存在一个敏感系数较高的环状敏感区域,随着粒径的增加,该环状区域逐步消失;当粒子有效半径

较大时,背向太阳天边区域( $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 180^\circ)$ )附近的形状敏感系数也相对较高;在太阳入射方向,弱形状敏感区域的范围随粒径的增大而增加,形状敏感系数也随之减小,分析其原因是由于粒径越大,形状对气溶胶前向散射特性的影响随之减弱.

对于天顶上行漫射光,辐亮度的形状敏感区域主要包括两部分,太阳后向散射方向区域( $(\theta, \varphi) = (30^\circ, 180^\circ)$ )附近及围绕该区域的环形区域(与后向散射方向大约呈 $40^\circ$ ).且随着粒子有效半径增大,这两个区域的敏感区域显著增强;与地面下行漫射光相似,两强形状敏感区域间隔有一弱环状敏感区域(约与后向散射方向呈 $25^\circ$ ),且该区域并不随粒径的改变而消失;当观测天顶角大于 $30^\circ$ 时,在方位角 $0^\circ\sim 90^\circ$ 及 $270^\circ\sim 360^\circ$ 的区域内(右半球区域),

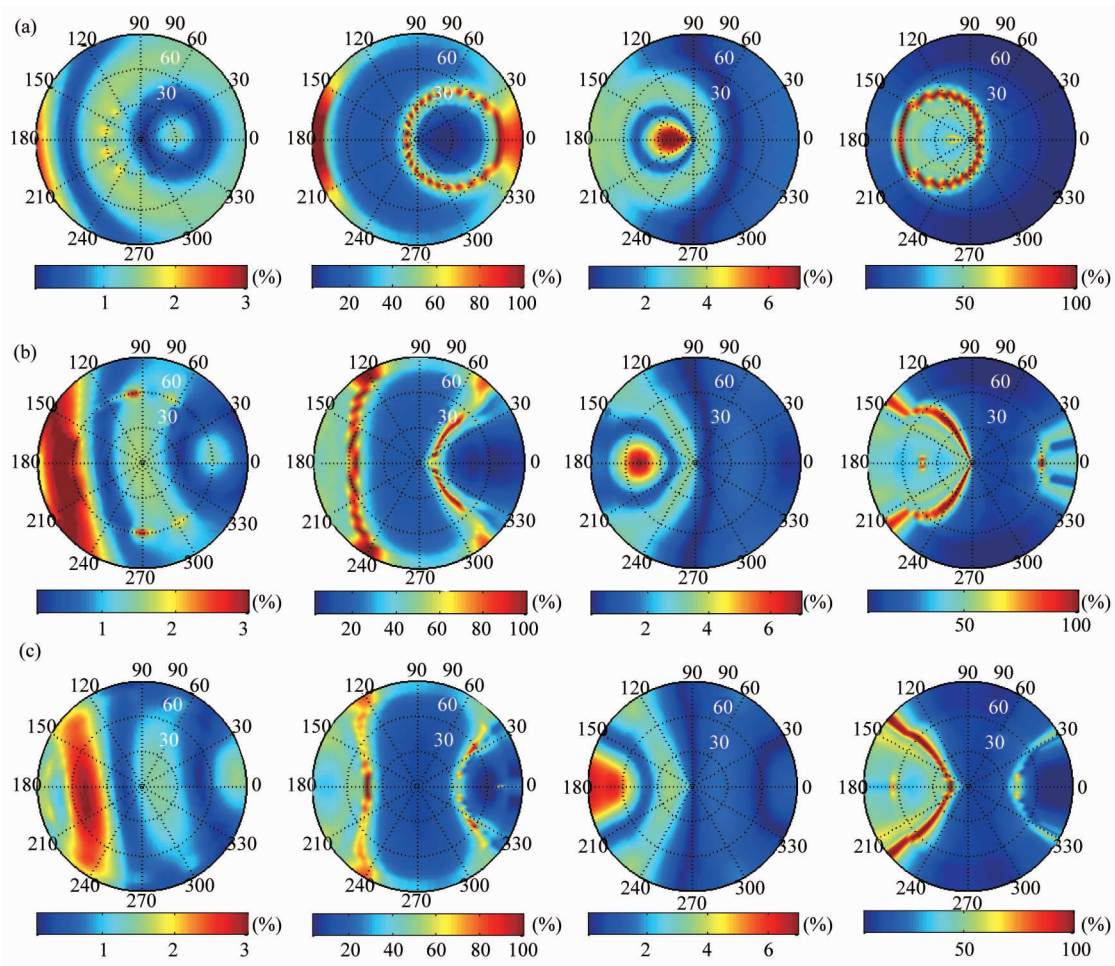


图 3 不同入射角条件下的敏感性分析结果. 图(a)至图(c)分别太阳入射角为 30°、60°和 80°条件下的形状敏感系数空间分布  
Fig. 3 The results of sensitivity analysis for different solar zenith angles. (a), (b), (c) are the angular distribution of the shape sensitivity coefficients for solar zenith angle 30°, 60° and 80°

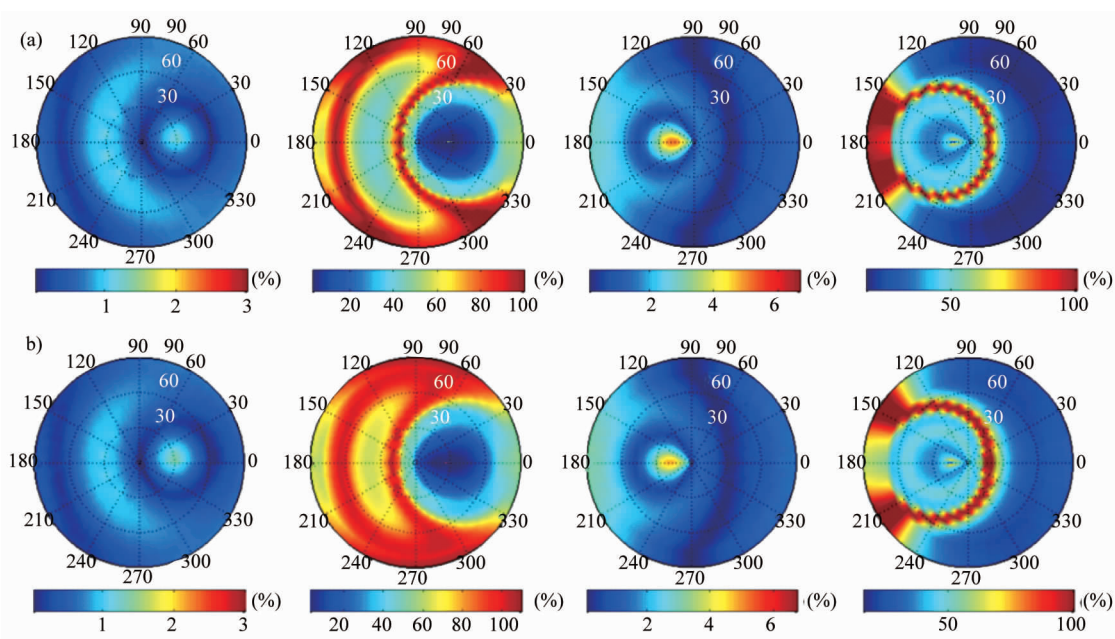


图 4 不同 AOD 条件下的敏感性分析结果. 图(a)至图(b)分别 AOD 为 1.5 和 2 条件下的敏感系数空间分布  
Fig. 4 The results of sensitivity analysis for different solar zenith angles. (a) and (b) are the angular distribution of the shape sensitivity coefficients for AOD = 1.5 and AOD = 2.0 respectively

辐亮度对形状的敏感性也始终较低,其原因是由于该方向属于侧向散射角,粒子形状影响相对较小.对于偏振辐亮度,以入射光后向散射方向为中心,存在一个环状的形状敏感区域,随着有效半径增加,该环状带区域半径逐渐增大,对应的形状敏感系数也有所增大,但由于粗模态粒子对偏振辐亮度贡献较小,虽然大粒径条件下表现出较高的形状敏感性,因此粒子非球形性可能对实际偏振反演结果的影响并不大<sup>[7]</sup>.

从量级上看,天顶上行漫射光对粒子形状的敏感性强于地面下行漫射光,分析其原因,对于随机取向的非球形气溶胶,粒子形状的不规则性主要影响气溶胶后向散射,前向散射对粒子非球形性并不敏感;随着粒子尺度的增加,形状对前向散射的影响越低,这也是太阳入射方向区域的形状敏感系数随粒子半径增加而降低的原因.

## 2.2 不同太阳入射角条件下的形状敏感性分析

取 AOD 为 0.5,有效粒子半径为  $0.5\mu\text{m}$ ,设太阳入射角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $80^\circ$ ,模拟漫射光辐亮度及偏振辐亮度的形状敏感系数分布,如图 3 所示.

由图可知,当太阳入射角较小时,地面下行漫射光辐亮度及偏振辐亮度的形状敏感系数分布和 2.1 节的结果相似.对于辐亮度,以入射光方向为中心,形状敏感区域与非敏感区域呈圆弧状交替间隔分布,随着太阳入射角增大,形状敏感区域逐步向入射方向移动,其中,围绕入射方向的第一层圆弧敏感区域(约与入射方向呈  $30^\circ \sim 60^\circ$  角)的敏感系数逐步降低,圆弧形结构也随之消失;对于第二层形状敏感区域(约与入射方向呈  $120^\circ$  角),形状敏感系数首先随太阳入射角的增大而增强,当太阳入射角达到一定值时,敏感系数又随之降低.对于偏振辐亮度,形状敏感区域与非敏感区域也呈交替间隔分布特征,其中,入射光方向的形状敏感系数始终较低;随着太阳入射角的增加,偏振辐亮度对形状的敏感性略有减弱,围绕入射光方向的环状形状敏感区域逐步消失,并在天顶区域趋于对称分布.分析上述现象原因,随着太阳入射角增加,光线传播路径增加,多次散射效应增强,进而对气溶胶的退偏振效应起到了平均作用,因此漫射光偏振辐亮度对形状的敏感性降低.

对于天顶上行漫射光,辐亮度的形状敏感区域与非敏感区域也呈交替间隔分布,随着太阳入射角增加,后向散射方向的形状敏感区域逐步向天边方向( $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 180^\circ)$ )移动,且影响范围逐步

扩大,但形状敏感系数却有所降低;围绕太阳后向散射方向的环状弱敏感区域及右半球弱敏感区域的辐亮度形状敏感系数始终较低,但随着太阳入射角增加,其形状敏感系数略有增加.对于偏振辐亮度,随着太阳入射角增加,围绕后向散射方向的圆环形敏感区域逐步瓦解,形状敏感区域的范围也逐步扩张;当太阳入射角足够大时,在右半球方位角  $30^\circ \sim 270^\circ$  间出现一形状敏感区域,且随着太阳入射角增加,该区域逐步向外部扩张,但在该区域内部,其形状敏感系数却又随之变小.对于非形状敏感区域,随着太阳入射角增加,偏振辐亮度的形状敏感系数略有增加,但变化幅度小于 3%.

## 2.3 不同 AOD 条件下的形状敏感性分析

取太阳入射角为  $30^\circ$ ,方位角为  $0^\circ$ ,粒子有效半径为  $0.5\mu\text{m}$ ,取 AOD 为 1.5 和 2.0,分别模拟漫射光辐亮度和偏振辐亮度的形状敏感系数分布,如图 4 所示.综合对比图 3(a) (AOD 为 0.5) 和图 2(b) (AOD 为 1.0) 可知,漫射光形状敏感区域与非敏感区域的分布整体和 2.1 节模拟结果相似,呈弧状交替间隔分布.随着 AOD 的增加,辐亮度的形状敏感系数均随之降低,但减小幅度不大.对于地面下行漫射光,偏振辐亮度的敏感系数整体随 AOD 增加而增强,且形状敏感区域的范围也随之扩大,但在入射光方向,其形状敏感系数始终较低.对于天顶上行漫射光,偏振辐亮度的形状敏感系数整体随着 AOD 增加而增强;当 AOD 足够大时,在右半球天边区域内(方位角  $150^\circ \sim 210^\circ$ ,天顶角  $60^\circ \sim 90^\circ$ ) 出现形状敏感性区域,并且随着 AOD 增加,该区域以  $180^\circ$  方位角为分界点逐步分离,典型的环形敏感区域变为圆弧状;对于形状弱敏感区域,随着 AOD 增加,各方向的形状敏感系数略有增强,但变化幅度小于 3.5%,这可能是由于多次散射效应的耦合作用造成的.

## 3 等效球形假设造成的漫射光模拟误差分析

在辐射传输模式中通常将非球形粒子等效为球形粒子进行处理,这必然造成漫射光强及偏振特性的模拟误差,基于此,本节对球形假设造成的漫射光辐亮度及偏振辐亮度模拟偏差进行了定量讨论.定义等效 Mie 散射误差以评估球形假设对辐射传输过程的影响,如式(5)和(6)所示.式中,  $S_{L_{\text{Mie}}}(\theta, \varphi)$  和  $S_{P_{\text{Mie}}}$  分别表示辐亮度和偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差,  $L_{L_{\text{Mie}}}$  和  $L_{P_{\text{Mie}}}$  分别表示等效球形条件下的辐亮度及偏振辐亮度模拟值.文中选取较有代表性的椭球粒子进行研究.

$$S_{L\_Mie}(\theta, \varphi) = \frac{(L_I(\theta, \varphi) - L_{L\_Mie}(\theta, \varphi))}{L_{L\_Mie}(\theta, \varphi) \times 100\%}, \quad (5)$$

$$S_{P\_Mie}(\theta, \varphi) = \frac{|L_P(\theta, \varphi) - L_{P\_Mie}(\theta, \varphi)|}{L_{P\_Mie}(\theta, \varphi) \times 100\%}. \quad (6)$$

### 3.1 不同有效半径条件下的等效 Mie 散射误差分析

参数设置与 2.1 节相同,模拟漫射光辐亮度及偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差如图 5 所示. 其中,图 5(a)至图 5(c)为辐亮度的等效 Mie 散射误差分布,对应的粒子有效半径为 0.1  $\mu\text{m}$ 、0.5  $\mu\text{m}$  和 1.0  $\mu\text{m}$ ,图 5(d)至图 5(f)为偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差;每幅子图以白线分割为上、下半部分,分别表示天顶上行及地表下行漫射光的模拟结果;图 5 中纵坐标表示观测天顶角,横坐标表示椭球轴比  $a/b$  (aspect ratio). 根据辐射场的方向对称性及第 2 节的形状敏感性分析结果,取观测方位角  $\varphi = 0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $180^\circ$  为抽样方位角,从左至右依次与图中四列子图相对应.(图 6、图 7 与图 5 布局相同)

由图可知,随着形状参数的增加,辐亮度及偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差均随之增大,其中当粒子有效半径为 1  $\mu\text{m}$ 、轴比为 1.5 时,辐亮度的误差可达 23.5%,部分方向的偏振辐亮度大于 200%. 对于地面下行漫射光,辐亮度的等效 Mie 散射误差在入射光方向出现峰值区域,但随着有效半径的增大,该峰值区域逐步减弱,这与 2.1 节敏感性分析结果是一致的;在方位角  $60^\circ$  和  $120^\circ$  附近,等效球形假设高估了大部分方向的漫射光辐亮度(误差值为负),且负值区间范围随形状参数增加而扩大. 对于大粒子和小粒子,地面下行漫射光偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差始终较小,且误差值低于天顶上行漫射光,如有效半径为 0.1  $\mu\text{m}$  时,最大误差仅为 33.8%;当粒径为 0.5  $\mu\text{m}$  时(粒径中等),偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差相对较大,且模拟误差值大于天顶漫射光. 分析上述现象原因如下,小粒子半径远小于入射光,其散射特性趋于瑞利散射特性,对粒子形状信息不敏感;对于大粒子,粒子形状基本不改变粒子前向散射偏振特性;而对于有效半径介于两者之间粒子,前向散射光的偏振特性则一定程度表现出对形状的敏感性.

对于天顶上行漫射光,辐亮度等效 Mie 散射误差的正负值区域呈交替间隔分布,随着粒子形状参数的增加,误差值随之增大,且误差较大的天顶角区间也随之扩张;在入射光后向散射方向( $(\theta, \varphi) = (30^\circ, 180^\circ)$ ),辐亮度的等效 Mie 散射误差相对较

大,等效球形假设高估了实际辐亮度值. 对于偏振辐亮度,等效球形假设造成的偏振辐亮度模拟误差远大于辐亮度,其中当粒子有效半径为 0.5  $\mu\text{m}$  时,偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差达 247.9%,而辐亮度模拟偏差最大仅为 11.6%;粒子有效半径较小时,在入射光方向两侧存在两个模拟偏差较大的区域,随着粒径增大,该现象消失;从误差分布范围上看,随着气溶胶粒径的增加,偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差整体逐步增加.

### 3.2 不同太阳入射角条件下的等效 Mie 散射误差分析

参数设置与 2.2 节相同,在不同太阳入射角条件下,讨论等效球形假设对漫射光模拟结果的影响. 如图 6 所示,其中图 6(a)至图 6(c)、图 6(d)至图 6(f)对应的太阳入射角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $80^\circ$ .

对于地面下行漫射光,随着太阳入射角增大,辐亮度的等效 Mie 散射误差整体随之减小;在天顶角  $0 \sim 30^\circ$  区间内,球形假设下的漫射光辐亮度模拟值普遍大于实际值. 对于偏振辐亮度,当太阳入射角较小时,等效 Mie 散射误差较大的区域较为集中;随着太阳入射角的增加,等效 Mie 散射误差略有增加,且误差较大的天顶角区间范围也有所扩大,该现象可能由于太阳入射角增加,光传播距离变长,多次散射效应增强所致.

天顶上行漫射光的模拟结果与 3.1 节相似. 在入射光后向散射方向处( $\varphi = 180^\circ$ ),辐亮度的等效 Mie 散射误差始终为负值,这是由于在后向散射方向, Mie 理论模拟的相函数值高于非等效球形条件下的模拟结果所致;随着太阳入射方向的改变,该区域随之移动,等效 Mie 散射误差值也略有减弱,其中当太阳入射角为  $30^\circ$  时,最大误差值为 19.3%,当太阳入射角为  $80^\circ$  时,最大误差值为 17.1%.  $(\theta, \varphi) = (15^\circ, 0^\circ)$  方向处的辐亮度等效 Mie 散射误差也相对较大,随着太阳入射角增加,该模拟偏差逐步减小. 在方位角  $60^\circ$  及  $120^\circ$  处,随着太阳入射角增加,等效 Mie 散射误差随天顶角正负交替变化的现象消失,但方位角  $180^\circ$  处,该现象始终存在. 偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差远大于辐亮度,其中当太阳入射角为  $60^\circ$  时,部分方向的偏振辐亮度等效 Mie 散射误差大于 200%;方位角  $120^\circ$  及  $180^\circ$  的偏振辐亮度等效 Mie 散射误差整体大于方位角  $0^\circ$  及  $60^\circ$ ,其中方位角  $60^\circ$  附近的误差值最小. 整体上看,偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差随太阳入射角的增加先增强而后略有减弱.

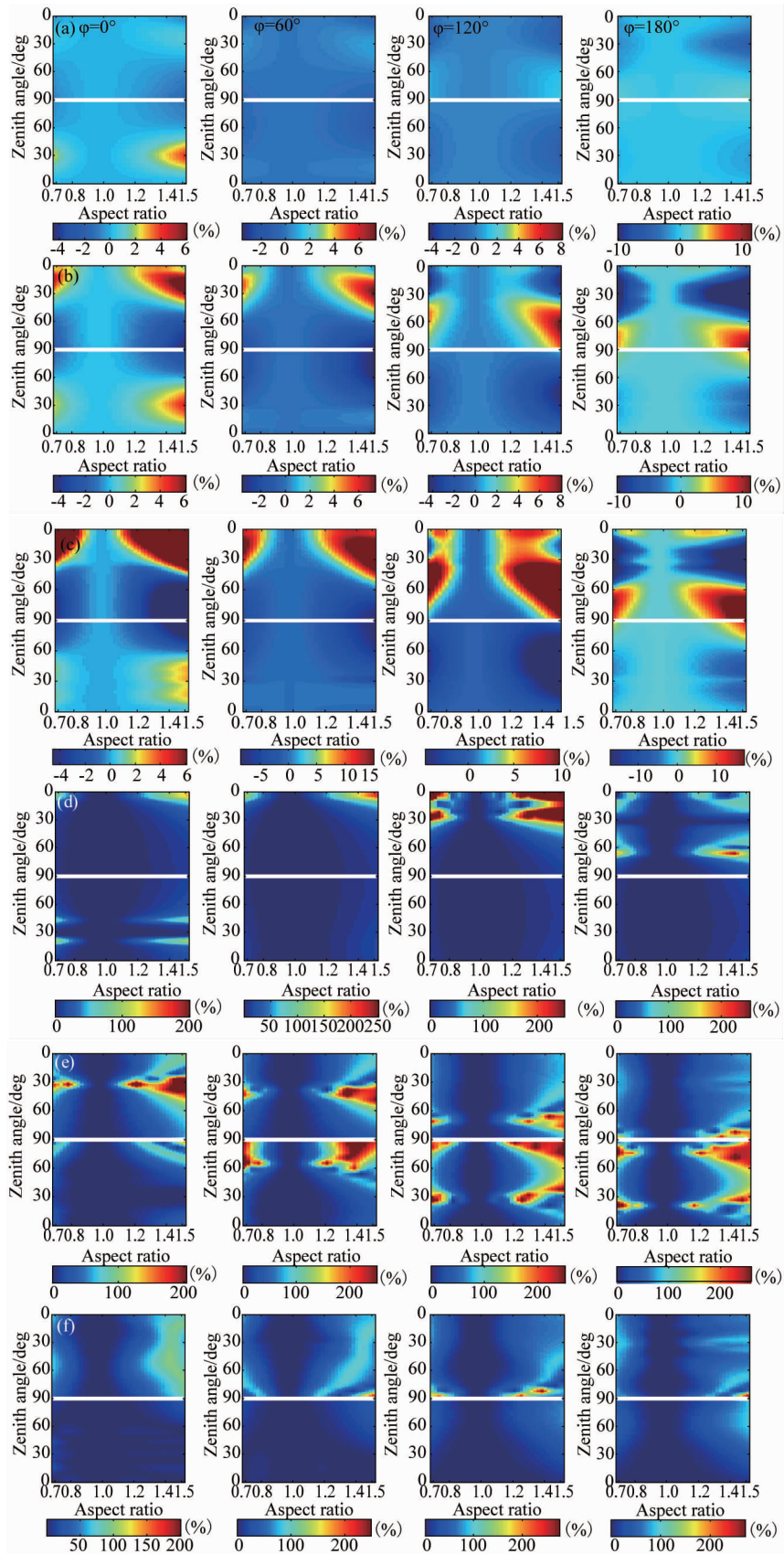


图5 不同气溶胶有效半径条件下的漫射光辐亮度及偏振辐亮度等效 Mie 散射误差。从左至右,各列子图对应的抽样相对方位角依次为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $180^\circ$

Fig. 5 Equivalent Mie scattering error of radiance and polarized radiance for different effective radius. The sampling relative azimuth angles of the columns from left to right are  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  and  $180^\circ$



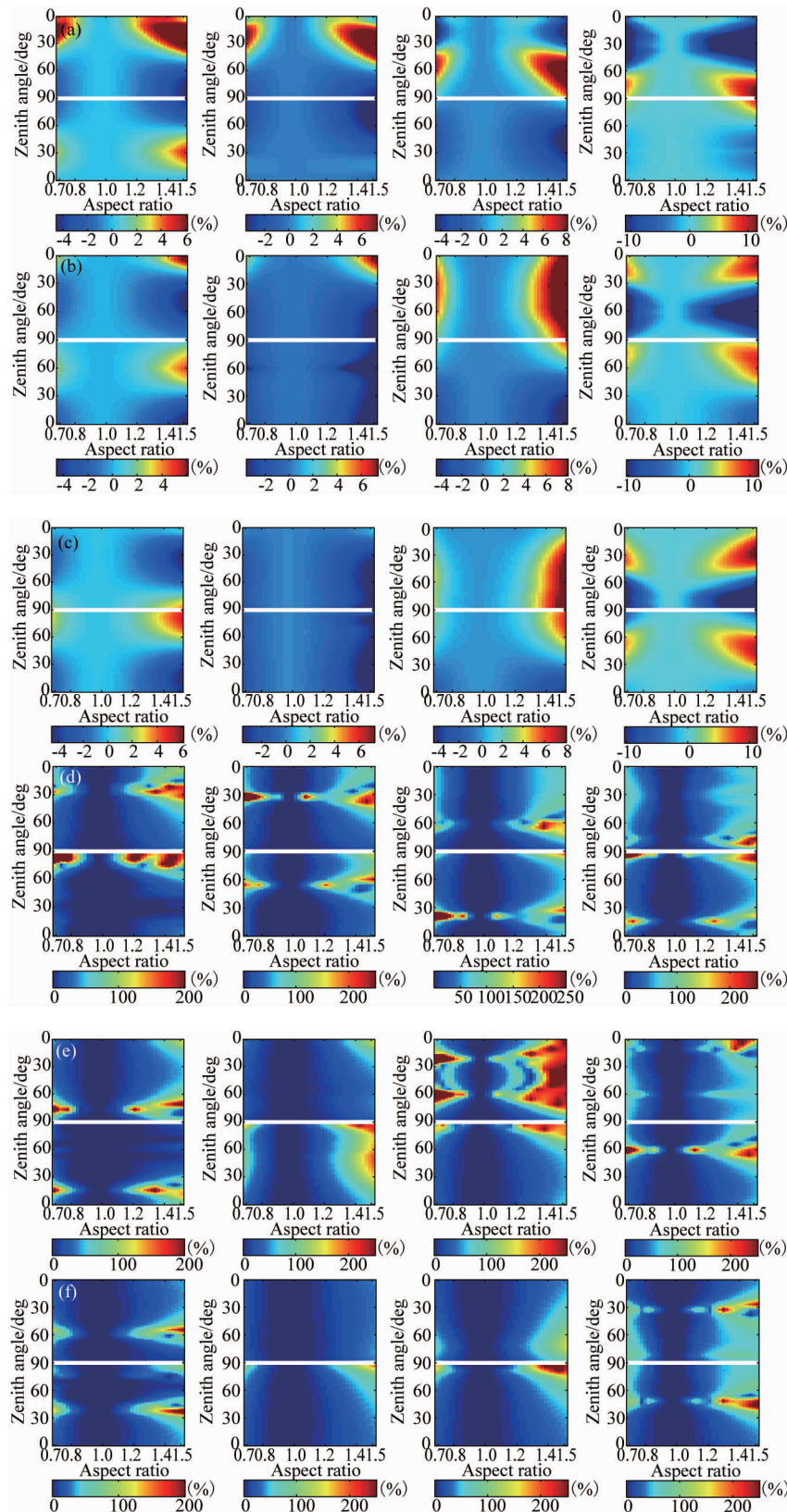


图 6 不同太阳入射角条件下的漫射光辐亮度及偏振辐亮度等效 Mie 散射误差. 从左至右, 各列子图对应的抽样方位角依次为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $180^\circ$

Fig. 6 Equivalent Mie scattering errors of radiance and polarized radiance for different solar zenith angles. The sampling azimuth angles of each column are  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  and  $180^\circ$

### 3.3 不同气溶胶光学厚度条件下的等效 Mie 散射误差分析

模拟条件与 2.3 节相同,模拟漫射光等效 Mie 散射误差分布如图 7 所示,其中图 7(a)和图 7(b)为 AOD 为 1.5 和 2 时的辐亮度等效 Mie 散射误差分布,图 7(c)和图 7(d)为对应的偏振辐亮度等效 Mie 散射误差分布. 综合对比图 6(a)和图 6(d) (AOD = 0.5),图 5(b)和图 5(e) (AOD = 1.0)可知,

随着 AOD 增加,辐亮度及偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差均有所降低,其中 AOD 为 0.5 时,辐亮度及偏振辐亮度的模拟误差达 10.3% 和 341.3%,而当 AOD 为 2.0 时,对应的等效 Mie 散射偏差仅为 6.3% 和 283.4%. 辐亮度等效 Mie 散射误差随观测天顶角及形状参数的分布图像并不随 AOD 增加而改变,与之相反,偏振辐亮度的等效 Mie 散射误差分布图像却表现出对 AOD 的高敏感性,说明偏振辐

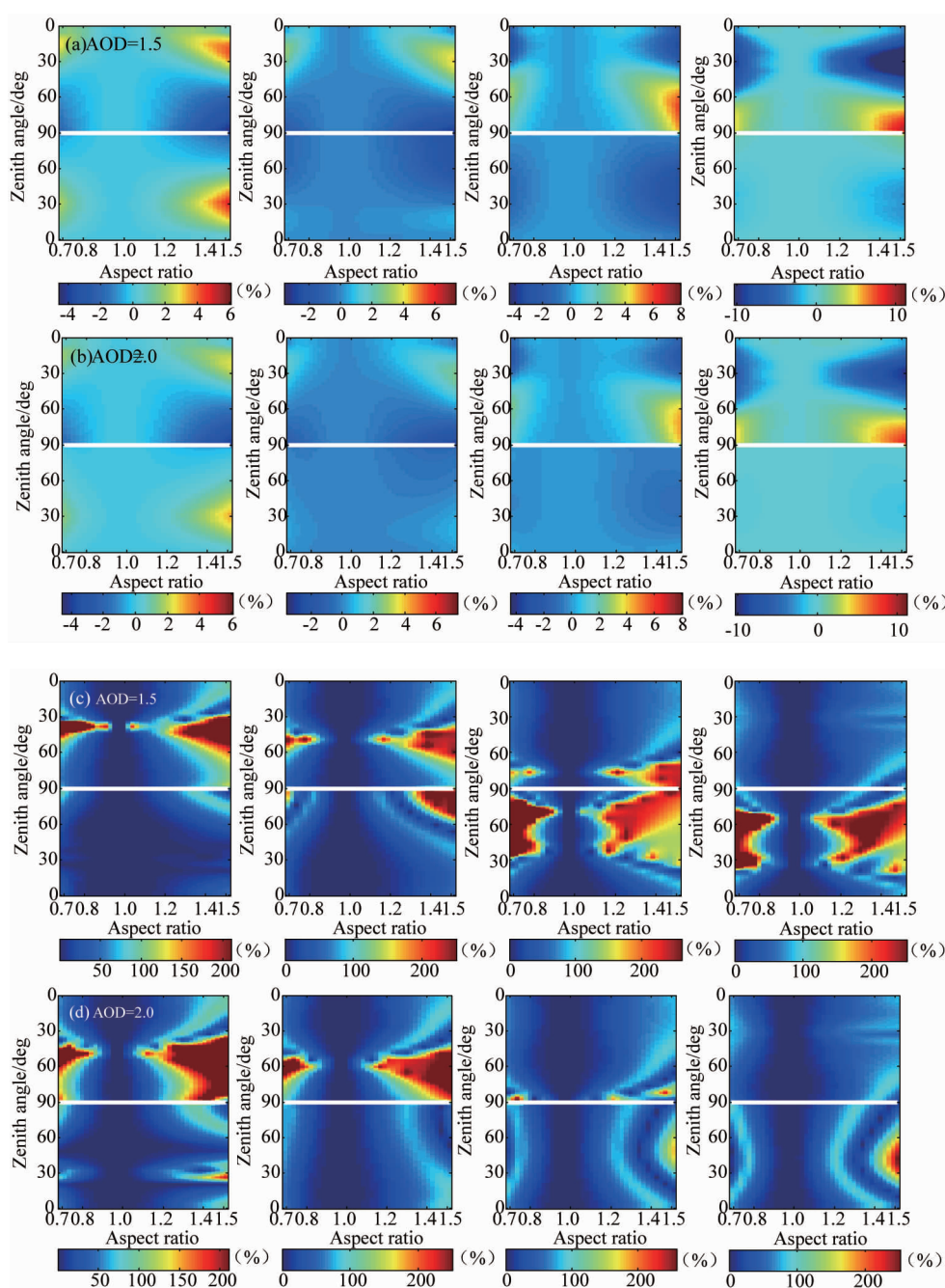


图 7 不同 AOD 条件下的漫射光辐亮度及偏振辐亮度等效 Mie 散射误差. 从左至右,各列子图对应的抽样方位角依次为  $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $180^\circ$

Fig. 7 Equivalent Mie scattering error of radiance and polarized radiance for different AODs. The sampling azimuth angles of each column are  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$  and  $180^\circ$

亮度受粒子的多次散射效应影响显著。

#### 4 结论

为了解非球形气溶胶对近红外偏振辐射过程的影响,采用 T 矩阵法计算了不同形状气溶胶的散射特性,基于辐射传输模式 MACAR\_VSPART 模拟了对应形状下的漫射光强度及偏振特性;在不同气溶胶有效半径、光学厚度及太阳入射角条件下,分析了天顶及地表漫射光的归一化辐亮度及偏振辐亮度对气溶胶形状的敏感性;以椭球粒子为例,讨论了漫射光归一化辐亮度及偏振辐亮度的等效球形误差随粒子形状参数的变化。主要结论如下:

(1) 不同方向漫射光辐亮度及偏振辐亮度对形状的敏感性不一致,当太阳入射角一定时,不同方向漫射光对粒子形状的敏感性呈现特定的空间分布特征,该特征可为气溶胶遥感过程中有效观测数据的选取提供依据。

(2) 将非球形气溶胶等效为球形粒子可造成较大的漫射光模拟偏差,对于偏振辐亮度尤为显著;因此在含大量非球形气溶胶的条件下,如沙尘天气,基于该假设可能造成较大的反演误差;形状对天顶上行漫射光模拟结果的影响强于地面下行漫射光。

下一步工作中,计划将现有研究成果应用到实际反演之中,并定量评估形状的不确定性导致的反演结果偏差。

#### References

- [1] Dou T, Xiao C, Shindell D T, *et al.* The distribution of snow black carbon observed in the Arctic and compared to the GISS-PUCCINI model K. Eleftheriadis [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, **12**(17):7995–8007.
- [2] Intergovernmental Panel of Global Climate Change. IPCC: Climate Change 2007, 2007.
- [3] Liou K N, Takano Y, Yang P. Intensity and polarization of dust aerosols over polarized anisotropic surfaces [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2013, **127**: 149–157.
- [4] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, *et al.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2005, **62**(4): 947–973.
- [5] Hoyningen-Huene W V, Posse P. Nonsphericity of aerosol particles and their contribution to radiative forcing [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1997, **57**(5): 651–668.
- [6] Dubovik O, Sinyuk A, Lapyonok T, *et al.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**(D11): D11208.
- [7] Cheng T H, Gu X F, Yu T, *et al.* The reflection and polarization properties of non-spherical aerosol particles [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2010, **111**(6): 895–906.
- [8] Herman M, Deuzé J L, Marchand A, *et al.* Aerosol remote sensing from POLDER//ADEOS over the ocean: Improved retrieval using a nonspherical particle model [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(D10): D10S02.
- [9] Li Z, Gu X, Wang L, *et al.* Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, **13**(2): 10171–10183.
- [10] Mishchenko M I, Travis L D. Capabilities and limitations of a current fortran implementation of the T-Matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatterers [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1998, **60**(3): 309–324.
- [11] HU Shuai, GAO Tai-Chang, LI Hao, *et al.* Atmospheric polarization pattern simulation for small solar elevation angles and the analysis of atmospheric effect [J]. *Acta Phys. Sin.* (胡帅, 高太长, 李浩, 等. 低太阳高度角条件下的天空偏振模式模拟及大气折射影响研究. *物理学报*), 2016, **65**(1): 014203.
- [12] Hu Shuai, Gao Tai-Chang, Li Hao, *et al.* Effect of atmospheric refraction on radiative transfer in visible and near-infrared band: Model development, validation, and applications [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 2016, 121, doi: 10.1002/2015JD024105.
- [13] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC [J]. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 1998, **79**(5): 831–844.