

t

气溶胶空间非均匀性对近红外辐射传输的影响分析

陈 鸣¹, 胡 帅^{1*}, 高太长¹, 李 浩¹, 程天际¹, 刘 磊¹, 喻学峰²

¹解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101;

²中国人民解放军 77560 部队, 西藏 拉萨 851501

摘要 为了解气溶胶空间非均匀性对近红外辐射传输过程的影响,构造了典型非均匀气溶胶场,采用辐射传输模式球谐离散坐标法(SHDOM)模拟了对应情形下的漫射光强、偏振特性以及辐射通量密度,定量分析了将非均匀气溶胶场等效为均匀场造成的模拟误差。研究结果表明,气溶胶非均匀场对辐射传输过程影响显著,且它对漫射光偏振辐射亮度的影响大于它对辐亮度的影响,其中气溶胶空间非均匀性造成的辐亮度及偏振辐亮度模拟误差分别可达 9.8% 和 80%。气溶胶水平非均匀性主要影响漫射光辐亮度及偏振辐亮度模拟误差的空间分布特征,垂直不均匀性基本不改变漫射光模拟误差的空间分布特征,但它对辐射传输过程的影响明显大于水平不均匀性。随着气溶胶浓度的增加,气溶胶非均匀性造成的模拟误差整体降低。从量级上,气溶胶空间非均匀性对辐射通量密度的影响明显弱于漫射光辐亮度和偏振辐亮度,多数情形下,其模拟误差小于 5%,且该误差随高度的变化呈特定分布特征。可为平面平行大气辐射传输模式适用范围的确定,气溶胶空间非均匀性导致的遥感误差的评估提供一定参考。

关键词 大气光学; 非均匀气溶胶场; 球谐离散坐标法; 均匀等效误差; 辐射传输模拟

中图分类号 P407.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0101003

Study on the Effect of Inhomogeneous Aerosol Fields on Radiative Transfer Process in Near-Infrared Band

Chen Ming¹, Hu Shuai¹, Gao Taichang¹, Li Hao¹, Cheng Tianji¹,
Liu Lei¹, Yu Xuefeng²

¹ College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China;

² No. 77560 Army of PLA, Lasa, Tibet 851501, China

Abstract To investigate the influence of inhomogeneous aerosol field on radiative transfer process in near-infrared band, representative inhomogeneous aerosol fields are constructed, and the radiance, polarized radiance and flux density of the diffuse light are simulated by the radiative transfer model spectral harmonics discrete ordinary method (SHDOM) for different aerosol fields. In addition, the simulation error caused by taking the inhomogeneous aerosol fields as plane-parallel ones is analyzed numerically as well. Simulation results indicate that, inhomogeneous distribution of the aerosol particles has significant influence on the radiative transfer, and the simulation error of the polarized radiance caused by the inhomogeneity of the aerosol field is higher than that of radiance, where the simulation error of radiance and polarized radiance can reach 9.8% and 80%, respectively. Horizontal inhomogeneity of the aerosol field has a great influence on the simulation error distribution of radiance and polarized radiance, while the vertical inhomogeneity has a more notable effect on the radiative transfer process and has no significant influence on the distribution. As the aerosol concentration increases, simulation error caused by the inhomogeneity of aerosol fields gradually decreases. The simulation error of flux density is smaller than that of radiance and polarized radiance in magnitude, which is less than 5% for most case. It is also found that the variation of the simulation error with

收稿日期: 2016-05-12; 收到修改稿日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41575025,41575024)

作者简介: 陈 鸣(1992—),男,硕士研究生,主要从事大气辐射传输与大气遥感方面的研究。

E-mail: 2481724223@qq.com

导师简介: 高太长(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事军事大气探测理论与技术方面的研究。

E-mail: 2009gaotc@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: hushuai2012@hotmail.com

height shows specific distribution characteristics. This work will be helpful for both the determination of applicable scope of the plane-parallel atmospheric radiative transfer models and the estimation of error caused by the aerosol field inhomogeneity in remote sensing process.

Key words atmosphere optics; inhomogeneous aerosol field; spherical harmonics discrete coordinate method; homogeneous equivalent error; radiative transfer simulation

OCIS codes 010.1100; 010.5620; 280.1100; 010.0280

1 引 言

大气辐射传输是指太阳辐射能和热辐射能以电磁波的形式在大气中的传播输送和转化的过程^[1]。在可见近红外波段,电磁波在大气传输过程中,会被气溶胶粒子吸收和散射^[2],这一方面可导致漫射光辐亮度及偏振特性的改变^[3-4],使之成为气溶胶光学特性和微物理参数的调制载体,这一现象奠定了大气气溶胶遥感的物理基础^[5-6];另一方面,气溶胶散射吸收特性的变化可改变地球的行星反照率,进而影响地气系统能量收支平衡,改变地球气候^[7-8],因此准确了解并模拟气溶胶对辐射传输过程的影响,无论是对于气溶胶遥感还是气候学研究都是极其重要的^[8]。

在气溶胶光学遥感和气候数值模拟过程中,辐射传输模式发挥着极其重要的作用^[9]。如对于 AVHRR、MODIS 和 POLDER/PARASOL 等遥感器,辐射传输模式是遥感过程的正演算子,是决定遥感精度的重要一环;对于气候模拟,辐射传输模式是气候数值模式的重要子模块,是准确模拟大气加热过程的关键。为实现辐射传输过程的准确模拟,已经建立了许多标量辐射传输模式(仅考虑光强度信息),近似解法包括二流近似、四流近似、单散射近似等,精确解法包括离散坐标法^[10]、累加一倍加法等^[1,11]。为提高辐射传输的模拟精度和信息量,在模型中引入了电磁波的偏振信息,进一步开展了矢量辐射传输模型研究,目前建立的计算模型包括基于累加倍加法的 RT3/PolRadtran^[12-13],矢量化的离散坐标法 VDISORT^[14]、逐次散射法^[15]、Monte Carlo 法^[16-18]以及胡帅等^[19]建立的 VSPART 矢量辐射传输模型等,其中离散坐标法、累加一倍加法、逐次散射法及相应的矢量化模型广泛用于气溶胶标量和偏振光学遥感^[20],二流近似、四流近似等方法则广泛用于气候模拟。在这些模型中,辐射传输过程的求解主要基于平面平行大气假设^[21],即要求大气各成分,如气体、气溶胶及云,是分层均匀的,并不考虑其水平方向的分布不均匀性对辐射传输过程的影响^[1,22-23]。但实际上,受地形地域差异、大气湍流、大气对流及大气输送等因素的影响,真实大气并不是分层均匀的,特别是云和气溶胶,其水平不均匀性更加显著,这必然导致漫射光强度及偏振特性、辐射通量密度模拟结果的偏差,进而影响气溶胶遥感及气候数值模拟的精度^[24]。因此,为进一步提高气溶胶遥感及气候模拟精度,有必要定量估计空间非均匀大气条件下的平面平行大气辐射传输模式的模拟偏差,进而为确定平面平行大气辐射传输模式的适用范围、定量评估气溶胶空间非均匀性导致的气溶胶标量及偏振光学遥感偏差及气候模拟误差等提供参考。

本文首先构建了典型的空间非均匀气溶胶场及等效的分层均匀场,基于三维矢量辐射传输模式球谐离散坐标法(SHDOM)分别模拟了近红外波段的云顶及地表的漫射光辐亮度、偏振辐亮度及辐射通量密度,讨论了两种情形下的漫射光强及偏振特性的偏差,然后分析水平非均匀气溶胶场对辐射通量密度模拟结果的影响,其中模拟波长为 $0.865 \mu\text{m}$,该波长在 PARASOL 的一个测量波段内,也与 CE318 的偏振通道(870 nm)相近。

2 研究方法及思路

2.1 研究思路

研究的基本思路如图 1 所示,基于 Mie 散射理论生成粒子散射特性库(不同粒径和复折射率),分别构造空间非均匀气溶胶场及与之等效的分层均匀场(简称“等效均匀场”),每个网格点上采用粒子有效半径、质量浓度及复折射率等气溶胶微物理参数表征。然后综合粒子散射特性库、气溶胶场参数和大气分子的瑞利散射参数,生成网格化的三维光学特性场,其中各网格点采用消光系数、单散射反照率及穆勒矩阵等三个参数进行表征。以三维光学特性参数为输入,基于辐射传输模式 SHDOM 分别模拟不同非均匀场情形下的漫射光辐亮度、偏振辐亮度和漫射辐射通量密度,最后定量分析非均匀场与等效均匀场模拟结果的相对偏差,

为目前常用的平面平行大气的辐射传输模式模拟误差的评估和适用范围确定提供依据。

为定量评价将非均匀气溶胶场等效为水平分层均匀场造成的模拟偏差,定义均匀等效误差 M 如(1)式所示,式中 X 为非均匀气溶胶场条件下模拟得到的漫射光归一化辐亮度、偏振辐亮度或辐射通量密度, X_{hmg} 为对应的等效均匀场条件下的模拟结果。漫射光归一化辐亮度 L_1 和偏振辐亮度 L_p 的定义如(2)式和(3)式所示^[25],式中 θ 和 φ 为观测天顶角和方位角, μ_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 、 U 和 V 为漫射光 Stokes 矢量的四个元素。天顶上行漫射光及地面下行漫射光的观测几何(θ, φ)采用图2的方式进行确定。

$$M = (|X - X_{\text{hmg}}| / X_{\text{hmg}}) \times 100\% \tag{1}$$

$$L_1(\theta, \varphi) = \pi I(\theta, \varphi) / (\mu_0 F_0) \tag{2}$$

$$L_p(\theta, \varphi) = \sqrt{Q^2(\theta, \varphi) + U^2(\theta, \varphi) + V^2(\theta, \varphi)} / \mu_0 F_0 \tag{3}$$

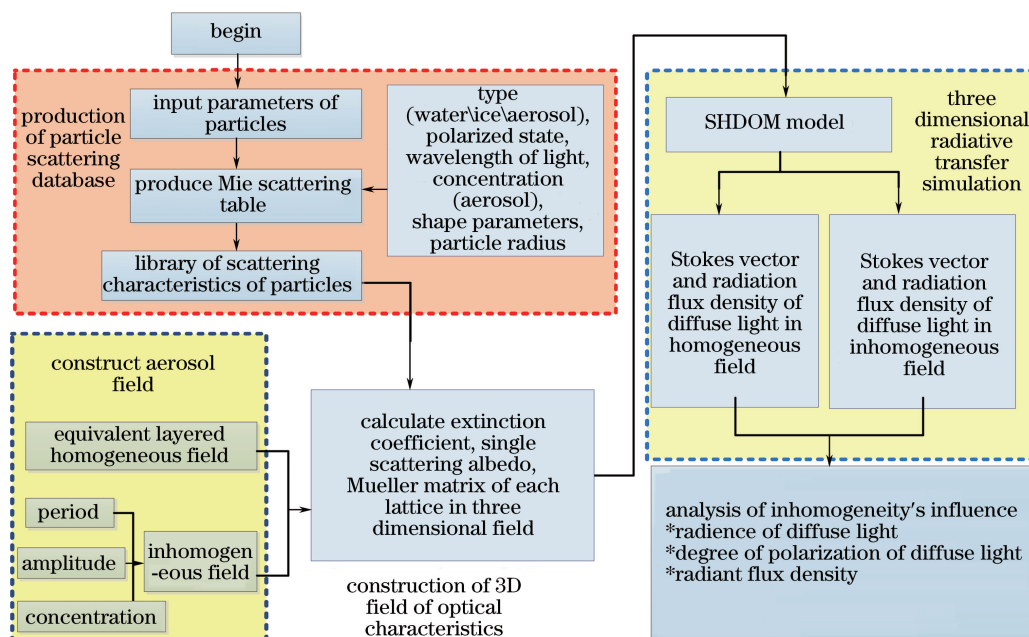


图 1 模拟和研究方案

Fig. 1 Scheme of the simulation and study

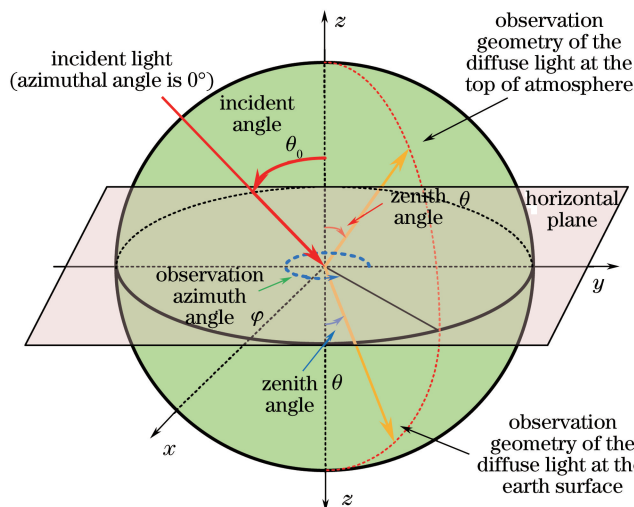


图 2 天顶上行漫射光及地面下行漫射光的观测几何

Fig. 2 Observation geometry of the diffuse light at the earth surface and the top of atmosphere

2.2 空间非均匀场的构建方案

SHDOM 是由 Evans 开发的三维辐射传输模式(考虑多次散射效应)^[26],其计算精度已得到广泛检验^[27-28]。在辐射传输模拟过程中,空间坐标采用高斯离散节点法进行离散。积分辐射强度采用的是离散坐标法进行计算,在处理散射项时采用的是球谐函数法。因此可供用户构建自定义的气溶胶场进行模拟。

为定量描述气溶胶的空间不均匀性,采用以下典型方式构造非均匀气溶胶场:如图 3(a)所示(仅为示意图),整层大气分为五层,参考气溶胶标高的物理含义,气溶胶质量浓度随高度呈指数下降^[29],标高取 1 km。由于真实大气运动是以波动形式传播的(波状云是其外在体现),因此假设气溶胶层以空间波动的形式体现其空间分布的不均匀性,该不均性通过两个参数进行表征,一个是波动的水平周期,表征气溶胶场在水平方向的波动频率,另一个是垂直波动振幅,表征的是气溶胶场的垂直波动性强弱分布。为定量评估非均匀场的影响,同时构造了与非均匀场等效的水平分层均匀场,如图 3(b)所示。在该等效均匀场中,各水平均匀层内的气溶胶质量浓度看成是在非均匀场相应区域内所有网格点上气溶胶质量浓度的平均。构造的非均匀场与等效均匀场的网格点总数相同,水平方向共有 320 个点,网格点间的间距为 $a=0.0725$ km,垂直方向共 101 个点,总高度为 3.593 km,网格点间的间距为 $b=0.03593$ km。

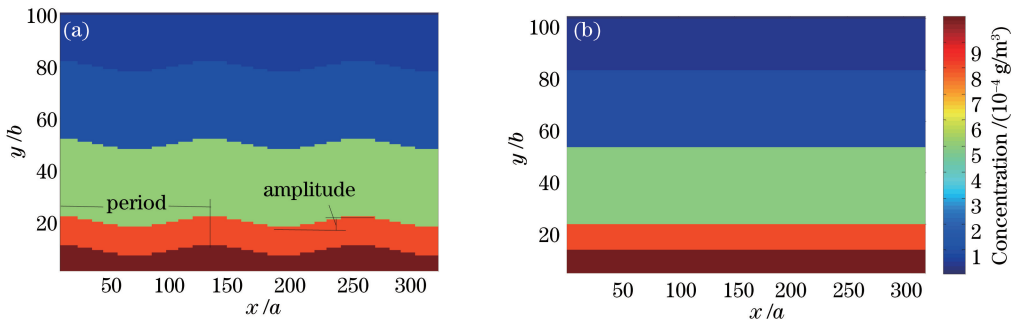


图 3 (a) 非均匀场; (b) 等效均匀场

Fig. 3 (a) Inhomogeneous field; (b) equivalent homogeneous field

3 研究结果分析及讨论

3.1 波动水平周期对辐射传输过程的影响分析

取太阳入射角为 60° ,方位角为 0° ,地面气溶胶质量浓度取 0.001 g/m^3 (总光学厚度约为 1.0),设置非均匀场的水平波动周期为 1.25, 0.625, 0.3125 km,分别构建了三种非均匀场。结合粒子散射特性库共同作为 SHDOM 的输入参数,分别计算各非均匀场情况下天顶向上和地面向下的漫射辐射强度和偏振辐亮度,并将模拟结果与等效均匀场条件下的模拟结果进行了比较。图 4 和图 5 分别表示漫射光辐亮度和偏振辐亮度

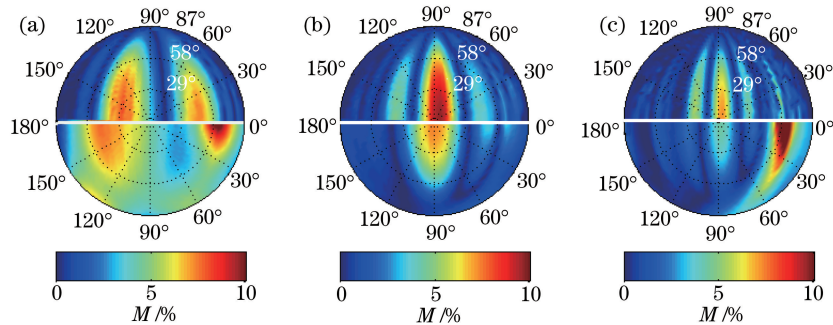


图 4 不同水平波动周期条件下,漫射光辐亮度的均匀等效误差分布。上半球表示天顶上行漫射光,

下半球表示地面向下漫射光。水平波动周期分别为 (a) 1.25 km; (b) 0.625 km; (c) 0.3125 km

Fig. 4 Homogeneous equivalent error of the diffuse light radiance under different horizontal fluctuate period.

The hemisphere above is for the diffuse light at the top of atmosphere. The hemisphere below is for the diffuse light at the surface. The horizontal fluctuate period is set as (a) 1.25 km; (b) 0.625 km; (c) 0.3125 km

的均匀等效误差分布。考虑到不同方向漫射辐亮度的对称性,图 4 是在同一幅图中同时显示天顶上行和地面下行漫射光的均匀等效误差,其中上半球表示天顶上行漫射光,下半球表示地面下行漫射光。

非均匀场水平波动周期对辐亮度的影响分析。由图 4 可知,水平波动周期对漫射光辐亮度具有显著影响,其中当非均匀场水平波动周期为 1.25 km 时,如图 4(a),地面及天顶漫射光辐亮度的均匀等效误差分别达到 9.8% 和 7.5%。均匀等效误差较大的区域呈条带状分布,且大致以天顶为中心对称分布。随着水平波动周期减小,如图 4(b)和 4(c),条带状结构数量逐渐增加,与非均匀场的水平周期波动的特征总体相对应。整体而言,漫射辐亮度的均匀等效误差值随水平波动周期的减小而减小,其原因是水平波动周期减小至一定程度后,非均匀场趋于水平均匀状态。

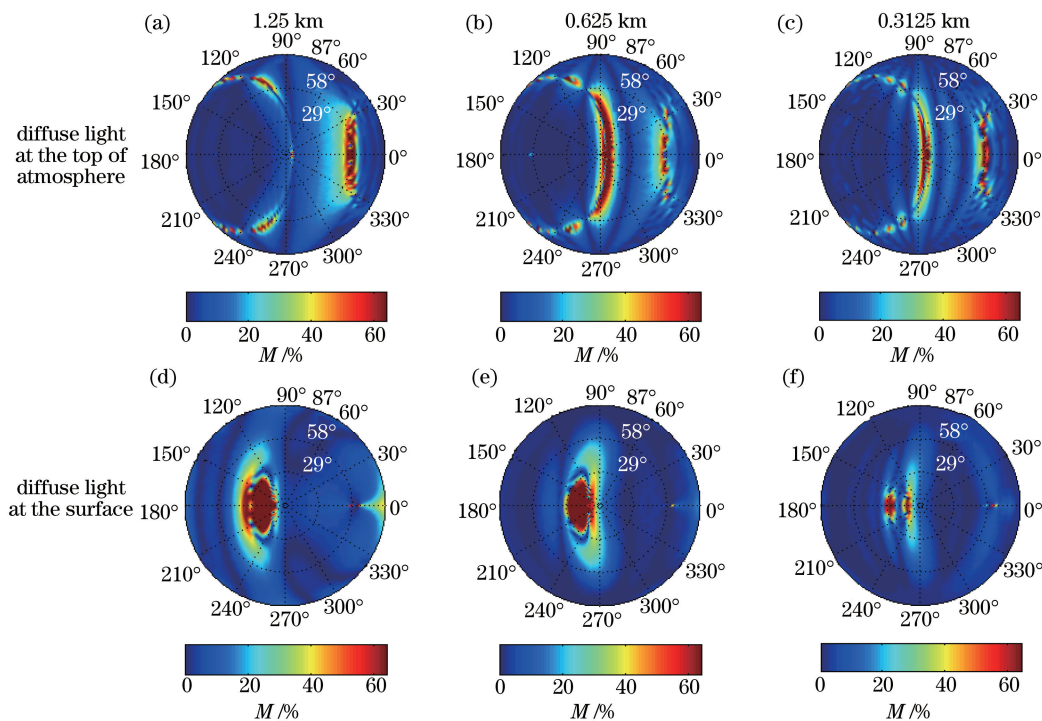


图 5 不同水平波动周期条件下,偏振辐亮度的均匀等效误差分布

Fig. 5 Homogeneous equivalent error of the polarized radiance under different horizontal fluctuate period

非均匀场水平波动周期对漫射光偏振辐亮度的影响分析。由图 5 可知,非均匀场水平波动周期对漫射光偏振辐亮度的影响明显强于对辐亮度的影响,其中当水平波动周期为 1.25 km 时,如图 5(a)和 5(d),天顶上行及地面下行漫射光的最大均匀等效误差可达 60% 和 80%。对于天顶上行漫射光,均匀等效误差较大的区域包括两部分:一部分均位于右半球,在方位角 30°~330°,天顶角 55°~65°区域;另一部分是位于天顶的圆弧状区域(方位角 80°~140°和 220°~280°区间)。随着非均匀场水平波动周期的减小,位于右半球的第一大误差区域的均匀等效误差值有明显减小,而天顶的圆弧状区域(第二大误差区域)的误差值却呈现先增大后减小的特征。对于地面下行漫射光,水平波动周期对漫射光偏振辐亮度的影响主要分布在天顶区域(方位角 120°~240°,天顶角 0°~50°,均匀等效误差呈椭圆状分布)及太阳入射方向附近。随着水平波动周期变小,均匀等效误差逐渐减小,这是由于周期越小,其形态越接近于均匀场,对偏振辐亮度的影响越小。无论天顶还是地面漫射光,随着非均匀场水平波动周期的减小,偏振辐亮度均匀等效误差的条带状分布结构也随之加密,周期性结构也更为显著,说明气溶胶的水平不均匀性可能对均匀等效误差的空间分布特征影响显著。

非均匀场水平波动周期对漫射辐射通量密度的影响分析。分别模拟不同高度处的向上和向下的漫射辐射通量密度,并计算非均匀场及其等效均匀场情况下模拟结果的相对误差,定义相对误差 M_r 为

$$M_r = [(X - X_{hmg}) / X_{hmg}] \times 100\% \quad (4)$$

计算结果如图 6 所示。由图可知,将非均匀场等效为水平分层均匀场可造成显著的辐射通量密度模拟偏差,且在不同高度处,相对误差还呈现特定的分布特征。对于下行辐射通量密度,在 2.5~3 km 和 1.7~2 km 高

度区间,将水平不均匀场等效为水平均匀场,可能低估了实际的辐射通量密度值,其中最大相对误差可达6.3%。随着周期的减小,相对误差略有增大,但对整体误差分布影响不大。在0.5~1.7 km 区间,等效均匀场则可能高估实际的下行辐射通量密度值,且随着高度的增加,相对误差增大,其绝对值最大可达2.1%;随着周期的减小,相对误差略有减小。

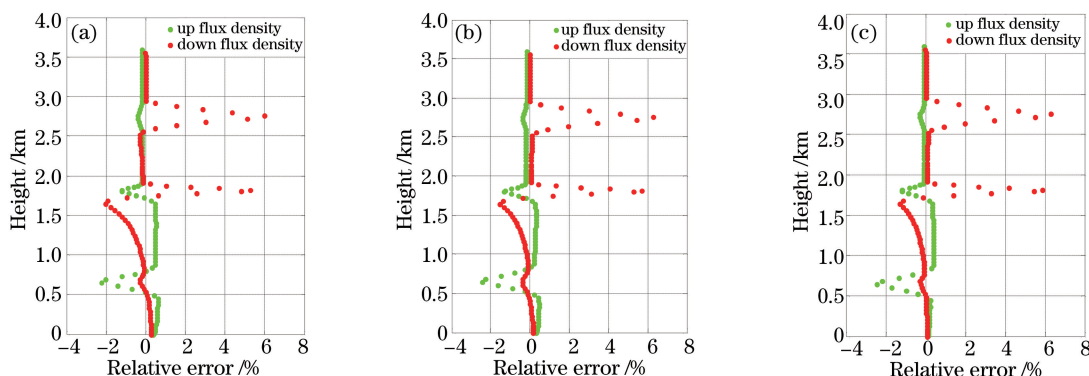


图6 不同高度处辐射通量密度的相对误差。水平波动周期分别为(a) 1.25 km; (b) 0.625 km; (c) 0.3125 km
 Fig. 6 Relative error of the radiation flux density under different height. The horizontal fluctuate period is set as (a) 1.25 km, (b) 0.625 km, (c) 0.3125 km, respectively

对于上行辐射通量密度,在0~0.5 km 和0.8~1.6 km 区间,相对误差为正值,量级在0.7%左右,说明将水平非均匀场等效为水平均匀场会低估实际辐射通量密度值,但模拟偏差不大。随着水平波动周期的减小,该误差值减小。在0.5~0.8 km、1.7~2.0 km 及2.5~3 km 区间,等效均匀场模拟的辐射通量密度高于实际非均匀场的模拟值,相对误差值为负,且该误差值并不随着非均匀场水平波动周期的改变而产生显著变化。

3.2 垂直振幅对辐射传输过程的影响分析

固定非均匀场的水平波动周期为1.25 km,分别设置其垂直振幅为71.86,179.65,215.58 m,模拟计算各非均匀场条件下的漫射辐亮度、偏振辐亮度与辐射通量密度,并将其与等效均匀场情况下的模拟结果进行比较,结果如图7~9所示,其中图7和图8分别为漫射光辐亮度和偏振辐亮度的均匀等效误差分布,图9为各高度处辐射通量密度的相对误差分布。

非均匀场的垂直振幅对辐亮度的影响分析。由图7可知,非均匀场垂直方向的波动性可造成较大的漫射光辐亮度模拟偏差,且随着垂直振幅的增大,均匀等效误差明显增大。其中当垂直振幅为71.86 m时,如图7(a),地面及天顶漫射光辐亮度的均匀等效误差分别为3.9%和5%,而垂直振幅为179.65 m,如图7(b),最大均匀等效误差可达垂直振幅为71.86 m时的近三倍。分析上述现象原因,随着非均匀场垂直振幅增加,气溶胶光学特性的空间非均匀性越显著,相应的对辐射传输过程的影响也越大。对比三幅图还可发现,非均

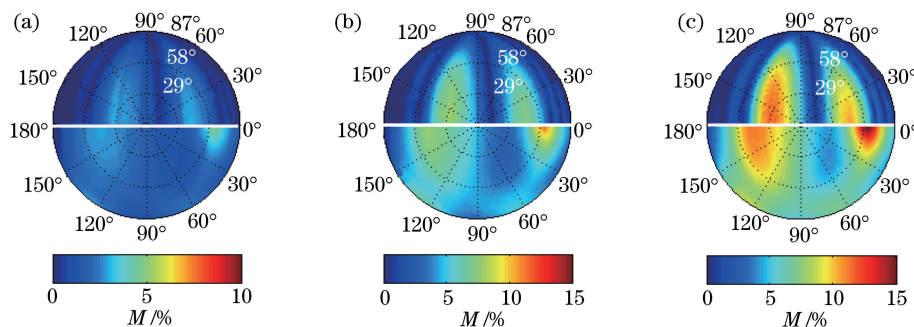


图7 不同垂直振幅条件下,漫射光辐亮度的均匀等效误差分布。上半球表示天顶上行漫射光,下半球表示地面下行漫射光。
 垂直振幅分别为(a) 71.86 m; (b) 179.65 m; (c) 215.58 m

Fig. 7 Homogeneous equivalent error of the diffuse light radiance under different vertical amplitude. The hemisphere above is for the diffuse light at the he top of atmosphere. The hemisphere below is for the diffuse light at the surface. The vertical amplitude is set as (a) 71.86 m; (b) 179.65 m; (c) 215.58 m

匀场垂直振幅的改变并不影响均匀等效误差的分布特征,但随着垂直振幅增大,气溶胶非均匀场的周期性空间结构越明显。

非均匀场垂直振幅对漫射光偏振辐亮度的影响。由图 8 可知,非均匀场垂直振幅对漫射光偏振辐亮度的影响明显大于对辐亮度的影响,且偏振辐亮度均匀等效误差随垂直振幅的增加而增大。其中当垂直振幅为 71.86 m 时,如图 8(a)和 8(d),天顶上行及地面下行漫射光的最大均匀等效误差分别达 60%和 70%。当垂直振幅为 215.58 m 时,如图 8(c)和 8(f),天顶上行及地面下行漫射光的最大均匀等效误差分别达 65%和 80%。与辐亮度相似,非均匀场垂直振幅的变化并不改变偏振辐亮度均匀等效误差的分布。其中对于天顶漫射光,偏振辐亮度的均匀等效误差较大的区域始终位于天顶的圆弧形区域以及位于左半球方位角 $30^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 区间的条带状区域;对于地面漫射光,误差较大的区间始终位于天顶的椭圆形区域以及方位角 0° ,天顶角 $65^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 区域附近。

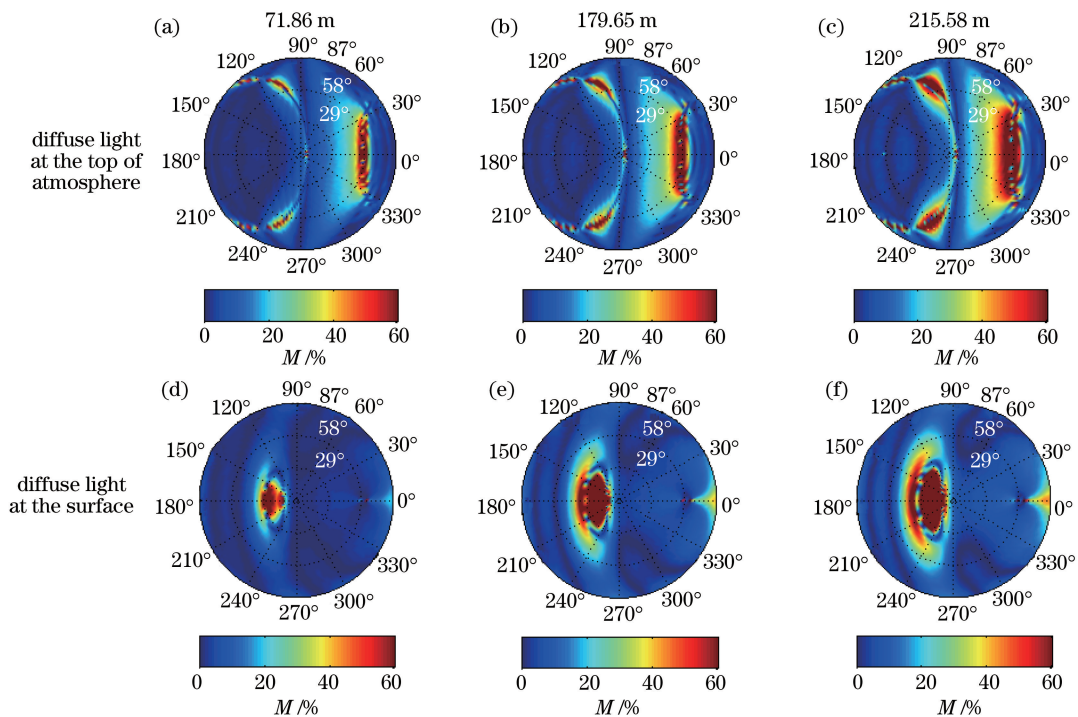


图 8 不同垂直振幅条件下,偏振辐亮度的均匀等效误差分布

Fig. 8 Homogeneous equivalent error of the diffuse light polarized radiance under different vertical amplitude

非均匀场垂直振幅对辐射通量密度的影响分析。由图 9 可知,与 3.1 节讨论相似,非均匀场对不同高度上辐射通量密度相对误差有着不同程度的影响,且随着非均匀场振幅的增大,相对误差迅速增大,且误差值

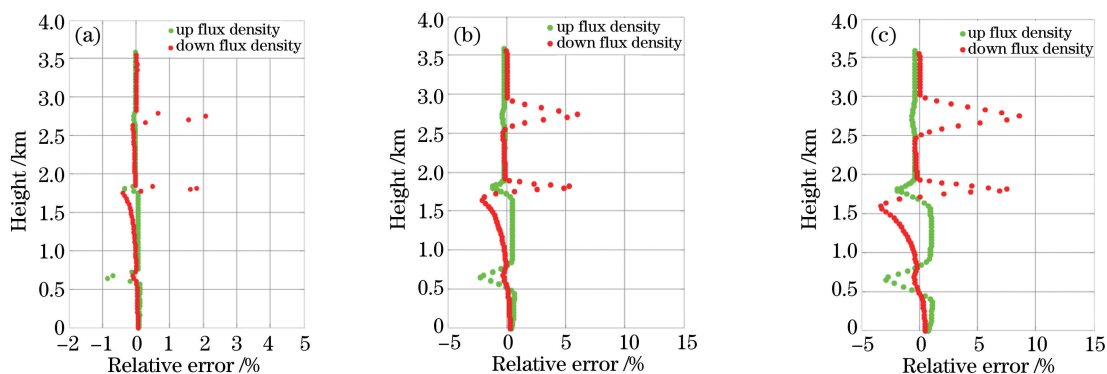


图 9 辐射通量密度相对误差随高度的变化。垂直振幅分别为(a) 71.86 m;(b) 179.65 m;(c) 215.58 m

Fig. 9 Relative error of the radiation flux density versus height. The vertical amplitude is set as

(a) 71.86 m, (b) 179.65 m, and (c) 215.58 m, respectively

较大的高度区间范围也随之增宽,其中当振幅为 71.86 m 时,如图 9(a),其最大相对误差仅为 2%。当振幅为 179.65 m 时,如图 9(b),下行漫射辐射通量密度的最大相对误差增至 6.3%。当振幅为 215.58 m 时,在 2 km 和 3 km 附近,最大相对误差值达到 8.5%,对应的大误差值高度区间扩展至振幅为 71.86 m 情形下的近两倍。在 0.5~1.7 km 区间,随着垂直振幅的增加,误差变化的速率也随之增大,当振幅为 179.65 m 时,误差变化梯度仅为 2.3%/km,当振幅为 215.58 m 时误差的变化梯度可达 4.2%/km。

对于上行辐射通量密度,与 3.1 节讨论相似,在 0~0.5 km 和 0.8~1.6 km 区间,将水平非均匀场等效为水平均匀场可能低估实际辐射通量密度值,且其相对误差随垂直振幅增加而增加,其中三幅图对应最大相对误差可达 0.3%,0.8%,1.2%。在 0.5~0.8 km、1.6~2.0 km 及 2.5~3 km 区间,等效均匀场模拟的辐射通量密度高于实际非均匀场的模拟值,且随着非均匀场垂直振幅增大,相对误差值和所对应的高度区间也增大。

3.3 气溶胶浓度对辐射传输过程的影响分析

固定非均匀场的水平波动周期为 1.25 km,垂直振幅为 143.72 m,分别取各网格点上的气溶胶质量浓度为 3.1 节所设置浓度值的 0.5 倍、1 倍、1.5 倍和 2 倍,模拟漫射光辐亮度、偏振辐亮度的均匀等效误差和辐射通量密度的相对误差,如图 10~12 所示。

非均匀场的气溶胶质量浓度对辐亮度的影响分析。由图 10 可知,质量浓度变化虽然对辐亮度的均匀等效误差影响显著,但基本不改变误差的分布特征。其中当气溶胶浓度为 0.5 倍时,如图 10(a),其最大均匀等效误差仅为 6.7%,当气溶胶质量浓度为原来的 2 倍时,如图 10(d),最大均匀等效误差达到 12.2%。对于天顶上行漫射光,随着气溶胶质量浓度的增加,位于左半球的误差值较大区域(方位角 $90^{\circ}\sim 180^{\circ}$)的范围逐步扩大,但位于右半球的误差值较大区域(方位角 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$)却略有减小。浓度变化对地面下行漫射光辐亮度的影响明显强于天顶上行漫射光,其中在方位角 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 区间,该影响尤为显著。随着质量浓度增加,地面漫射光的均匀等效误差整体增大,误差分布也更加分散和均匀,出现这种现象的原因可能是随着气溶胶质量浓度递增,其光学厚度增加,多次散射效应增强,使得非均匀场对漫射光的影响平均于各方向上。

气溶胶质量浓度对漫射光偏振辐亮度的影响分析。由图 11 中可以看出,对于天顶上行漫射光,气溶胶质量浓度的变化并未改变偏振辐亮度的均匀等效误差分布特征,其值较大的区域仍为两部分:一部分是天顶的月牙形区域;另一部分是右半球的带状区域。随着质量浓度的增加,第一块大误差值区变得细长,均匀等效误差变小,第二块大误差值区域形状也逐渐变得狭长。与上述讨论类似,造成该现象的原因是气溶胶多次散射效应增强,非均匀场导致的漫射光偏振特性差异被平均。对于地面下行漫射光,气溶胶质量浓度对均匀等效误差的分布特征影响显著。当浓度为 0.5 倍时,如图 11(a)和 11(e),均匀等效误差较大的区域在左半球天顶角 60° 方向附近,呈细弧状分布,最大值达 48%;当浓度为 1 倍时,如图 11(b)和 11(f),误差较大区域逐步集中,在天顶呈椭圆形分布;随着气溶胶质量浓度进一步增大,均匀等效误差值明显减小,浓度为 2 倍时,如图 11(d)和 11(h),等效均匀误差最大仅为 28%。造成该现象的原因主要是浓度变大使得气溶胶场光

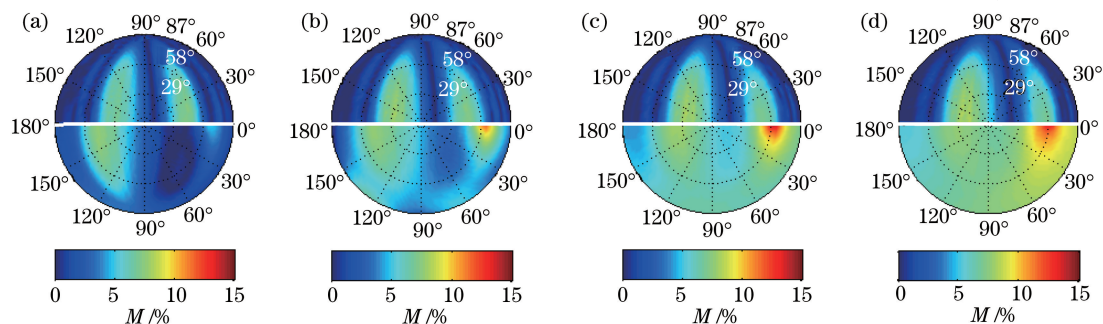


图 10 不同气溶胶质量浓度条件下,漫射光辐亮度的均匀等效误差分布。上半球表示天顶上行漫射光,下半球表示地面下行漫射光。质量浓度分别为 3.1 节中的(a) 0.5 倍;(b) 1 倍;(c) 1.5 倍;(d) 2 倍

Fig. 10 Homogeneous equivalent error of the diffuse light radiance under different aerosol mass concentration. The hemisphere above is for the diffuse light at the top of atmosphere. The hemisphere below is for the diffuse light at the surface. The aerosol mass concentration is set as (a) 0.5, (b) 1.0, (c) 1.5 and (d) 2.0 times the concentration in section 3.1

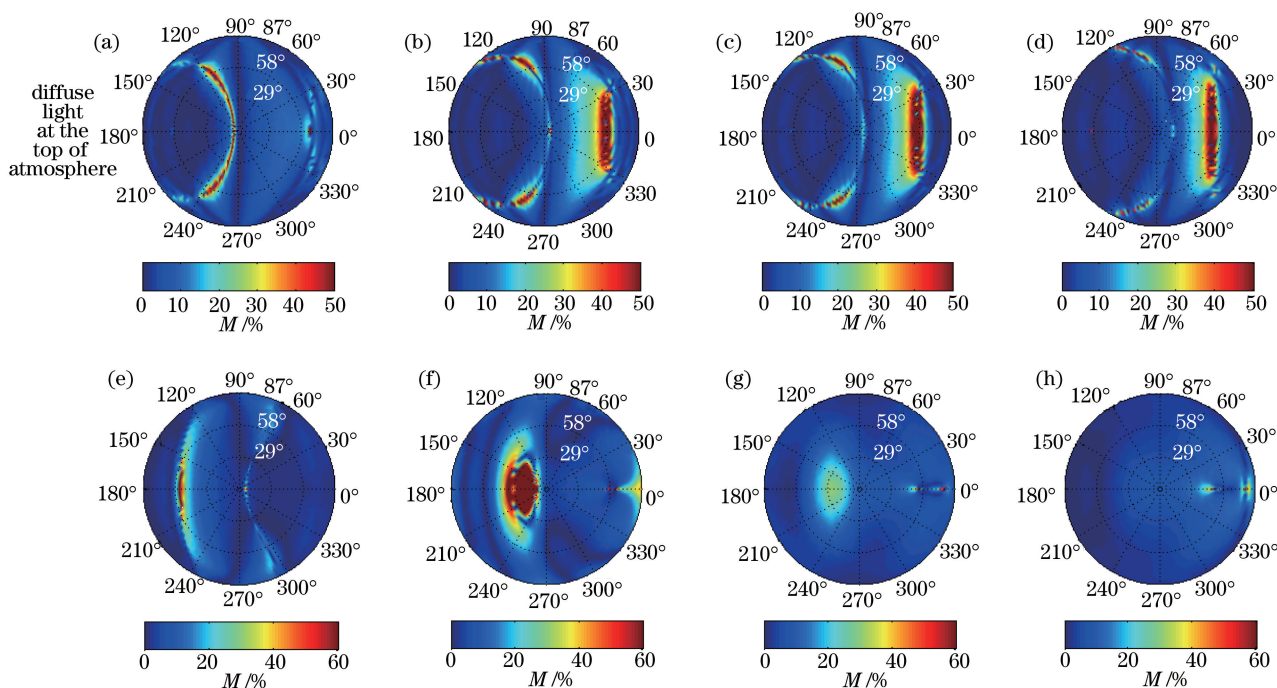


图 11 不同气溶胶质量浓度条件下,偏振辐亮度的均匀等效误差分布。气溶胶质量浓度分别为 3.1 节中浓度的(a)、(e) 0.5 倍;(b)、(f) 1 倍;(c)、(g) 1.5 倍;(d)、(h) 2 倍

Fig. 11 Homogeneous equivalent error of the polarized radiance under different aerosol mass concentration.

The aerosol mass concentration is set as (a), (e) 0.5; (b), (f) 1.0; (c), (g) 1.5;

(d), (h) 2.0 times the concentration in section 3.1

学厚度加大,光线多次散射效应增强,非均匀场造成的漫射光差异被平均和减弱。

气溶胶质量浓度对辐射通量密度的影响分析。由图 12 可知,气溶胶质量浓度变化基本不改变辐射通量密度相对误差的分布特征。对于向下漫射光,值得注意的一个现象是,当质量浓度为 0.5 倍时,如图 12(a), 0.5~0.9 km 高度处误差为正值,将水平不均匀场等效为水平均匀场,可能低估了实际的辐射通量密度,随着质量浓度变大,相对误差由正转负,并向负方向不断增大。其中当气溶胶质量浓度为 2 倍时,如图 12(d),相对误差绝对值可达 2%。在 1.6~1.9 km、2.5~3 km 高度处,相对误差随着质量浓度增加而略有减小。对于向上辐射通量密度,随着气溶胶质量浓度增加,相对误差整体增大,其中在 0~1.6 km 高度处影响最为明显,说明近地面层向下漫射辐射通量密度对质量浓度的敏感性较强,造成这种现象的原因是气溶胶质量浓度随高度指数递减(气溶胶在近地面较集中),气溶胶质量浓度增加对近地面影响相对较大,因此相应的敏感性也有所增强。

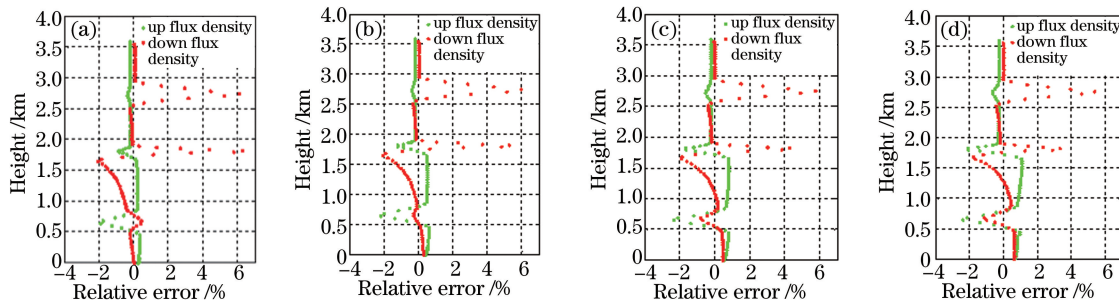


图 12 不同高度处辐射通量密度的相对误差。非均匀场气溶胶质量浓度分别为 3.1 节设置浓度的 (a) 0.5 倍;(b) 1 倍;(c) 1.5 倍;(d) 2 倍

Fig. 12 Relative error of the radiation flux density versus height. The aerosol mass concentration of the inhomogeneous

field is set as (a) 0.5, (b) 1.0, (c) 1.5 and (d) 2.0 times the concentration in section 3.1

4 小 结

为研究气溶胶空间非均匀性对辐射传输过程的影响,构建了典型的非均匀气溶胶场,其空间非均匀性采用水平波动周期、垂直振幅及质量浓度共同描述。在不同非均匀场情况下,采用 SHDOM 模式分别模拟了漫射光的辐亮度、偏振辐亮度及漫射辐射通量密度,并将其与对应的等效均匀场条件下的模拟结果进行了对比,并对均匀等效误差和相对误差的变化特征进行了分析,得到的主要结论如下。1) 非均匀场的水平波动对漫射光影响显著,且其对漫射光偏振辐亮度的影响强于辐亮度,由于气溶胶水平不均匀性造成漫射光辐亮度和偏振辐亮度的均匀等效误差可达 9.8% 和 80%;均匀等效误差较大的区域呈条带状分布,与非均匀场的水平非均匀的特征相对应;随着气溶胶场水平波动周期的减小,将水平不均匀场等效为水平均匀场造成的误差随之减小;辐射通量密度相对误差随高度的变化呈现特定分布特征,水平波动周期对各高度的辐射通量密度的总体影响不大。2) 非均匀场的垂直振幅并不改变漫射光辐亮度及偏振辐亮度均匀等效误差的分布特征,但随着振幅的增加,均匀等效误差迅速增大;辐射通量密度对非均匀场垂直振幅也较为敏感,当振幅为 215.58 m 时,最大相对误差可达 8.5%;从相对误差大小上看,非均匀场垂直振幅对辐射传输过程的影响强于水平波动周期。3) 质量浓度的变化基本不改变辐亮度、天顶漫射光的偏振辐亮度均匀等效误差的空间分布特征,但它对地面下行漫射光偏振辐亮度影响显著;随着气溶胶质量浓度的增加,漫射光辐亮度的均匀等效误差随之增大,但偏振辐亮度却随之呈先增大后减小的特征;辐射通量密度的相对误差随高度的分布特征总体受气溶胶质量浓度影响不大。

为简化处理,仅仅构建了简单的正弦波动形式的气溶胶非均匀场,下一步工作中,将对更为复杂的非均匀气溶胶场和云场进行均匀等效误差的分析,并在此基础上,将现有实验结果应用到实际气溶胶卫星遥感及地基遥感情形中,定量估计气溶胶和云的空间水平非均匀性导致的遥感反演误差。

参 考 文 献

- [1] Liou K N. An introduction to atmospheric radiation[M]. San Diego: Academic Press, 2003.
- [2] Hu Shuai, Gao Taichang, Liu Lei. Analysis on scattering characteristics and equivalent Mie scattering errors of non-spherical atmospheric aerosols[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(6): 612-619.
胡 帅, 高太长, 刘 磊. 非球形气溶胶粒子散射特性及其等效 Mie 散射误差分析[J]. 气象科学, 2014, 34(6): 612-619.
- [3] Cheng T, Gu X, Xie D, *et al.* Aerosol optical depth and fine-mode fraction retrieval over East Asia using multi-angular total and polarized remote sensing[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(3): 501-516.
- [4] Yao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 181-271.
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 181-271.
- [5] Deuzé J L, Goloub P, Herman M, *et al.* Estimate of the aerosol properties over the ocean with POLDER[J]. Journal of the Geophysical Research, 2000, 105(D12): 15329-15346.
- [6] Hu Shuai, Gao Taichang, Liu Lei, *et al.* Simulation of radiation transfer properties of polarized light in non-spherical aerosol using Monte Carlo method[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(9): 094201.
胡 帅, 高太长, 刘 磊, 等. 偏振光在非球形气溶胶中传输特性的 Monte Carlo 仿真[J]. 物理学报, 2015, 64(9): 094201.
- [7] Liou K N, Takano Y. Light scattering by nonspherical particles: remote sensing and climatic implications [J]. Atmospheric Research, 1994, 31(4): 271-298.
- [8] Hu S, Gao T C, Li H, *et al.* Effect of atmospheric refraction on radiative transfer in visible and near-infrared band: model development, validation, and applications[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(5): 2349-2368.
- [9] Cheng Tianhai, Gu Xingfa, Yu Tao, *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.
- [10] Stamnes K, Tsay S, Wiscombe W, *et al.* Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. Applied Optics, 1988, 27(12): 2502-2509.
- [11] de Haan J F, Bosma P B, Hovenier J W. The adding method for multiple scattering calculations of polarized light[J].

- Astronomy and Astrophysics, 1987, 183(2): 371-391.
- [12] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1991, 46(5): 413-423.
- [13] Hovenier J W. Multiple scattering of polarized light in planetary atmospheres [J]. Astronomy and Astrophysics, 1971, 13(1): 7-29.
- [14] Schulz F M, Stamnes K. Angular distribution of the Stokes vector in a plane-parallel vertically inhomogeneous medium in the vector discrete ordinate radiative transfer (VDISORT) model [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2000, 65(4): 609-620.
- [15] Min Q L, Duan M Z. A successive order of scattering model for solving vector radiative transfer in the atmosphere [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 87(3-4): 243-259.
- [16] Vaillon R, Wong B T, Mengüç M P. Polarized radiative transfer in a particle-laden semi-transparent medium via a vector Monte Carlo method [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 84(4): 383-394.
- [17] Ramella-Roman J C, Prahla S A, Jacques S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part I [J]. Optics Express, 2005, 13(12): 4420-4438.
- [18] Ramella-Roman J C, Prahla S A, Jacques S L. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: part II [J]. Optics Express, 2005, 13(25): 10392-10405.
- [19] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, *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.
- [20] Guo Hong, Gu Xingfa, Xie Donghai, *et al.* A review of atmospheric aerosol research by using polarization remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1873-1880.
郭 红, 顾行发, 谢东海, 等. 大气气溶胶偏振遥感研究进展 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1873-1880.
- [21] Hu Shuai, Gao Taichang, Li Hao, *et al.* Influence of atmospheric refraction on radiative transfer at visible light band [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 184203.
胡 帅, 高太长, 李 浩, 等. 大气折射对可见光波段辐射传输特性的影响 [J]. 物理学报, 2015, 64(18): 184203.
- [22] Ricchiuzzi P, Yang S R, Gautier C, *et al.* SBDART: a research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(10): 2101-2114.
- [23] Ben X, Yi H L, Tan H P. Polarized radiative transfer in an arbitrary multilayer semitransparent medium [J]. Applied Optics, 2014, 53(7): 1427-1441.
- [24] Mayer B. Radiative transfer in the cloudy atmosphere [C]. The European Physical Journal Conferences, 2009, 1: 75-99.
- [25] Zhang Su, Zhan Juntong, Bai Sike, *et al.* Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0729001.
张 肃, 战俊彤, 白思克, 等. 烟雾浓度对偏振光传输特性的影响 [J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0729001.
- [26] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, *et al.* Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [27] Evans K F. The spherical harmonics discrete ordinate method for three-dimensional atmospheric radiative transfer [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1998, 55(3): 429-446.
- [28] Cahalan R F, Oreopoulos L, Marshak A, *et al.* The 3RC bringing together the most advanced radiative transfer tools for cloudy atmospheres [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(9): 1275-1293.
- [29] Han Yong, Fan Wei, Rao Ruizhong, *et al.* Aerosol scale height of visible light-wave in experimentation study [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2006, 1(1): 33-40.
韩 永, 范 伟, 饶瑞中, 等. 可见光波段气溶胶标高的实验研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2006, 1(1): 33-40.