

# 基于相函数分段加权采样的近红外激光传输特性

胡 帅 高太长 李 浩 刘 磊 刘西川 李 云 韩文字

解放军理工大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101

**摘要** 为提高 Monte Carlo 激光传输模型中散射过程的处理精度, 依据散射相函数的变化特征, 提出了相函数分段加权采样方案, 验证了其准确性与可行性。采用 Monte Carlo 方法模拟了在非球形沙尘气溶胶中, 1.06  $\mu\text{m}$  红外激光透射率、反射率随传播距离的变化规律, 并将 Henyey-Greenstein(H-G)相函数采样与相函数均匀采样方案的 Monte Carlo 模拟结果进行了比较。仿真结果表明: 相函数分段加权采样方案可显著降低相函数抽样误差, 提高空间散射角抽样精度; 与 H-G 相函数抽样的模拟结果相比, 采用 H-G 相函数模拟的透射率偏低, 反射率偏高, 且随距离增大, 两者结果偏差随之增大。与相函数均匀采样的模拟结果相比, 两者计算的透射率偏差值随距离增大而增大, 反射率反之。

**关键词** 激光光学; 相函数; 分段加权采样; 红外激光传输; Monte Carlo

中图分类号 P426.3+1 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802008

## Laser Transfer Properties of Aerosols at Near-Infrared Waveband Based on Sectional-Weighted Sampling of Scattering Phase Functions

Hu Shuai Gao Taichang Li Hao Liu Lei Liu Xichuan Li Yun Han Wenyu

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

**Abstract** To improve the simulation accuracy of scattering process in Monte Carlo radiative transfer model, a phase function sectional-weighted sampling method is put forward based on the characteristics of scattering phase functions, and its accuracy and feasibility are validated subsequently. Transmissivity and reflectivity of infrared laser (1.06  $\mu\text{m}$ ) in non-spherical sand aerosol are calculated using Monte Carlo method. Its results are compared with those of Henyey-Greenstein (H-G) phase function sampling method and phase function uniformly-sampling method. Simulation results show that, phase function sectional-weighted sampling method can improve the calculation accuracy of scattering angles obviously and reduce the sampling error of phase function. Compared with H-G phase function sampling method, transmissivity calculated by H-G formula is underestimated, while reflectivity calculated by H-G formula is overestimated, and the deviation of two methods increases with the increasing of propagation distance. Compared with phase function uniformly sampling method, the relative error of transmissivity increases with the propagation distance increasing, while the relative error of reflectivity changes oppositely.

**Key words** laser optics; phase function; sectional-weighted sampling; infrared laser transfer; Monte Carlo

**OCIS codes** 140.3500; 140.3510; 140.3550; 140.3570

## 1 引 言

大气气溶胶指悬浮于大气中直径在 0.01~100  $\mu\text{m}$  的液体或固体微粒体系, 是地气系统的重要组成部分<sup>[1-3]</sup>。气溶胶尺度在微米级, 对近红外波段有较强的散射与吸收作用<sup>[4-5]</sup>, 可对红外激光传输<sup>[6]</sup>、红外遥感<sup>[7]</sup>及目标探测<sup>[8]</sup>等产生重要影响, 特别在气溶胶光学厚度较大时, 多次散射效应增强, 其影响更为显著<sup>[9-10]</sup>。散射相函数是描述气溶胶散射特性的重要参数, 表征的是散射能量空间分布特征<sup>[11]</sup>。在辐射传输模型中, 根据相函数资

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475020, 41475025)

作者简介: 胡 帅(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事大气探测与遥感等方面的研究。E-mail: hushuai2012@hotmail.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等方面的研究。

E-mail: 2009gaotc@gmail.com(通信联系人)

料准确模拟电磁散射过程是模拟气溶胶红外辐射特性的重要环节,尤其对于非球形气溶胶,其形状不规则<sup>[12-14]</sup>,即使复折射率与等效尺度谱相同,散射相函数仍存在一定差异<sup>[2,15-18]</sup>,可造成气溶胶辐射传输特性的不确定性<sup>[17-20]</sup>,因此提高辐射传输模型中对相函数的处理精度,对于提高辐射传输模型计算精度<sup>[2]</sup>,研究气溶胶,特别是非球形气溶胶的辐射传输特性有重要意义<sup>[14-15]</sup>。

为处理辐射传输中的多次散射问题,已提出了许多研究方法,近似解法如四流近似、单散射近似,精确解法如离散纵标法、累加-倍加法及 Monte Carlo 方法等<sup>[2]</sup>。单散射近似忽略了多次散射过程,只适用于气溶胶光学厚度较小情形<sup>[2]</sup>;离散纵标法、累加-倍加法与四流近似涉及了对相函数拟合过程,即采用勒让德多项式拟合相函数,在拟合阶数不高条件下,无法反映相函数细节变化特征<sup>[21]</sup>; Monte Carlo 法采用对光子随机运动进行概率统计的方式来模拟辐射传输过程,可直接根据散射相函数模拟光子散射特性,可较好揭示多次散射过程<sup>[22-23]</sup>,广泛运用于光在生物组织、水中、气溶胶及云雾中的传输特性研究<sup>[24-25]</sup>。为方便数值计算,在 Monte Carlo 模拟计算中广泛采用 Henyey-Greenstein (H-G)公式代替实际相函数<sup>[10,22-24]</sup>,但该函数仅以对称度因子为参数对相函数进行拟合,一定程度上无法反映实际散射相函数变化特征<sup>[26]</sup>,也不足以反映非球形气溶胶相函数间的差异<sup>[21]</sup>;为提高相函数拟合精度,修正 H-G 公式与双 H-G 公式也相继被提出,但由于其形式相对固定,拟合值与实际还是存在偏差<sup>[26]</sup>。为此,部分学者采用离散的散射相函数来设计累计概率分布函数<sup>[26-27]</sup>,进而对空间散射角进行随机抽样。由于相函数采样角度是均匀分布的,且考虑计算速度,角度采样分辨率不能过高,而在侧后向散射角区间,相函数起伏变化<sup>[28]</sup>,其概率分布函数变化缓慢且复杂,这将导致散射角抽样误差偏大<sup>[27]</sup>。形状对气溶胶散射特性影响主要在大散射角处<sup>[28-29]</sup>,因此采用该方法对非球形气溶胶散射角抽样,也将影响实际辐射传输的模拟精度。为解决上述问题,本文提出了一种相函数分段加权采样方案,编程实现了 Monte Carlo 算法,并分析了非球形沙空气溶胶中 1.06 μm 红外波的传输特性,其中 1.06 μm 波段是红外激光器常用的波段。

## 2 红外激光传输过程的 Monte Carlo 模拟

### 2.1 Monte Carlo 模拟的基本思路

Monte Carlo 方法是模拟气溶胶辐射传输特性的有效手段。其基本思想是将辐射传输问题转化为光子微观随机运动结果的概率统计,其中气溶胶辐射传输特性的 Monte Carlo 模拟原理如图 1 所示,单光子模拟的实施方案如图 2 所示。

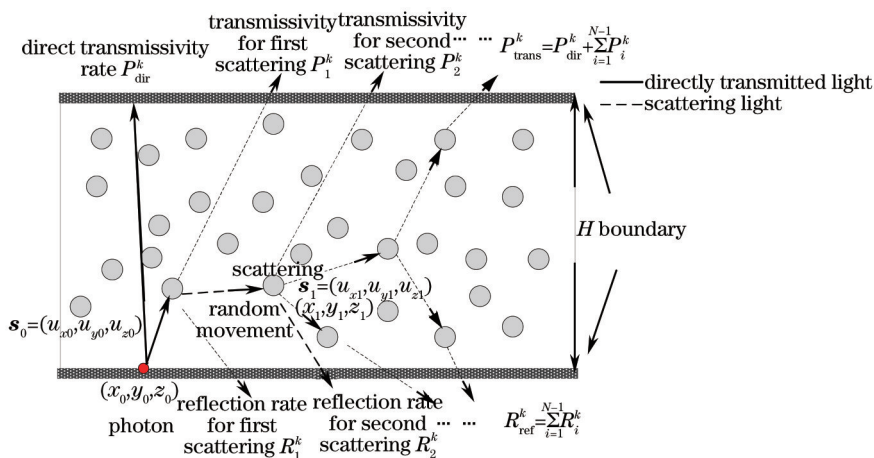


图 1 Monte Carlo 模拟基本原理示意图

Fig.1 Basic principle of Monte Carlo simulation

如图 2 所示,将光子运动过程分为直射过程与漫射过程处理,直接透射概率由比尔定律直接计算。光子漫射过程分为随机游动与散射两类,随机游动指光子在介质当中两次散射过程间的行走,其平均自由程是一个与衰减系数有关的随机变量,可通过计算机产生随机数来确定<sup>[10]</sup>。散射过程指的是光子与气溶胶粒子碰撞后,运动方向发生改变的过程,该过程的处理是 Monte Carlo 算法的关键,主要过程分为两步:空间散射角计算与运动方向余弦的空间变换。空间散射角  $\theta$  需要通过对散射相函数随机抽样得到<sup>[30]</sup>,是本文研究重

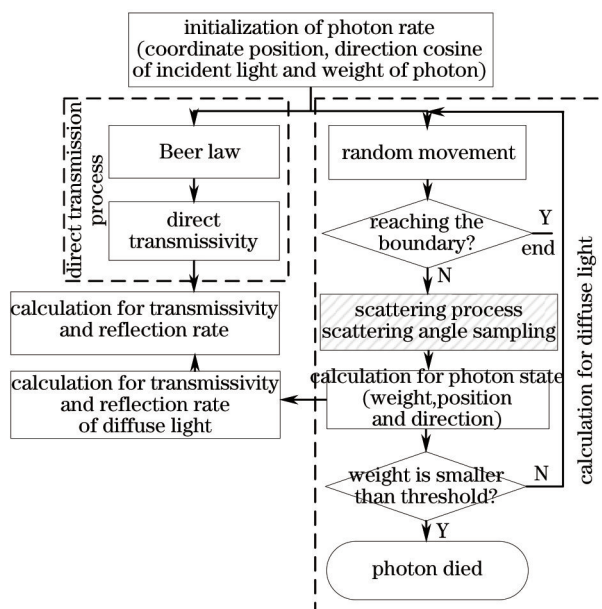


图2 单光子 Monte Carlo 模拟方案

Fig.2 Basic scheme of Monte Carlo simulation of single photon

点,具体方法见 2.2 节。光子运动的新方位角  $\varphi$  可认为  $[0,2\pi]$  均匀分布,抽样值为  $\varphi = 2\pi\zeta_1$ ,  $\zeta_1$  为区间  $[0,1]$  的均匀分布随机数,散射后的光子运动的方向余弦  $s = (u'_x, u'_y, u'_z)$  通过(1)式变换,其中  $(u_x, u_y, u_z)$  为初始方向余弦。

$$\begin{aligned} u'_x &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - u_z^2}}(u_x u_z \cos \varphi - u_y \sin \varphi) + u_x \cos \theta, \\ u'_y &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - u_z^2}}(u_y u_z \cos \varphi + u_x \sin \varphi) + u_y \sin \theta, \\ u'_z &= -\sin \theta \cos \varphi \sqrt{1 - u_z^2} + u_z \cos \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

当光子接近沿  $z$  轴方向(取  $u_z > 0.999$ )运动时,新的方向余弦可表示为<sup>[24]</sup>

$$u'_x = \sin \theta \cos \varphi, \quad u'_y = \sin \theta \sin \varphi, \quad u'_z = \frac{u_z}{|u_z|} \cos \theta. \quad (2)$$

每个光子不断重复以上两个过程,直到光子权重小于阈值或离开介质为止。光子的透射概率与反射概率则通过光子的直接透射概率及在各散射点的漫射透射与反射概率统计得到(如图 1 所示),具体模拟方法见文献[10,22-24],在此不做详细介绍。

## 2.2 相函数分段加权采样计算散射角

相函数采样确定空间散射角的基本思想是:以散射相函数  $p(\theta)$  为概率密度函数,建立随机变量  $\theta$  (散射角)的累积概率分布函数  $F(\theta)$ ,然后采用随机变量  $\xi$  对  $F(\theta)$  直接抽样确定的空间散射角,也即确定  $\theta_x$  使之满足(3)式<sup>[25]</sup>:

$$F(\theta_x) = P\{\theta | 0 < \theta < \theta_x\} = \xi. \quad (3)$$

对于 H-G 相函数,由于它连续且可解析,因此在确定随机数  $\xi$  基础上,可反解出空间散射角,计算简单而快速,因此广泛用于辐射传输的 Monte Carlo 模拟。对于实际相函数,相函数值往往是离散、不可解析的,更没有 H-G 积分求逆的性质,因此需要采用另一种方式进行。传统方法是,在  $0^\circ \sim 180^\circ$  区间取  $N$  各均分点,得到对应均分点的相函数值  $P(\theta_i)$ ,将其归一化,并计算累积概率分布函数  $F(\theta_i)$ ,如(4)式所示。

$$F(\theta_k) = \sum_{i=1}^k P(\theta_i) / \sum_{i=1}^N P(\theta_i). \quad (4)$$

通过比较确定区间  $[\theta_{i-1}, \theta_i]$ ,使之满足(5)式,然后取  $\theta_x = \theta_i$  为抽样空间散射角。

$$F(\theta_{i-1}) < \xi < F(\theta_i). \quad (5)$$

基于上述方案,设计累积概率分布函数对散射角抽样方案是可行的<sup>[27]</sup>,但存在三方面问题:1) 由于前向散射能量强,变化快,相函数采样角度步长不足,则累积概率分布函数的计算误差增大;2) 后向散射能量微弱且存在不规则起伏,在相当大的角度区间内,概率累积函数幅度非常小,且变化复杂,相函数采样步长过大,则细节信息将被淹没,若均匀提高采样角度分辨率,又涉及较大计算量(在 Monte Carlo 模拟中尤为显著);3) 在确定散射角  $\theta_x$  的取值区间后,直接令  $\theta_x = \theta_i$ ,未考虑随机数  $\xi$  与  $F(\theta_{i-1})$ ,  $F(\theta_i)$  的“远近亲疏”的距离关系,若实际  $\xi$  趋近于  $F(\theta_{i-1})$ ,而显著偏离  $F(\theta_i)$ ,则该做法将造成较大计算误差。

针对前两个问题,提出了相函数的分段加权采样方案,其基本思想是对相函数不等步长采样,即将散射区间分为前向散射段、侧向散射段及后向散射段,适当增加前向与后向段的相函数的离散角度分辨率以提高累积概率分布函数计算精度(如图3所示),由于采样的角度步长不一致,在计算累积概率分布函数,不同角度相函数值对应权重需调整。针对第三个问题,在确定散射角区间基础上,增加插值环节,体现空间散射角与两 endpoint “远近亲疏”的距离关系,其具体实施过程如下:

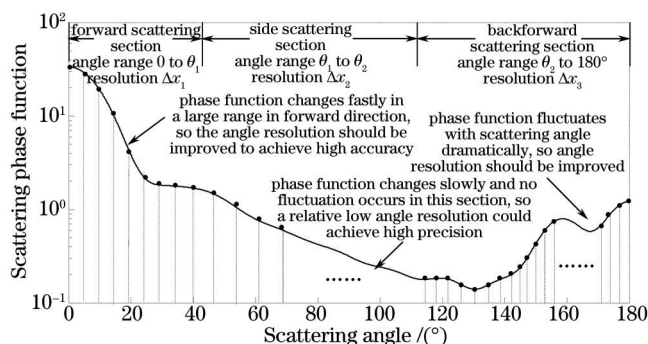


图3 散射相函数分段加权采样方案

Fig.3 Schematic description of phase function sectional-weighted sampling method

1) 分段点的确定。考虑散射相函数受复折射率、尺度谱及形状综合作用,其相函数变化特征存在一定差异,因此,前向与侧向散射段的分段点是根据相函数变化特征自适应调整确定,其依据是相函数相对变化率  $L(\theta_i)$  [定义如(6)式],通过确定恰当阈值  $\varepsilon$  进行截断,文中取 0.05。

$$L(\theta_i) = \left| \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_i} / \left[ \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_i} \right] / N, \quad (6)$$

式中  $\frac{\partial P(\theta)}{\partial \theta}$  表示相函数随角度变化的速率,其中导数可通过差分方式进行计算。取相对变化率是为了消除不同类型气溶胶的相函数个性特征差异的影响。侧向与后向散射的分段依据主要是相函数的波动性,大量仿真结果表明,波动较大的区间主要集中在大于  $110^\circ$  的散射角区间<sup>[31]</sup>,因此文中经验性选取该分段点为  $110^\circ$ 。此外,值得一提的是,分段过程及下面的累积概率函数计算均是在模拟程序初始化阶段完成,因此不涉及 Monte Carlo 模拟的迭代过程,其复杂程度对整个模拟过程的效率无较大影响。

2) 计算累积概率分布函数  $f(\theta_k)$ 。设前向散射段、侧向散射段及后向散射段对应角度分辨率分别为  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ , 根据数值积分思想,计算散射角  $\theta_k$  处散射相函数值  $P(\theta_k)$ ,进而计算概率累计分布函数  $f(\theta_k)$  并将其归一化,如(7)式所示。

$$f(\theta_k) = \frac{\sum_{i=1}^k P(\theta_i) \Delta x_j}{\sum_{i=1}^{N_1} \Delta x_1 P(\theta_i) + \sum_{i=1}^{N_2} \Delta x_2 P(\theta_i) + \sum_{i=1}^{N_3} \Delta x_3 P(\theta_i)}, \quad j = 1, 2, 3, \quad (7)$$

式中  $\Delta x_j$  为角度  $\theta_i$  所在分段的角度分辨率;  $f(\theta)$  曲线满足单调增条件,且  $\lim_{\theta \rightarrow 0} f(\theta) = 0$ ,  $\lim_{\theta \rightarrow \pi} f(\theta) = 1$ 。(7)式上下同时除以  $\Delta x_1$ ,取  $\omega_1 = \Delta x_2 / \Delta x_1$ ,  $\omega_2 = \Delta x_3 / \Delta x_1$ ,化简为(8)式,其中  $\omega_1, \omega_2$  称为权重。

$$f(\theta_i) = \frac{\sum_{i=1}^k P(\theta_i)\omega_i}{\sum_{i=1}^{N_1} P(\theta_i) + \sum_{i=1}^{N_2} \omega_1 P(\theta_i) + \sum_{i=1}^{N_3} \omega_2 P(\theta_i)} \quad (8)$$

3) 空间散射角的随机抽样。根据概率与统计的基本原理,若产生[0,1]均匀分布随机数  $\xi$ , 则必存在映射  $f(\theta)=\xi$ , 由于  $f(\theta)$  单调, 通过该映射可唯一确定  $\theta$ , 考虑到  $f(\theta)$  是离散且不可解析, 通过比较确定  $\theta$  所在角度区间  $[\theta_{i-1}, \theta_i]$ , 使该角度区间满足:

$$f(\theta_{i-1}) < \xi \leq f(\theta_i) \quad (9)$$

通过线性差值计算空间散射角  $\theta$ , 如(10)式所示, 如此可体现实际散射角  $\theta$  与区间  $[\theta_{i-1}, \theta_i]$  端点的远近亲疏关系, 进一步提高角度的抽样精度。

$$\theta = \frac{f(\theta) - f(\theta_{i-1})}{f(\theta_i) - f(\theta_{i-1})}(\theta_i - \theta_{i-1}) + \theta_{i-1} \quad (10)$$

### 3 实验验证与仿真

#### 3.1 相函数加权采样方案验证与仿真

实际气溶胶是非球形的, 为验证该方案的适用性与准确性, 对非球形气溶胶的相函数进行抽样验证。采用T矩阵法生成 1.06  $\mu\text{m}$  波段的非球形沙尘气溶胶的散射相函数, 模拟的形状包括椭球形、圆柱形及切比雪夫(Chebyshev)粒子<sup>[32]</sup>, 其中复折射率取  $m=1.52-0.008i$ , 尺度谱为对数正态分布谱, 平均粒子半径取 0.5  $\mu\text{m}$ , 标准差取 2.99, 粒子数密度取  $1000 \text{ cm}^{-3}$ [取至IAMAP(1983)提出的标准辐射大气模型]<sup>[21]</sup>, 前向、侧向及后向散射段的相函数采样角度分辨率为  $0.5^\circ$ 、 $1^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 。比对标准采用以下方法产生, 在  $0^\circ \sim 180^\circ$  以步长  $0.0001^\circ$  生成相函数值, 计算累计概率分布函数并对散射角抽样, 由于角度分辨率非常高, 可保证空间散射角的抽样值精度。定义散射角偏差  $\delta(\theta)$  与相函数相对偏差  $\delta P$  两标准[如(11)式]对抽样精度进行检验。

$$\begin{cases} \delta(\theta) = \theta_p - \theta_{st} \\ \delta P = [P(\theta_p) - P(\theta_{st})]/P(\theta_{st}) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\theta_p$  和  $\theta_{st}$  分别表示抽样散射角和标准散射角。

对  $a/b=0.5$ (横纵轴比)的椭球粒子、 $D/L=0.5$ (直径高度比)圆柱形粒子及  $\varepsilon=0.1$ (畸变参数)、 $M=4$ (阶数)的切比雪夫粒子的散射相函数分段加权采样, 并计算空间散射角、散射角偏差  $\delta(\theta)$ 、相函数相对偏差  $\delta P$  的分布如图4所示。由图4可知, 相函数相对偏差在 0.02 以内, 散射角偏差在  $0.8^\circ$  以内, 验证了本方法准确性与有效性。从误差分布上看, 散射角抽样误差集中在大散射角区间(后向与侧向), 且实际散射角抽样值大于标准值, 散射角偏差为正, 而在前向散射角处误差相对较小, 散射角抽样值小于标准值; 散射角偏差与相函数相对偏差无明显对应关系, 特别在侧后向散射角, 其原因是由于在该区间对应累积概率分布函数变化缓慢而复杂所致。

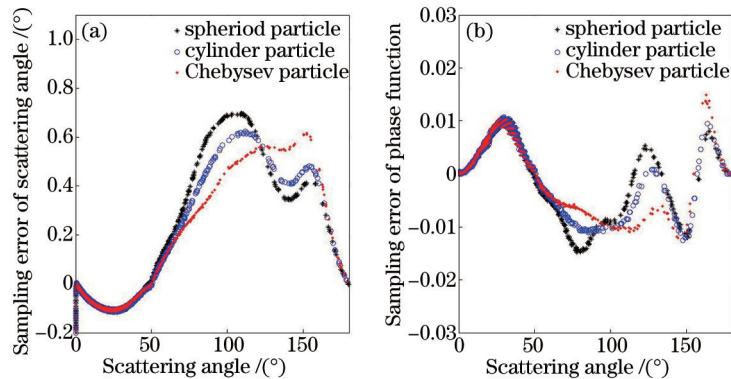


图4 非球形气溶胶相函数加权抽样结果(抽样3000次)。(a) 散射角偏差和(b)相函数相对偏差随散射角变化

Fig.4 Results of the weighted-sampling of phase function of non-spherical aerosol for 3000 times of sampling.

(a) Scattering errors and (b) phase function errors with the increase of scattering angle

计算相函数分段加权采样与均匀采样方案的散射角抽样值之差(相函数值在0~180°区间的角度采样点个数均为300个),其偏差值的空间分布如图5所示,由图5可知相函数均匀采样方案的散射角抽样值总体大于相函数分段加权采样方案,且侧后向散射角的计算差值更为显著,由于在侧向与后向散射角,加权采样的散射角大于标准值,可看出均匀采样的散射角误差将更大。统计两种方法的散射角抽样偏差及相函数相对偏差参照(11)式,结果如表1所示,分段加权抽样方案计算的散射角偏差平均值及标准差显著小于均匀抽样方案,相函数抽样的相对偏差也一定程度减小,说明本方案能显著提高空间散射角采样的精度,有助于提高Monte Carlo模拟仿真精度。

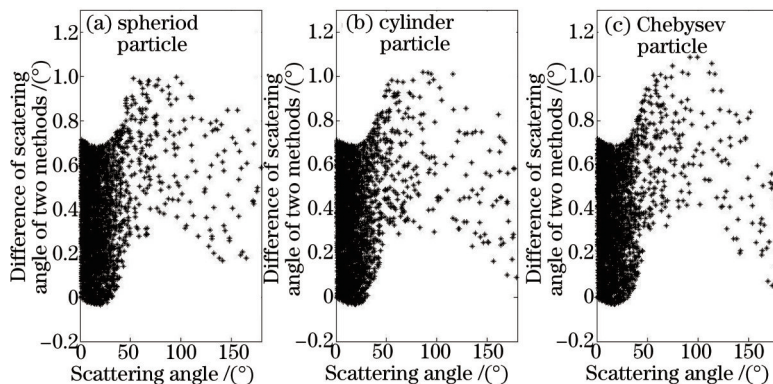


图5 两种方法空间散射角抽样偏差(抽样3000次)。(a) 椭球粒子; (b) 圆柱形粒子; (c) 切比雪夫粒子

Fig.5 Differences of scattering angles sampled by two methods for 3000 times of sampling. (a) Spheroid particle; (b) cylinder particle; (c) Chebyshev particle

表1 两种方法的散射角抽样结果比较(抽样3000次)

Table 1 Comparison between statistical results of the two methods for 3000 times of sampling

Shape parameter	Sectional-weighted sampling method				Uniformly sampling method			
	Relative difference of phase function /%		Difference of scattering angle / (°)		Relative difference of phase function /%		Difference of scattering angle / (°)	
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
$a/b=0.5$	$-3.43 \times 10^{-4}$	0.0079	0.0324	0.2153	-0.0023	0.0133	0.1604	0.3448
$a/b=1$	-0.0024	0.0139	0.0818	0.2547	-0.0053	0.0420	0.3160	0.9121
$a/b=2$	0.0021	0.0102	0.0144	0.2598	0.0022	0.0158	0.1258	0.3997
$D/L=0.5$	-0.0018	0.0108	0.0824	0.2359	-0.0036	0.0178	0.1301	0.5155
$D/L=2.5$	0.0018	0.0113	0.0257	0.2897	0.0018	0.0173	0.1411	0.4457
$\varepsilon=-0.1$	-0.0023	0.0137	0.0995	0.3498	-0.0287	0.0467	0.6756	1.0002
$\varepsilon=0.15$	-0.0022	0.0167	0.1073	0.2253	-0.0307	0.0388	0.6187	0.8204

### 3.2 激光传输过程的 Monte Carlo 仿真模拟

Monte Carlo 方法计算结果是随机运动的统计近似,为保证结果准确性,首先验证模拟结果的稳定性,取光子数量  $n=10^6$  个,入射方向垂直于介质面,传播距离为 1 km,计算透射率与反射率 1000 次,统计其标准差,如表 2 所示,结果表明,透射率及反射率的计算值是稳定的,波动非常小,标准差与平均值之比在  $10^{-3}$  量级左右。

表2 Monte Carlo 模拟结果稳定性测试(括号内为平均值)

Table 2 Stability test of Monte Carlo simulation results (the average values are shown in brackets)

Shape	Spheroid particle ( $a/b=0.5$ )	Cylinder particle ( $D/L=0.5$ )	Chebyshev particle ( $\varepsilon=0.1, M=4$ )
Transmissivity	0.0008 (0.7043)	0.0013 (0.7045)	0.0014 (0.6024)
Reflection rate	0.0009 (0.0989)	0.0010 (0.1012)	0.0011 (0.1932)

在不同形状的沙尘性气溶胶情形下,模拟 1.06  $\mu\text{m}$  红外波的透射率与反射率随传播距离的变化,结果如图 6 所示,其中气溶胶的基本散射参数通过 T 矩阵法计算得到。由图可知,随着传播距离增大,透射率逐渐减小,采用 H-G 相函数模拟的透射率小于实际相函数分段加权采样方案模拟的结果,而反射率则正好相反,

随着距离增大,反射率逐渐增强;此外,随着距离增大,两方法模拟结果偏差也是随之增大的。造成上述现象原因是由于H-G公式过低估计了气溶胶的前向散射值(见图7),在总散射能量一定时,得到的前向散射能量计算值偏小,而后向散射能量偏大,因此模拟的透射率偏低,而反射率偏高;随着距离增大,气溶胶光学厚度增加,多次散射效应的增强,H-G相函数的估计偏差被累积,因此整个气溶胶层透射率与反射率计算偏差变大;上述结果也进一步验证了H-G公式拟合相函数并用于 Monte Carlo 模拟的局限性。

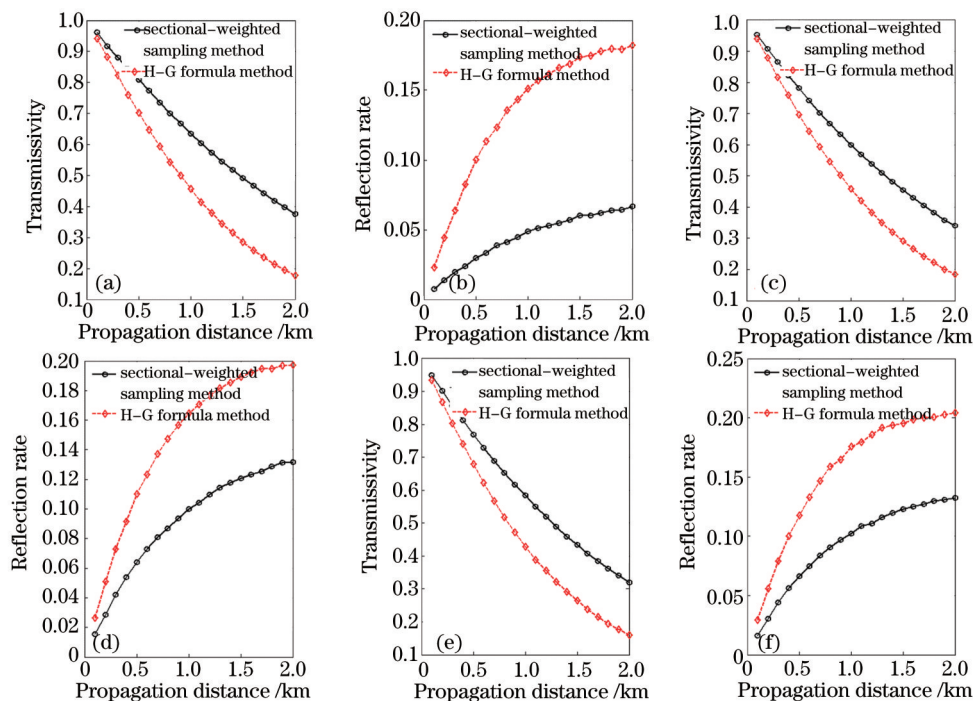


图6 不同形状气溶胶中的激光近红外辐射传输特性。(a) 椭球粒子的透射率;(b) 椭球粒子的反射率;(c) 圆柱粒子的透射率;(d) 圆柱粒子的反射率;(e) 切比雪夫粒子的透射率;(f) 切比雪夫粒子的反射率

Fig.6 Infrared radiation transfer properties in non-spherical aerosols. (a) Transmissivity and (b) reflection rate for ellipsoid aerosol; (c) transmissivity and (d) reflection rate for cylinder aerosol; (e) transmissivity and (f) reflection rate for Chebyshev aerosol

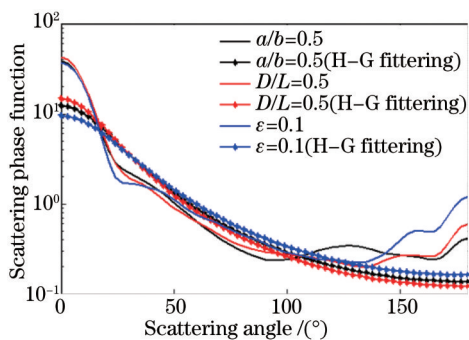


图7 实际散射相函数与H-G相函数的比较

Fig.7 Comparisons between actual phase function and H-G phase function

### 3.3 相函数分段加权采样与均匀采样的仿真结果比较

将相函数分段加权采样 Monte Carlo 模拟结果与相函数均匀采样模拟结果进行比较。分别定义透射率  $\delta T$  与反射率相对偏差  $\delta R$ , 如(12)式所示, 其中  $T_{\text{weight}}$ 、 $R_{\text{weight}}$  为相函数分段加权抽样方案模拟的透射率与反射率,  $T_{\text{uniform}}$ 、 $R_{\text{uniform}}$  为相函数均匀抽样方式模拟得到的透射率与反射率。计算两者相对差值  $\delta T$ 、 $\delta R$  随距离的变化, 结果如图 8 所示。

$$\begin{cases} \delta T = (T_{\text{weight}} - T_{\text{uniform}}) / T_{\text{weight}} \\ \delta R = (R_{\text{weight}} - R_{\text{uniform}}) / R_{\text{weight}} \end{cases} \quad (12)$$

由图8可知,透射率相对偏差总体随着距离增大而增大,其中最大偏差为2%,而反射率的变化趋势正好相反,最大偏差接近9%,说明随着气溶胶光学厚度增大,散射角抽样偏差对透射率模拟结果的影响增大,对反射率影响减小,且相函数分段加权采样方案可有效提高透射率与反射率模拟精度。

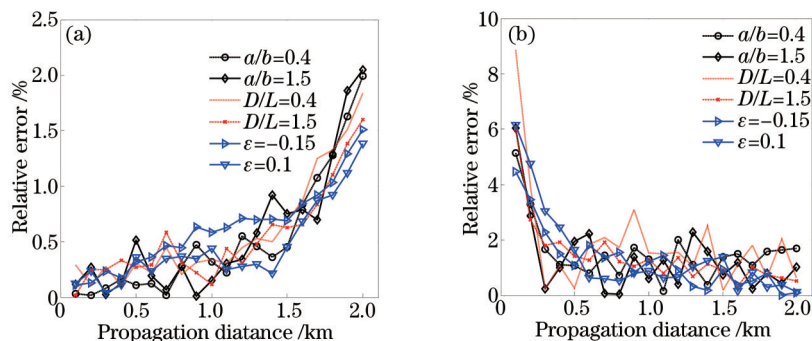


图8 透射率与反射率相对偏差随距离的变化。(a)透射率的相对偏差随距离的变化;(b)反射率的相对偏差随距离的变化

Fig.8 Variation of relative differences of transmissivity and reflection rate with propagation distance increasing.

(a) Transmissivity; (b) reflection rate

分析上述现象原因,由于透射能量主要由直接透射光与前向散射光构成。当传播距离较小时,透射能量主要由直接透射光及一次前向散射光贡献,此时两种方法的前向散射角抽样偏差相对较小,因此透射率相对偏差不大;但随着距离增大,多次散射效应增强,前向散射角抽样的偏差累积,因此透射率相对偏差变大。反射率由后向散射能量强度决定,当传播距离较小,多次散射效应弱,反射能量主要是一次后向散射能量,而此时两方法的散射角抽样值较大,因此反射率模拟值的偏差也较大;随着距离增大,多次散射效应增强,多次散射能量分布趋于各向同性<sup>[33]</sup>,因此反射率模拟值对散射角抽样偏差并不敏感。

## 4 结 论

为提高 Monte Carlo 激光传输模型中散射过程的处理精度,依据散射相函数变化特征,提出了相函数分段加权采样方案,并将该方案用于 1.06  $\mu\text{m}$  激光的透射率与反射率的 Monte Carlo 仿真,最后比较了 H-G 相函数抽样、相函数均匀采样与相函数加权采样三者模拟结果,分析了造成结果差异的原因,主要得到以下结论:

- 1) 相函数加权采样方案能显著提高空间散射角的抽样精度,有效减小相函数抽样误差,更适于近红外激光传输特性的 Monte Carlo 仿真。
- 2) 1.06  $\mu\text{m}$  红外激光的透射率随传播距离增大而减小,反射率随之而增大;相比加权采样方案,H-G 相函数抽样模拟的透射率偏小,反射率偏大,且随着距离增大,该偏差更为显著,验证了采用 H-G 公式拟合相函数的局限性。
- 3) 与相函数均匀抽样方案的模拟结果相比,两方法模拟的透射率相对偏差总体随距离而增大,反射率相对偏差总体随距离增大而变小;相函数分段加权抽样方案可有效提高透射率与反射率模拟精度。

## 参 考 文 献

- 1 Han Yong, Wang Tingjian, Rao Ruizhong, *et al.*. Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosol[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 7376-7407.  
韩 永,王体健,饶瑞中,等.大气气溶胶物理光学特性研究进展[J].物理学报,2008,57(11):7376-7407.
- 2 K N Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. New York: Academic Press, 2002: 243-356.
- 3 Cao Nianwen, Yan Peng. Aerosol classifications method by lidar measurements[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1101003.  
曹念文,颜 鹏.基于激光雷达探测的气溶胶分类方法研究[J].光学学报,2014,34(11):1101003.
- 4 Bohren C F, Huffman D R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. New York: Wiley, 1983.
- 5 Wang Zhifei, Liu Dong, Cheng Zhongtao, *et al.*. Pattern recognition model for haze identification with atmospheric backscattering lidars[J]. Chiense J Lasers, 2014, 41(11): 1113001.  
王治飞,刘 东,成中涛,等.基于模式识别的激光雷达遥感灰霾组分识别模型[J].中国激光,2014,41(11):1113001.



- 6 Huang Chaojun, Wu Zhensen, Liu Yafeng. Scattering characteristics of aerosol aggregation particles of 1.06  $\mu\text{m}$  laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2353–2357.  
黄朝军, 吴振森, 刘亚锋. 1.06  $\mu\text{m}$ 激光气溶胶凝聚粒子散射特性[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(9): 2353–2357.
- 7 Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang, Wang Lizhi. Effect of atmospheric aerosols on remote sensing of land surface temperature at infrared window channels[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(4): 275–278.  
汪宏七, 赵高祥, 王立志, 等. 大气气溶胶对红外窗区通道遥感陆面温度的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, 20(4): 275–278.
- 8 Liu Yafeng, Huang Chaojun, Lou Benzhuo. Numerical calculation of aerosol optical properties based on infrared band[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1605–1609.  
刘亚锋, 黄朝军, 娄本浊. 红外波段气溶胶粒子光学特性数值模拟[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1605–1609.
- 9 Van de Hulst H C. *Multiple Lights Scattering: Tables, Formulas and Application*[M]. New York: Academic Press, 1980: 150–200.
- 10 Wang Hongxia, Zhu Youzhang, Tian Tao, *et al.*. Characteristics of laser transmission in different types of aerosols[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 024214.  
王红霞, 竹有章, 田 涛, 等. 激光在不同类型气溶胶中传输特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 024214.
- 11 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.*. *Atmospheric Physics*[M]. Beijing: Beijing University Press, 2003: 27–28.  
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理学*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003: 27–28.
- 12 Xu Li, Fan Xiaobiao, Shi Guangyu, *et al.*. Shape and composition of aerosol in tropospheric and stratospheric atmosphere[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 56(5): 551–559.  
许 黎, 樊小标, 石广玉, 等. 对流层平流层气溶胶粒子形态与化学组成[J]. *气象学报*, 1998, 56(5): 551–559.
- 13 J Heintzenberg. *Physics and Chemistry of Aerosols*[J]. *Aerosols*, 2003, 32(21): 34–40.
- 14 Bu Yichuan, Zhao Yongkai, Chen Zhengyan, *et al.*. Research on real-time aerosol particle shape identification based on scattered light detection[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0413003.  
卜一川, 赵永凯, 陈正岩, 等. 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0413003.
- 15 Zhang Xiaolin, Huang Yinbo, Rao Ruizhong. Light scattering analysis of an asymmetrical two-component aerosol particle model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1101001.  
张小林, 黄印博, 饶瑞中. 一种非对称双成分气溶胶粒子模型的散射特性分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1101001.
- 16 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.  
郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 17 Michael I Mishchenko, Joop W Hovenier, Larry D Travis. *Light Scattering by Nonspherical Particles, Theory, Measurements and Applications*[M]. New York: Academic Press, 2000: 61–114.
- 18 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]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D11): 1984–2012.
- 19 K N Liou, Y Takano. Light scattering by nonspherical particles: Remote sensing and climatic implications[J]. *Atmospheric Research*, 1994, 31(4): 271–298.
- 20 Mao Jietai, Li Chengcai. Observation study of aerosol radiative properties over China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(5): 622–635.  
毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究[J]. *气象学报*, 2005, 63(5): 622–635.
- 21 Yin Hong. *Atmospheric Radiation Foundation*[M]. Beijing: Meteorological Press, 1993: 75–76.  
尹 宏. *大气辐射学基础*[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 75–76.
- 22 Jessica C Ramella Roman, Scott A Prah, Steve L Jacques. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: Part I[J]. *Opt Express*, 2005, 13(12): 4420–4438.
- 23 Jessica C Ramella Roman, Scott A Prah, Steve L Jacques. Three Monte Carlo programs of polarized light transport into scattering media: Part II[J]. *Opt Express*, 2005, 13(25): 10392–10405.
- 24 S A Prah, M Keijzer, S L Jacques, *et al.*. A Monte Carlo model of light propagation in tissue[C]. *SPIE*, 1989, 5: 102–111.
- 25 Lu Bai, Pin-hua Xie, Shi-mei Wang, *et al.*. Study on phase function in Monte Carlo transmission characteristics of poly-disperse aerosol[J]. *Opt Eng*, 2011, 50(1): 016002.
- 26 Bai Lu, Tang Shuangqing, Wu Zhensen, *et al.*. Study of random sample scattering phase functions of polydisperse aerosol in ultraviolet band[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 1749–1755.  
白 璐, 汤双庆, 吴振森, 等. 紫外波段多分散系气胶射函数随机抽样方法研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 1749–1755.

- 27 Dominique Toubanc. Henyey–Greenstein and Mie phase functions in Monte Carlo radiative transfer computations[J]. Appl Opt, 1996, 35(18): 3270–3274.
- 28 Gao Taichang, Liu Lei, Li Hao. Effect of shape and character of aerosol on its near-infrared scattering characteristics[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(3): 302–306.  
高太长, 刘 磊, 李 浩. 近红外波段气溶胶粒子形状和性质对散射特性的影响[J]. 解放军理工大学学报, 2007, 8(3): 302–306.
- 29 Daniel B Curtis, Brian Meland, Murat Aycibin, *et al.*. A laboratory investigation of light scattering from representative components of mineral dust aerosol at a wavelength of 550 nm[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(8): D08210.
- 30 Sun Xianming, Shen Jin, Wang Haihua, *et al.*. Mie and Henyey–Greenstein phase functions in Monte Carlo radiative transfer simulations [J]. The 9th National Photoelectric Technology Proceedings of Academic Exchange, 2010.  
孙贤明, 申 晋, 王海华, 等. 用 Mie 和 Henyey–Greenstein 相函数进行蒙特卡罗辐射传输模拟[C]. 第九届全国光电技术学术交流会议论文集(上册), 2010.
- 31 Li Hao, Sun Xuejin, Tang Liping. Characteristics of atmospheric volume scattering intensity in visible and infrared band[J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(4): 328–332.  
李 浩, 孙学金, 唐丽萍. 可见光与红外波段大气体散射强度特性[J]. 红外与毫米波学报, 30(4): 328–332.
- 32 Michael I Mishchenko, Larry D Travis. Capabilities and limitations of a current FORTRAN implementation of the T–Matrix method for randomly oriented, rotationally symmetric scatterers[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1998, 60(3): 309–324.
- 33 Rao Ruizhong. Modern Atmospheric Optics[M]. Beijing: Scientific Press, 2012: 547–576.  
饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 547–576.

栏目编辑: 王晓琰