

引用格式: YANG Yu-feng, HAN An-li, QIN Jian-hua, *et al.* Spectral Scattering Characteristic of Non-spherical Mars Dust Particles[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1229001

杨玉峰, 韩安丽, 秦建华, 等. 非球形火星沙尘粒子的光谱散射特性研究[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 1229001

非球形火星沙尘粒子的光谱散射特性研究

杨玉峰^{1,2}, 韩安丽¹, 秦建华¹, 王昭雷³

(1 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

(2 西安理工大学 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 西安 710048)

(3 国家电网河北省电力公司检修分公司, 石家庄 050070)

摘 要: 针对复杂的火星大气环境, 基于 T-matrix 理论, 对三种非球形火星沙尘粒子的散射特性进行了研究, 计算了服从对数正态分布的非球形火星沙尘粒子的散射特性, 分别在有沙尘暴和无沙尘暴两种条件下, 分析非球形火星沙尘粒子的传输衰减和透射率随粒子数浓度、波长以及高度的变化趋势, 并与球形粒子进行对比. 结果表明: 非球形与球形粒子的消光效率因子和散射效率因子存在较大差异, 两者之间的最大差值分别为 1.786 8 和 1.761 9, 而切比雪夫粒子的散射特性与球形粒子最接近; 当入射波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 时, 火星上沙尘粒子群整体的散射主要集中在前向 40° 以内, 且非球形与球形粒子在前向 60° 以内散射强度基本相等, 大于 60° 时非球形的散射强度比球形粒子高; 非球形火星沙尘粒子的传输衰减和透射率(随波长、粒子数浓度和高度)的变化趋势与球形的基本一致, 且其尺寸的比值越接近于 1, 传输衰减和透射率越接近于球形粒子的值.

关键词: 火星; 非球形粒子; T 矩阵法; 沙尘; 光谱散射特性

中图分类号: TN012

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1229001

Spectral Scattering Characteristic of Non-spherical Mars Dust Particles

YANG Yu-feng^{1,2}, HAN An-li¹, QIN Jian-hua¹, WANG Zhao-lei³

(1 School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2 Shaanxi Civil-Military Collaboration Key Laboratory of Intelligence Coordination Networks, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(3 Maintenance Branch, State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050070, China)

Abstract: Aiming at the complex atmosphere environment on Mars, using the T-matrix theory, the scattering characteristics of three kinds of Mars dust particles with non-spherical shape were studied. Then the scattering characteristics of non-spherical Mars dust particles with lognormal distribution were calculated, and under the conditions of sandstorm and no sandstorm, the variation trend of attenuation coefficient and transmittance of non-spherical Mars dust particles with particle number concentration, wavelength and height was analyzed, and compared with spherical particles. The results show that the extinction efficiency factor and scattering efficiency factor of non-spherical and spherical particles are quite different, and the difference between them is as large as 1.786 8 and 1.761 9. The scattering characteristic of chebyshev particles is the closest to that of spherical particles. When the incident wavelength is $0.55 \mu\text{m}$, the overall scattering of dust particle swarm on Mars is mainly concentrated within 40° forward direction, and the scattering intensity of non-spherical and spherical particles are basically equal within

基金项目: 国家自然科学基金(No.61405157), 陕西省重点产业创新链(No.2017ZDCXL-GY-06-01)

第一作者: 杨玉峰(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为目标散射特性与激光在大气中的传输特性. Email: yangyufeng@xaut.edu.cn

通讯作者: 韩安丽(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线光通信与大气传输. Email: 2292325631@qq.com

收稿日期: 2019-05-24 录用日期: 2019-08-14

60° forward direction. When the scattering intensity is larger than 60°, the non-spherical particles have higher scattering intensity than spherical particles. The attenuation coefficient and transmission of non-spherical Mars dust particles (with wavelength, particle concentration, and height) are basically consistent with the spherical particles, and when the size ratio is closer to 1, its attenuation coefficient and transmission coefficient are closer to the value of spherical particles.

Key words: Mars; Non-spherical particle; T-matrix method; Dust; Spectral scattering characteristic

OCIS Codes: 290.1310; 290.2200; 290.1990; 290.4210; 290.4020

0 引言

火星是距离地球第二近的类地行星,它的自转周期与地球的差别很小,因此有着与地球相似的昼夜交替和季节性气候.由于与地球有很多相似点^[1],近年世界各国对火星的探测越来越多.

火星大气环境恶劣,火星大气中的沙尘粒子会通过吸收和散射大气辐射,严重影响火星的气候变化、火星光学探测以及未来火星上无线光通信的性能.火星复杂的大气环境也导致了火星上的风速、沙尘的垂直分布、沙尘暴的规模与地球不同,因此对火星复杂环境中沙尘粒子的光散射特性研究可以为探测火星以及未来在火星上实施无线激光通信提供参考.1976年, PANG K等^[2]研究了火星环境中沙尘粒子的散射特性,并基于三个波段计算了单次散射相函数和反照率随散射角之间的变化关系.2010年, ELTETO A等^[3]根据火星全球探勘者号探测到的火星沙尘暴数据,研究了火星环境中沙尘粒子的物理特性,并将其粒径分布用对数正态分布进行了很好地拟合,给出了火星沙尘粒子的复折射率.2015年, DOMINIKA D D等^[4]利用488 nm和647 nm的激光研究了火星环境中沙尘粒子的散射特性,给出了400~1 000 nm波段的火星沙尘粒子的复折射率,基于粒径分布和复折射率,计算了散射相函数随其散射角度的变化关系.2015年, VINCENDON M等^[5]研究了火星大气中的沙尘粒子,在入射光波长为0.4~2.5 μm范围内计算了在特定粒径分布下沙尘粒子的单次散射反照率和消光系数,得到了入射光波长分别为0.44 μm、0.90 μm和2.4 μm时的散射相函数随其散射角度的变化曲线.2018年, OLIVA F等^[6]研究了火星沙尘暴时沙尘粒子的散射特性,测量得到了入射光波长为1.0~2.5 μm范围内沙尘粒子的反射率和透过率.2018年,杨玉峰等^[7]研究了火星环境中沙尘气溶胶粒子对激光传输特性的影响,基于复折射率,利用Mie理论和蒙特卡罗方法计算了激光在火星环境下的传输衰减、透射率和能见度.2019年, HAO C等^[8]反演了火星上沙尘粒子的粒径和光学深度特性,当粒径分布一定时反演得到了辐射强度随散射角的变化趋势.

本文基于T矩阵方法,在球形粒子的基础上研究非球形火星沙尘粒子的光散射特性,计算并分析了在有沙尘暴和无沙尘暴两种条件下的非球形火星沙尘粒子和球形粒子的光散射特性,并将非球形粒子的散射特性与球形粒子进行对比,为今后在分析火星的气候变化、改善火星光学探测设备性能以及未来火星上无线光通信等方面提供理论支撑.

1 T矩阵方法

针对非球形粒子,根据T矩阵理论,假设入射波为平面波,则波动方程为

$$\begin{cases} \mathbf{E}^{\text{inc}}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0^{\text{inc}} e^{i\mathbf{n}^{\text{inc}} \cdot \mathbf{r}} \\ \mathbf{E}_0^{\text{inc}} \cdot \mathbf{n}^{\text{inc}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{n}^{inc} 和 $\mathbf{r} = \{r, \theta, \varphi\}$ 分别为垂直于波传播方向的单位矢量和距离矢量,用矢量球谐波函数将入射场和散射场展开为^[16]

$$\mathbf{E}^{\text{inc}}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [a_{mn} \mathbf{RgM}_{mn}(r, \theta, \varphi) + b_{mn} \mathbf{RgN}_{mn}(r, \theta, \varphi)] \quad (2)$$

$$\mathbf{E}^{\text{sca}}(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [p_{mn} \mathbf{M}_{mn}(r, \theta, \varphi) + q_{mn} \mathbf{N}_{mn}(r, \theta, \varphi)] \quad (3)$$

式中, $\mathbf{RgM}_{mn}(r, \theta, \varphi)$ 和 $\mathbf{RgN}_{mn}(r, \theta, \varphi)$ 为矢量球谐波函数对应的正则表达式,计算式分别为

$$\mathbf{M}_{mn}(r, \theta, \varphi) = \gamma_{mn} h_n^{(1)}(r) (-1)^m \sqrt{\frac{(n+m)!}{(n-m)!}} e^{im\varphi} \mathbf{C}_{mn}(\theta) \quad (4)$$

$$\mathbf{RgM}_{mn}(r, \theta, \varphi) = \gamma_{mn} j_n^{(1)}(r) (-1)^m \sqrt{\frac{(n+m)!}{(n-m)!}} e^{im\varphi} \mathbf{C}_{mn}(\theta) \quad (5)$$

$$N_{mn}(r, \theta, \varphi) = \gamma_{mn} (-1)^m \sqrt{\frac{(n+m)!}{(n-m)!}} e^{im\varphi} \left[\frac{n(n+1)}{r} h_n^{(1)}(r) \mathbf{P}_{mn}(\theta) + \left(h_n^{\prime(1)}(r) + \frac{h_n^{(1)}(r)}{r} \right) \mathbf{B}_{mn}(\theta) \right] \quad (6)$$

$$\mathbf{Rg}N_{mn}(r, \theta, \varphi) = \gamma_{mn} (-1)^m \sqrt{\frac{(n+m)!}{(n-m)!}} e^{im\varphi} \left[\frac{n(n+1)}{r} j_n(r) \mathbf{P}_{mn}(\theta) + \left(j_n'(r) + \frac{j_n(r)}{r} \right) \mathbf{B}_{mn}(\theta) \right] \quad (7)$$

式中, $\gamma_{mn} = \sqrt{\frac{(2n+1)(n-m)!}{4\pi n(n+1)(n+m)!}}$, $j_n(r)$ 为第一类球贝塞尔函数, $h_n^{(1)}(r)$ 为第三类球贝塞尔函数.

a_{mn} 、 b_{mn} 为入射场的展开系数, p_{mn} 、 q_{mn} 为散射场的展开系数, 它们之间的关系为

$$p_{mn} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} [\mathbf{T}_{mnm'n'}^{11} a_{m'n'} + \mathbf{T}_{mnm'n'}^{12} b_{m'n'}] \quad (8)$$

$$q_{mn} = \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m'=-n'}^{n'} [\mathbf{T}_{mnm'n'}^{21} a_{m'n'} + \mathbf{T}_{mnm'n'}^{22} b_{m'n'}] \quad (9)$$

用矩阵方程表示为

$$\begin{bmatrix} p_{mn} \\ q_{mn} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{mnm'n'} \begin{bmatrix} a_{mn} \\ b_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{mnm'n'}^{11} & \mathbf{T}_{mnm'n'}^{12} \\ \mathbf{T}_{mnm'n'}^{21} & \mathbf{T}_{mnm'n'}^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{mn} \\ b_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

转换阵 \mathbf{T} 矩阵为

$$\mathbf{T}_{mnm'n'} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{mnm'n'}^{11} & \mathbf{T}_{mnm'n'}^{12} \\ \mathbf{T}_{mnm'n'}^{21} & \mathbf{T}_{mnm'n'}^{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

结合式(8)~(11), T-matrix 的计算式由扩展边界条件法可得为

$$\mathbf{T} = -(\mathbf{Rg}Q)Q^{-1} \quad (12)$$

式中,

$$\begin{cases} Q_{mnm'n'}^{11} = -i(m_0 \mathbf{J}_{mnm'n'}^{21} + \mathbf{J}_{mnm'n'}^{12}) \\ Q_{mnm'n'}^{12} = -i(m_0 \mathbf{J}_{mnm'n'}^{11} + \mathbf{J}_{mnm'n'}^{22}) \\ Q_{mnm'n'}^{21} = -i(m_0 \mathbf{J}_{mnm'n'}^{22} + \mathbf{J}_{mnm'n'}^{11}) \\ Q_{mnm'n'}^{22} = -i(m_0 \mathbf{J}_{mnm'n'}^{12} + \mathbf{J}_{mnm'n'}^{21}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Rg}Q_{mnm'n'}^{11} = -i(m_0 \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{21} + \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{12}) \\ \mathbf{Rg}Q_{mnm'n'}^{12} = -i(m_0 \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{11} + \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{22}) \\ \mathbf{Rg}Q_{mnm'n'}^{21} = -i(m_0 \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{22} + \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{11}) \\ \mathbf{Rg}Q_{mnm'n'}^{22} = -i(m_0 \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{12} + \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{21}) \end{cases} \quad (14)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{mnm'n'}^{11} \\ \mathbf{J}_{mnm'n'}^{12} \\ \mathbf{J}_{mnm'n'}^{21} \\ \mathbf{J}_{mnm'n'}^{22} \end{bmatrix} = (-1)^m \iint_S d\mathbf{Sn}(r, \theta, \varphi) \begin{bmatrix} \mathbf{Rg}M_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{M}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}M_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{N}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}N_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{M}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}N_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{N}_{-mn}(r, \theta, \varphi) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{11} \\ \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{12} \\ \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{21} \\ \mathbf{Rg}J_{mnm'n'}^{22} \end{bmatrix} = (-1)^m \iint_S d\mathbf{Sn}(r, \theta, \varphi) \begin{bmatrix} \mathbf{Rg}M_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{Rg}M_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}M_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{Rg}N_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}N_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{Rg}M_{-mn}(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}N_{m'n'}(m_0 r, \theta, \varphi) \times \mathbf{Rg}N_{-mn}(r, \theta, \varphi) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, \mathbf{n} 为表面法向量; 表面积分可由粒子几何表面求得

$$d\mathbf{Sn}(r, \theta, \varphi) = \left[r^2 \sin \theta \mathbf{r} - r \sin \theta \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \theta} - r \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi} \right] d\varphi d\theta \quad (17)$$

$$\mathbf{Rg}M_{mn}(r, \theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \mathbf{Rg}M_{mn}^r(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}M_{mn}^\theta(r, \theta, \varphi) \\ \mathbf{Rg}M_{mn}^\varphi(r, \theta, \varphi) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中, 矢量球谐函数的上标 (r, θ, φ) 分别指球坐标系中相应坐标所对应的分量.

旋转对称粒子的散射截面和消光截面分别表示为

$$C_{\text{sca}} = \frac{2\pi}{k_1^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \sum_{n'=-n'}^n \sum_{m'=-n'}^{n'} (|\mathbf{T}_{mm'n'}^{11}|^2 + |\mathbf{T}_{mm'n'}^{12}|^2 + |\mathbf{T}_{mm'n'}^{21}|^2 + |\mathbf{T}_{mm'n'}^{22}|^2) \quad (19)$$

$$C_{\text{ext}} = -\frac{2\pi}{k_1^2} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n (|\mathbf{T}_{nm'n'}^{11}|^2 + |\mathbf{T}_{nm'n'}^{22}|^2) \quad (20)$$

式中, $k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_1 \mu_0}$ 为环境介质波数.

消光效率因子、散射效率因子和吸收效率因子分别定义为

$$Q_{\text{sca}} = \frac{C_{\text{sca}}}{G} \quad Q_{\text{ext}} = \frac{C_{\text{ext}}}{G} \quad Q_{\text{abs}} = \frac{C_{\text{abs}}}{G} \quad (21)$$

式中, G 为粒子的投影面积.

Muller 矩阵用于描述散射粒子的散射特性, 入射光和散射光的关系为

$$\mathbf{I}_s = \frac{C_{\text{sca}}}{4\pi R^2} \mathbf{F}(\theta) \mathbf{I}_i \quad (22)$$

式中, \mathbf{I}_s 和 \mathbf{I}_i 为斯托克斯矢量, R 为散射粒子距离观测点的长度; 对于轴对称的非球形粒子, Muller 矩阵可表示为

$$\mathbf{F}(\theta) = \begin{bmatrix} F_{11}(\theta) & F_{12}(\theta) & 0 & 0 \\ F_{12}(\theta) & F_{22}(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{33}(\theta) & F_{34}(\theta) \\ 0 & 0 & -F_{34}(\theta) & F_{44}(\theta) \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中, $F_{11}(\theta)$ 为单次散射相函数.

2 火星环境中沙尘粒子的物理特性

火星沙尘粒子物理特性是影响激光散射的主要因素, 所以研究火星沙尘粒子的散射特性必须首先分析火星环境中沙尘粒子的物理特性.

2.1 火星环境中沙尘粒子的形状和尺寸分布

大量实验和研究表明, 火星环境中的沙尘粒子包含球形粒子和非球形粒子, 而绝大多数为非球形粒子. 火星环境中沙尘粒子的粒径分布更适合用对数正态分布描述^[4,9], 其函数表达式为

$$n(r) = \frac{c}{r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2(\ln \sigma)^2}\right] \quad (24)$$

式中, c 为一个常数, 通常取 $c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$, 几何平均半径 r_g 和标准差 σ 与有效半径和有效分布宽度的关系分别为

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_g}{\exp[-2.5(\ln \sigma)^2]} \quad (25)$$

$$v_{\text{eff}} = \exp[(\ln \sigma)^2] - 1 \quad (26)$$

根据文献[9], 取三组不同参数下的粒径分布 ($r_{\text{eff}} = 2.34 \mu\text{m}$, $v_{\text{eff}} = 0.86 \mu\text{m}$, $r_{\text{eff}} = 1.85 \mu\text{m}$, $v_{\text{eff}} = 0.51 \mu\text{m}$, $r_{\text{eff}} = 1.2 \mu\text{m}$, $v_{\text{eff}} = 0.25 \mu\text{m}$), 其分布如图 1.

2.2 沙尘粒子浓度与风速的关系

由于特殊的地形地貌及气候条件, 火星上经常发生沙尘暴, 即使没有沙尘暴, 火星上平常的风速也可达 4.3 m/s, 而风速直接影响着火星大气中沙尘粒子的浓度. 2004 年, MERRISONJP 等^[10] 研究了火星上悬浮沙尘粒子的浓度和风速之间的关系, 通

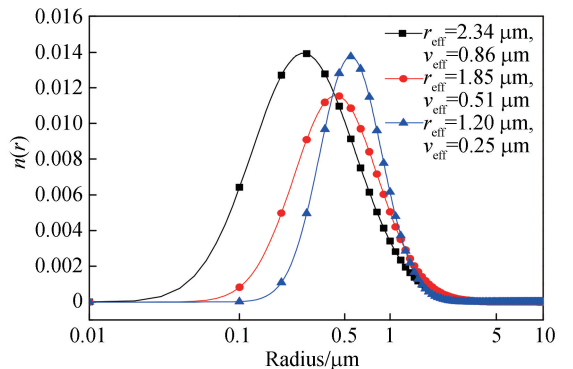


图 1 火星沙尘的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of dustparticles

过理论推导和实验测量得到了沙尘暴过后,风速为 1.7 m/s时沙尘粒子浓度随时间的变化趋势,结果表明其理论模形和实际测量结果基本吻合.利用激光多普勒风速仪(Laser Doppler Anemometers, LDA)和微型火星激光风速仪(miniature Mars Laser-based Anemometer, mMLA)测量得到风速为 1.7 m/s时沙尘粒子浓度随时间的变化,结果如图 2. 测量得到的沙尘粒子浓度随风速的关系如表 1.

由图 2 可知,当沙尘暴过后,并且风速在 1.7 m/s时,火星上沙尘粒子数浓度随时间的变化呈先迅速降低后缓慢降低,其变化趋势接近指数减小,两种粒子数浓度测量器测得的理论结果基本一致.

由表 1 可知,当沙尘暴过后,风速越高,火星环境中的沙尘粒子数浓度越低,其原因是沙尘粒子离地面较近,由于重力因素和风力因素,导致沙尘粒子快速沉降而没有形成沙尘悬浮层.

表 1 火星上不同风速时的沙尘粒子浓度^[10]

Table 1 Concentrations of dust particles at different wind speeds on Mars^[10]

Wind speed/(m·s ⁻¹)	LDA/(×10 ⁶ m ⁻³)	mMLA/(×10 ⁶ m ⁻³)	mMLA/LDA
1.7	14.6±1.1	11.0±0.8	0.75±0.12
3.5	7.1±0.4	3.8±0.3	0.53±0.08
5.0	1.9±0.3	2.3±0.4	1.2±0.5
15.3	0.25±0.04	0.27±0.06	1.1±0.1

2.3 沙尘粒子浓度和高度的关系

火星上不同地区的地形地貌具有不同的气体力学,高度不同风速也不同,导致沙尘浓度也不同.火星上不同的地区、同一地区不同的高度其粒径分布和浓度也千差万别,不同的粒径分布和有效半径对应不同的浓度.1995年,CHASSEFIERE E等^[11]通过研究火星大气中沙尘粒子的分布随高度的变化关系,发现不同的尺寸分布,在不同高度时对应的粒子数量浓度也不同.在没有沙尘暴时,火星上不同高度对应的粒子数量浓度如图 3,其中 b 为有效方差.

由图 3 可知,在没有发生沙尘暴时,火星大气中沙尘粒子浓度整体较低;在 0~24 km 范围内,当方差一定时,在火星环境中同一地区随着高度的增加,其沙尘粒子数浓度越低,对应的有效半径也越小,说明火星环境中,距地面越高沙尘粒子半径越小,其原因就是粒径更小的沙尘质量越小,漂浮的高度越高,而质量越重的沙尘粒子由于重力的原因很快沉降至地面.在同一高度时方差越大对应的有效半径越大,沙尘粒子数浓度也越高.

2014年, FEDOROVA A A等^[15]研究了当火星发生沙尘暴时,沙尘粒子浓度和高度之间的关系,如表 2 所示.

表 2 火星不同区域不同高度沙尘的粒子浓度^[15]

Table 2 Concentration of dust particles at different heights in different regions on Mars^[15]

Area	Dimension	Height	Concentration
Northern hemisphere	>60°	18 km	1.8×10 ⁹ /m ³
Northern hemisphere	<60°	18 km	1.1×10 ⁹ /m ³
Southern hemisphere	<50°	22 km	4.0×10 ⁸ /m ³

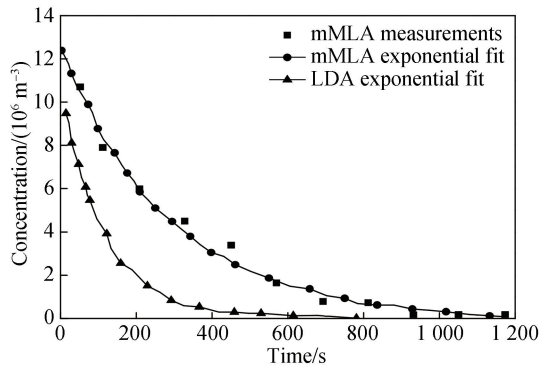


图 2 风速为 1.7m/s 时沙尘浓度随时间的变化^[10]
Fig.2 Time-dependent variation of dust concentration at a wind speed of 1.7m/s^[10]

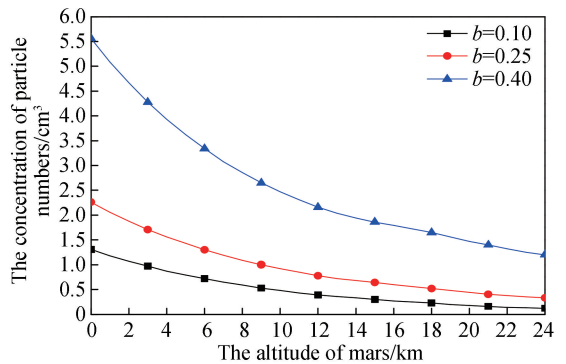


图 3 火星上沙尘粒子浓度随高度的变化
Fig.3 Variation of dust particle concentration with height on Mars

3 火星沙尘粒子光散射特性的计算与分析

3.1 不同形状火星沙尘粒子的消光、散射效率因子

火星沙尘粒子的形状和大小千差万别,其散射特性也不同,这里把它们简化为椭球形(横纵轴比 $a/b = 1/2, 1/3, 2/1$)、圆柱形(底面半径与半高比 $r/L = 1/1, 1/2, 1/3, 2/1$)和切比雪夫形($n=2, \epsilon = -0.1, 0.1, n$ 为多项式, ϵ 为形变参数)三种非球形粒子进行分析,如图 4 所示.利用波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 的绿光,对应的火星沙尘粒子的复折射率为 $1.5 + 0.007i$,用 T 矩阵计算它们的消光效率因子 Q_{ext} 和散射效率因子 Q_{sca} ,如图 5、图 6 和图 7 所示.

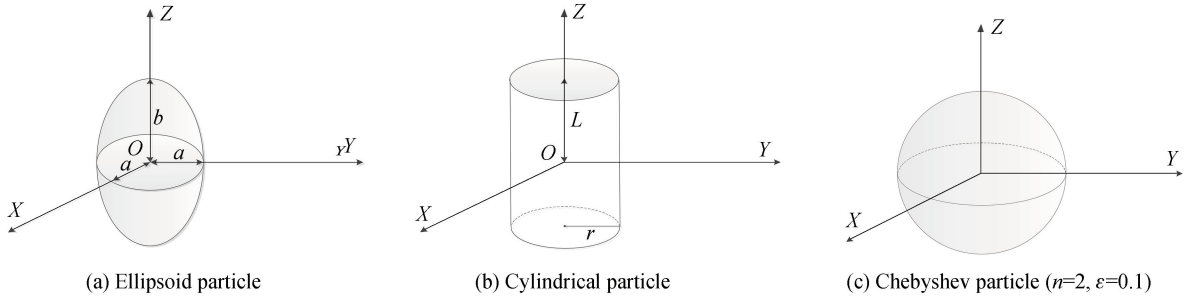


图 4 不同形状的粒子
Fig.4 Particles of different shapes

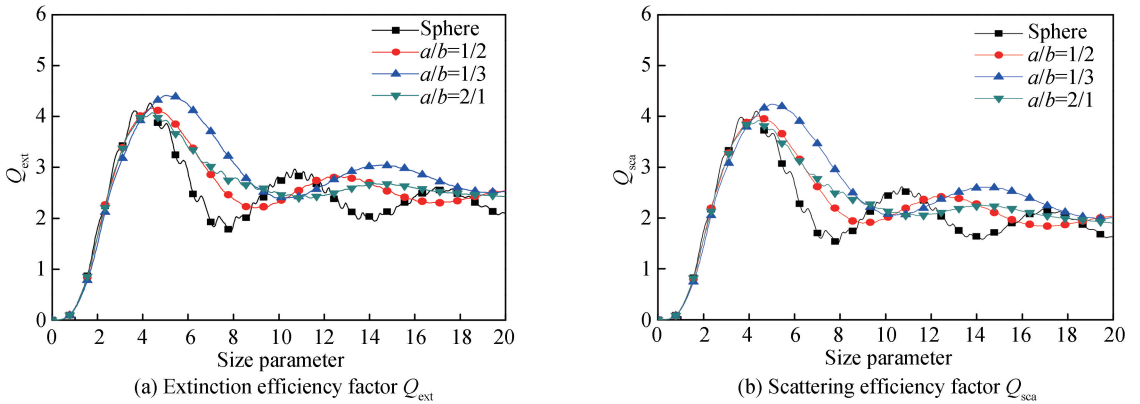


图 5 椭球形火星沙尘粒子的 Q_{ext} 和 Q_{sca} 随粒子尺度参数的变化
Fig.5 The variation of Q_{ext} and Q_{sca} of ellipsoidal Martian dust particles with scale parameters

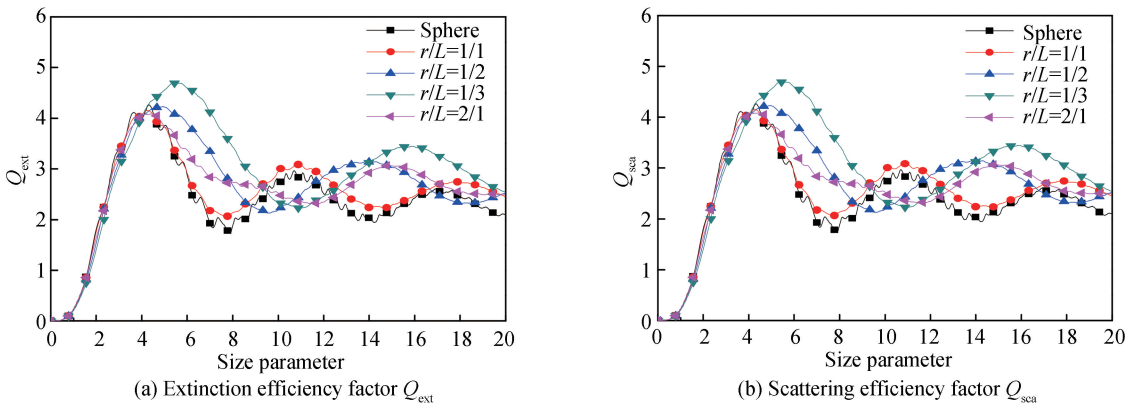


图 6 圆柱形火星沙尘粒子的 Q_{ext} 和 Q_{sca} 随粒子尺度参数的变化
Fig.6 The variation of Q_{ext} and Q_{sca} of cylindrical Martian dust particles with scale parameters

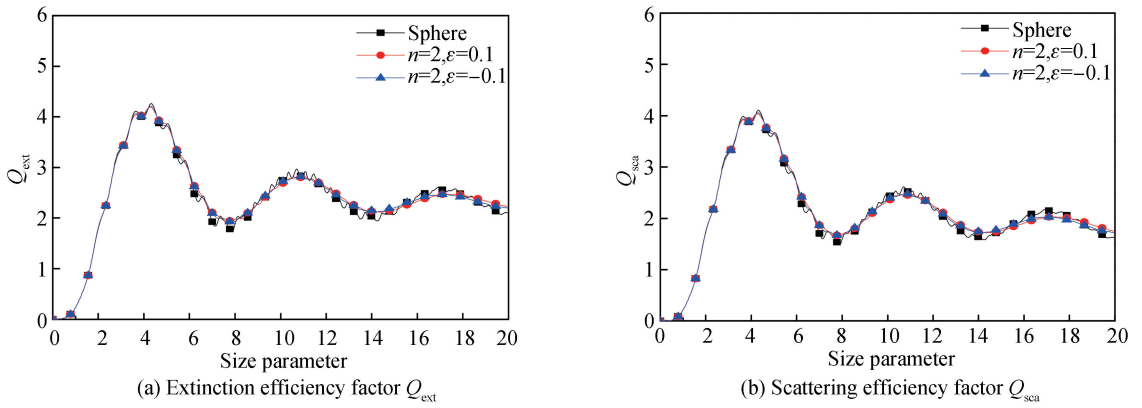


图7 切比雪夫形沙尘粒子的 Q_{ext} 和 Q_{sca} 随粒子尺度参数的变化

Fig.7 The variation of Q_{ext} and Q_{sca} of Chebyshev-type Martian dust particles with scale parameters

由图5、图6和图7可以看出火星沙尘粒子在不同形状下的消光效率因子 Q_{ext} 和散射效率因子 Q_{sca} 变化规律相似,即随着尺度参数的增加呈现先增后减,震荡幅度由大变小,最终均趋于一个常数.但是非球形与球形之间又存在很大的不同,由图5可知,横纵轴比为1/3的椭球形粒子与球形粒子时;二者差距最明显,当尺寸参数为7.9时,二者之间的差值达到了最大,分别为1.4323和1.41278;由图6可知,底面半径与半高比为1/3的圆柱形粒子与球形粒子二者差距最明显,当尺寸参数为7.85时,二者之间的差值达到了最大,分别为1.7868和1.7619;由图7可知,多项式 $n=2$ 和变形参数 $\xi=0.1$ 以及 $\xi=-0.1$ 的切比雪夫形粒子与球形粒子时二者差距很小,基本重合.总体趋势表明,非球形粒子与球形粒子时二者存在较大差异,并且非球形粒子的横纵比越接近于1,它们与球形粒子曲线的越接近,而切比雪夫粒子的散射特性与球形粒子的最接近^[12],随着比值的增大,非球形沙尘粒子对应的值也逐渐增大,并且随着尺寸参数的增加,二者的变化也趋于平稳,与文献^[12]结果一致.

3.2 服从一定尺寸分布的火星沙尘粒子的散射特性

火星上不同地区的沙尘其粒径分布不同,散射特性也不同,因此研究具有一定分布下的沙尘粒子整体的散射特性具有重要意义.根据文献^[9],采用有效半径和有效分布宽度分别为 $r_{eff}=1.85\ \mu\text{m}$, $v_{eff}=0.51\ \mu\text{m}$ 的对数正态分布,取入射光波长分别为 $0.49\ \mu\text{m}$ 、 $0.55\ \mu\text{m}$ 、 $0.66\ \mu\text{m}$ 和 $0.86\ \mu\text{m}$,对应的复折射率分别为: $m=1.5+0.01i$ 、 $m=1.5+0.007i$ 、 $m=1.5+0.0025i$ 、 $m=1.5+0.0065i$,利用T矩阵法计算的散射相函数如图8所示.

由图8可以看出,火星上春季有沙尘暴时,散射相函数在四种入射光波长下随散射角的变化趋势基本一致,并且取值也非常接近,其散射主要集中于前向小角度 20° 以内.利用T矩阵计算的结果和 Pollack^[9] 计算的结果对比表明,随着散射角的增大,散射相函数都有一致的变化趋势,并且取值也很接近,其散射主要集中于前向小角度.

火星中包含很多球形和非球形沙尘粒子,当分布一定时,球形粒子与非球形粒子具有不同的散射特性;当粒子形状一定时,分布参数不同时其散射特性也不同,取入射波长为 $0.55\ \mu\text{m}$ 的绿光,计算得到球形、椭球形和圆柱形三种粒子的散射相函数,如图9所示,计算的不同分布参数时对应的沙尘粒子散射相函数如图10所示,并与 Pollack^[9] 计算的结果进行了对比.

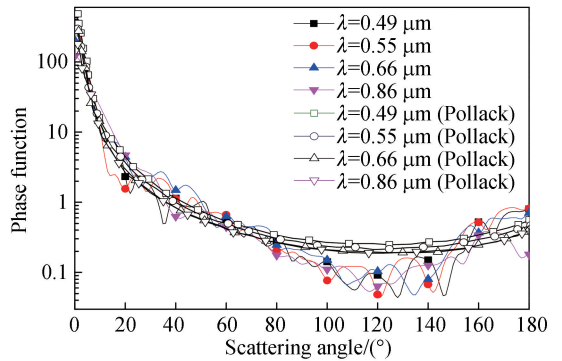


图8 不同入射波长条件下散射相函数随散射角度的变化

Fig.8 The change of scattering phase function with scattering angle under different incident light wavelength

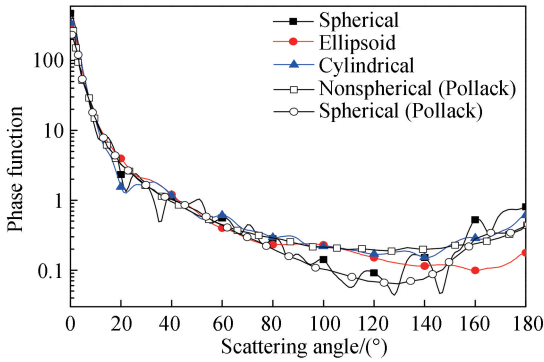


图9 不同形状粒子散射相函数随散射角度的变化关系
Fig.9 The change of scattering phase function with scattering angle in different shapes

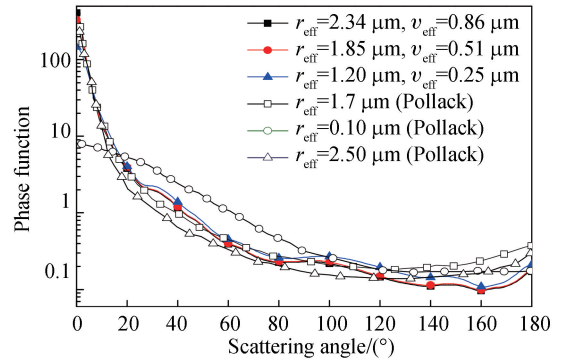


图10 不同分布参数散射相函数随散射角度的变化关系
Fig.10 The variation of scattering phase function with scattering angle under different distribution parameters

由图9可知,符合对数正态分布的球形、椭球形和圆柱形三种火星沙尘粒子的散射相函数随其散射角度的变化趋势基本一致,其中球形粒子震荡较剧烈,圆柱形粒子较平滑,与 POLLACK J B^[9]研究的球形和非球形粒子的散射相函数的变化趋势基本一致,取值也很接近,并且球形和非球形沙尘粒子在前向60°以内基本相等,大于60°时非球形的散射场强度稍微比球形粒子的散射相函数高。

由图10可知,符合对数正态分布的参数不同时对沙尘粒子群的整体散射特性影响也不同,有效半径 r_{eff} 取值越大散射相函数越大,与 POLLACK J B^[9]研究的结果有一致的趋势;火星上符合对数正态分布的沙尘粒子群整体的散射主要集中于前向40°以内,两图对比可知,不同的有效半径和有效宽度的沙尘粒子群整体,其散射相函数随散射角度的增加,变化曲线基本一致,有效半径越大,其散射相函数也较大。

3.3 火星沙尘粒子的传输衰减和透射率

服从一定分布球形粒子的衰减/散射/吸收系数可以表示为^[8]

$$\mu_i = N \int_0^{\infty} \sigma_i(r) n(r) dr \quad (i = t, s, a) \quad (27)$$

式中, N 和 $n(r)$ 是分别为沙尘粒子数浓度和粒径分布函数, σ_t 是消光截面, σ_s 是散射截面, σ_a 是吸收截面,而就非球形粒子而言,由于

$$\sigma_i = \int_{r_1}^{r_2} \sigma_i(r) n(r) dr \quad (i = t, s, a) \quad (28)$$

将式(28)代入式(27)可得

$$\mu_i = N \cdot \sigma_i \quad (i = t, s, a) \quad (29)$$

由 Lambert-Beer 定律^[13],透射强度可表示为

$$I = I_0 \exp \left[- \int_0^l \sigma_i(\lambda) dl \right] \quad (30)$$

式中, I_0 为光强, l 为介质的距离。

传输衰减可表示为

$$\mu \text{ (dB/km)} = 4.343 \times \mu \text{ (1/km)} \quad (31)$$

当火星发生沙尘暴时,根据文献[14]和文献[15]所测得的火星沙尘粒子的复折射率,采用 Mie 理论计算并分析了不同浓度下火星沙尘的光谱传输特性,如图11所示。在图12中,以浓度 $N = 1.1 \times 10^9 / \text{m}^3$ 为例,计算了传输特性随波长的变化曲线,并与球形粒子进行了对比。

由图11(a)可知,在较小的波长范围内,球形粒子的传输衰减随波长的变化趋势比较平缓,没有太大起伏,但是在同一波长下,粒子数浓度越大,传输衰减也越大;由图11(b)可知,浓度 $N = 4.0 \times 10^8 / \text{m}^3$ 时的透射率明显大于浓度 $N = 1.1 \times 10^9 / \text{m}^3$ 和浓度 $N = 1.8 \times 10^9 / \text{m}^3$ 时的透射率,浓度 $N = 1.8 \times 10^9 / \text{m}^3$ 时的透射率最小。

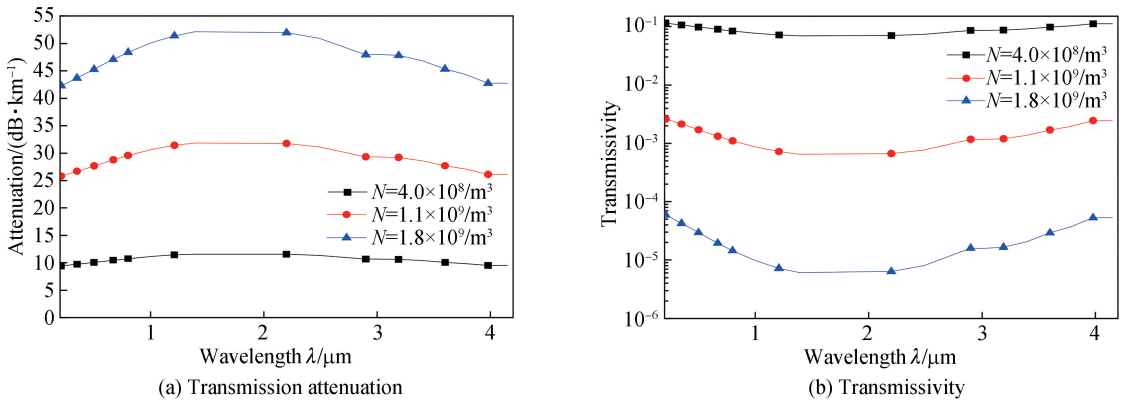


图 11 不同浓度下球形粒子的传输衰减和透射率随波长的变化曲线

Fig.11 Curves of attenuation and transmission rate of spherical particles with wavelength at different concentrations

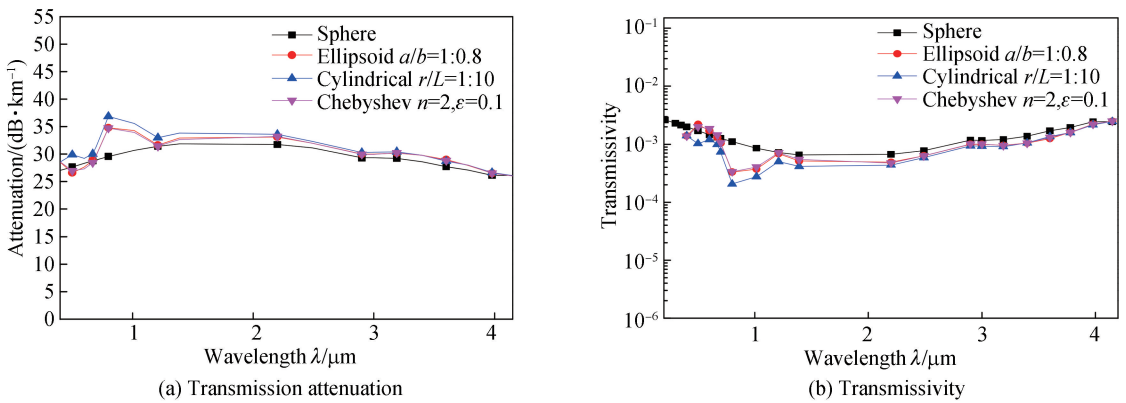


图 12 不同形状粒子的传输衰减和透射率随波长的变化曲线

Fig.12 Transmission attenuation and transmission rate change curves with wavelength for particles with different shapes

由图 12(a)可知,在较小的波长范围内,非球形粒子的传输衰减随波长的变化趋势与球形粒子的基本一致,没有太大起伏,但是在同一波长下,非球形粒子的传输衰减明显大于球形粒子,圆柱形粒子的传输衰减最大;由图 12(b)可知,非球形粒子的透射率整体小于球形粒子,波长越小,非球形与球形粒子的差距越大,反之,波长越大,非球形粒子的透射率越接近球形粒子的透射率。

当火星没有发生沙尘暴时,基于分布参数为 $r_{\text{eff}}=2.2 \mu\text{m}$, $v_{\text{eff}}=0.5 \mu\text{m}$ 的对数正态分布,针对非球形(椭球、圆柱和切比雪夫)火星沙尘粒子,当入射光波长为 $0.55 \mu\text{m}$ 时,图 13 和图 14 分别给出了利用 T 矩阵计算的传输衰减随着粒子浓度变化以及随高度的变化趋势,图 15 和图 16 分别给出了利用 T 矩阵计算的透射率随粒子浓度变化以及随高度的变化趋势,并与球形沙尘粒子进行对比。

由图 13(a)可知,随着粒子数浓度的增大,传输衰减线性增大。当椭球形火星沙尘粒子的轴比较小时,其总体传输衰减与球形沙尘粒子基本相等,而轴比越大的椭球形沙尘粒子,其传输衰减越大;由图 13(b)可知,与球形火星沙尘粒子相比,圆柱形火星沙尘粒子的传输衰减较大,并且圆柱形火星沙尘粒子的底面半径和半高的比值越大,其传输衰减越大;由图 13(c)可知,相比于球形粒子,切比雪夫形粒子的传输衰减较小,并且切比雪夫形粒子的变形参数越小越接近球形粒子。由总体趋势表明:椭球形、圆柱形以及切比雪夫形粒子和球形火星沙尘粒子的传输衰减有一致的趋势,并且椭球形和圆柱形粒子尺寸的比值越接近于 1,切比雪夫形粒子的变形参数越小,它们的传输衰减越接近于球形粒子的值。

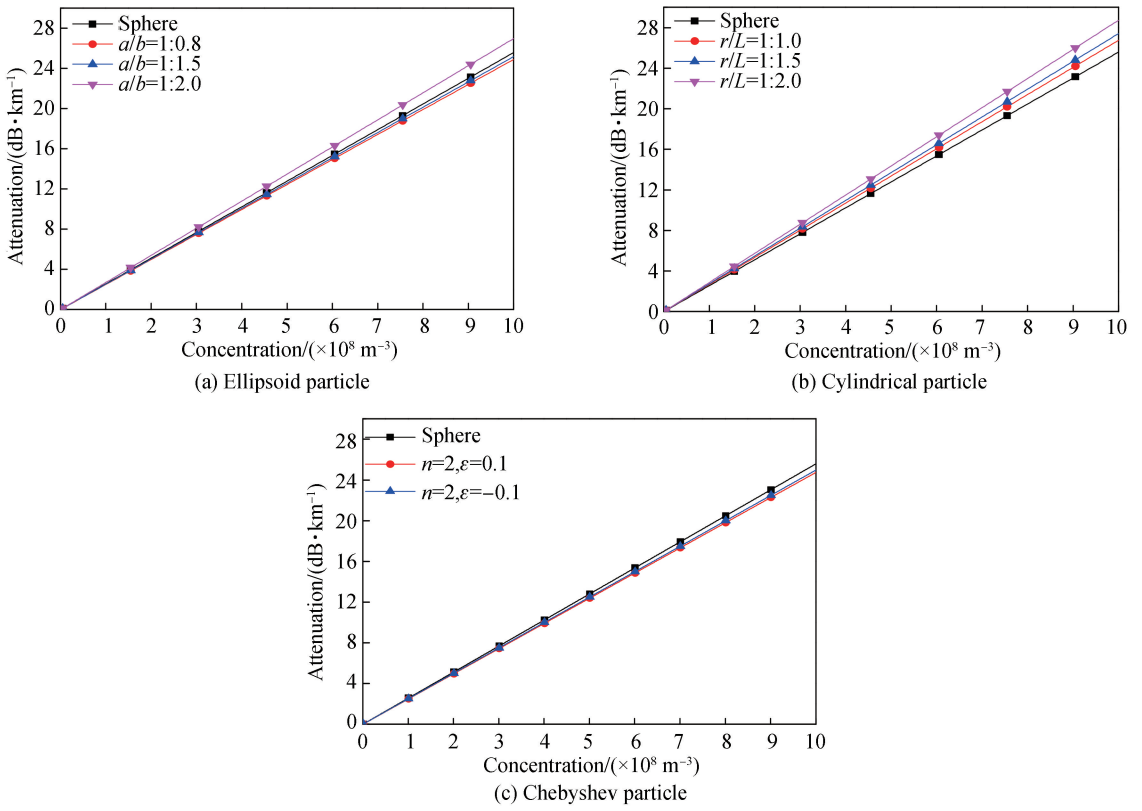


图 13 传输衰减随粒子浓度的变化

Fig.13 Variation of transmission attenuation with particle concentration

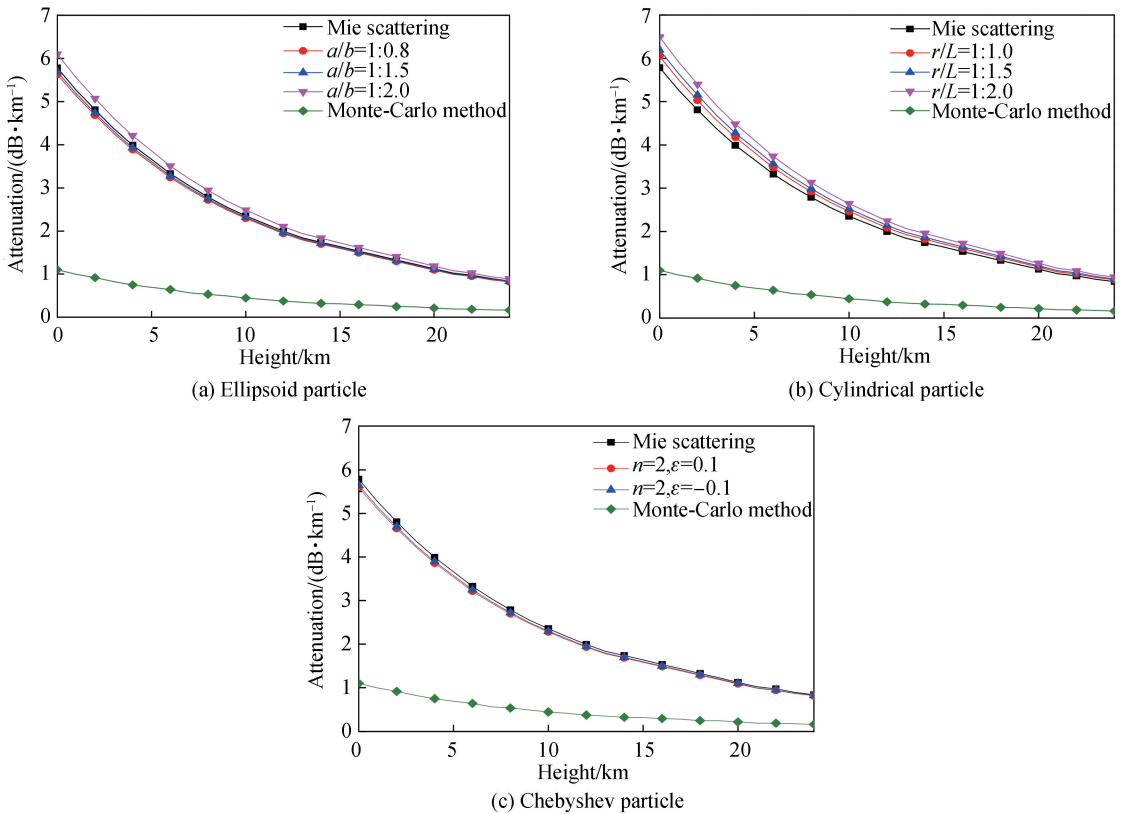


图 14 传输衰减随高度的变化

Fig.14 Variation of transport attenuation with height

由图 14 可知,当沙尘粒子浓度较大时需要考虑多次散射问题,通常采用蒙特卡罗方法计算传输衰减,在没有发生沙尘暴时,计算得到的传输衰减随着高度增加逐渐减小,这是因为在火星环境中同一地区中,随着高度的增加,粒子数浓度越来越小,所以传输衰减逐渐减小.总体相比可知:利用蒙特卡罗方法计算的多次散射下的传输衰减比利用 Mie 理论和 T 矩阵计算的单次散射下的传输衰减小的多,这是因为多次散射现象随着沙尘粒子浓度的增加会变得越明显,因此蒙特卡罗方法得到的传输衰减略小.

由图 15(a)可看出,火星沙尘浓度逐渐增大时透射率呈指数减小,当椭球形火星沙尘粒子的轴比为1/0.8时,椭球形沙尘粒子总体的透射率与球形沙尘粒子的透射率的变化趋势基本一致,而轴比为 1/2 时的椭球形沙尘粒子的透射率与球形沙尘粒子透射率之间的差值最大达到了 0.015 69.由图 15(b)可知,与球形火星沙尘粒子相比,圆柱形火星沙尘粒子的透射率较小,并且圆柱形火星沙尘粒子的底面半径和半高的比值越大,其透射率越小,底面半径和半高的比值为 1/2 时,其透射率与球形沙尘粒子透射率之间的差值最大达到了 0.033 3.由图 15(c)可知,相比于球形粒子,切比雪夫形粒子的透射率较大,并且切比雪夫形粒子的变形参数越小越接近球形粒子.总体趋势表明:椭球形、圆柱形以及切比雪夫形粒子和球形火星沙尘粒子的透射率有一致的趋势,并且椭球形和圆柱形粒子尺寸的比值越接近于 1,切比雪夫形粒子的变形参数越小,它们的传输衰减越接近于球形粒子的值.

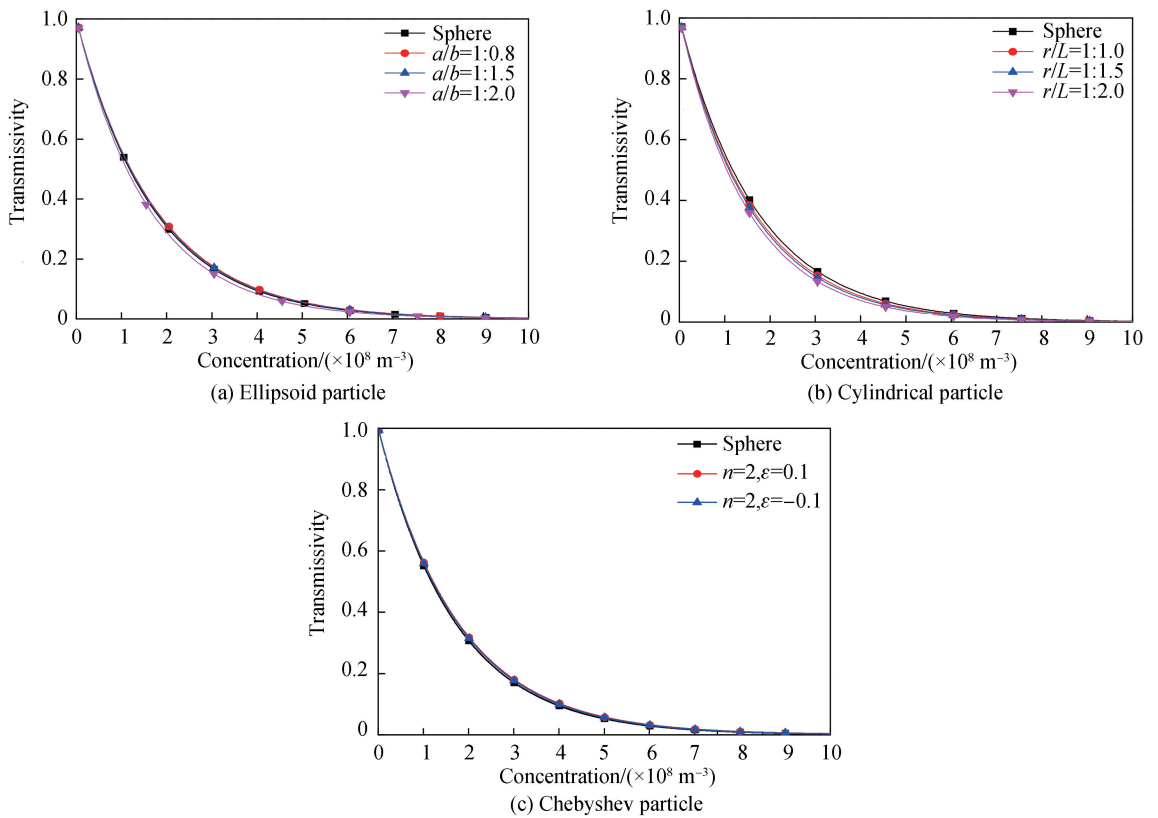


图 15 透射率随粒子浓度的变化

Fig.15 Change of transmissivity with particle concentration

由图 16 可知,在没有发生沙尘暴时,随着高度的增加,利用三种方法得到的透射率都是逐渐增大,这是因为在火星环境中同一地区中,随着高度的增加,粒子数浓度越来越小,所以透射率逐渐增大.总体相比可知:由于蒙特卡罗方法考虑了多次散射现象,因此计算得到的透射率比用 Mie 理论和 T 矩阵法得到的透射率大很多.

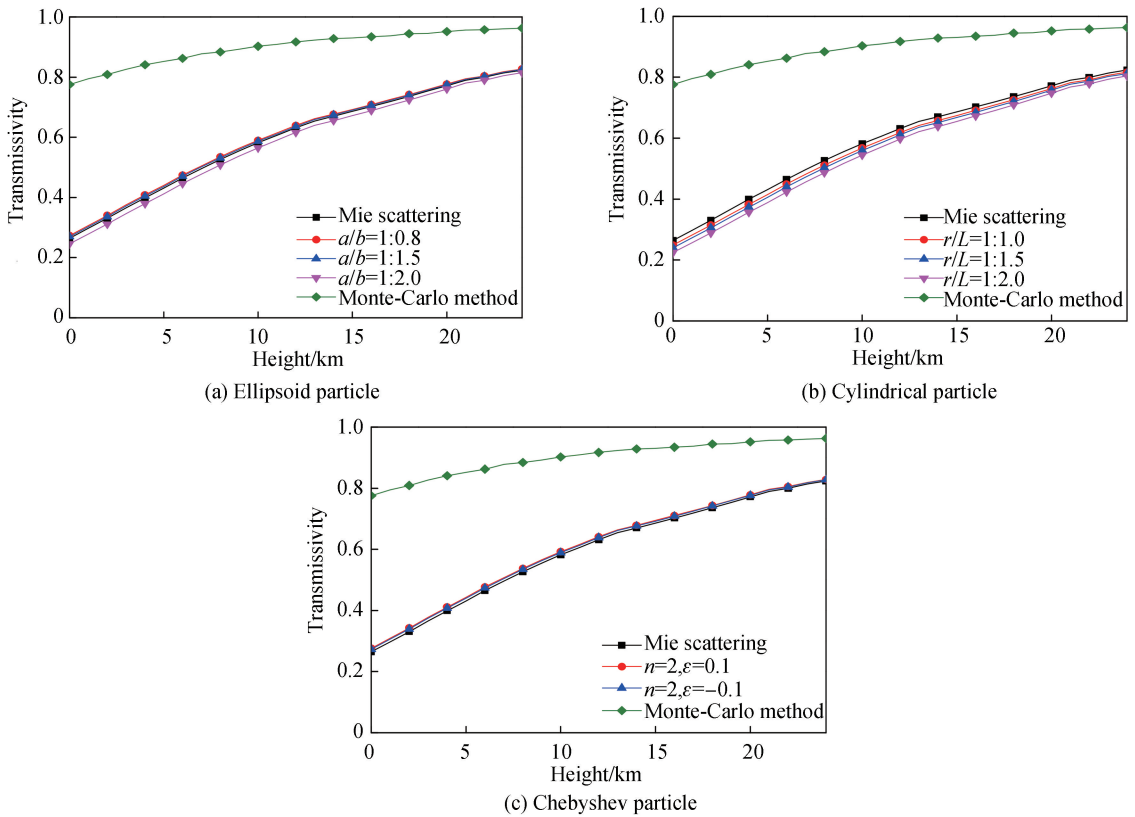


图 16 透射率随高度的变化
Fig.16 Change of transmissivity with height

4 结论

本文基于 T 矩阵理论,在以往球形粒子的基础上研究非球形火星沙尘粒子的光散射特性,并将非球形粒子的散射特性与球形粒子进行对比.结果表明:非球形与球形火星沙尘粒子的消光效率因子 Q_{ext} 和散射效率因子 Q_{sca} 存在很大不同,而切比雪夫粒子的散射特性与球形粒子的最接近;对于服从对数正态分布的一定浓度非球形沙尘粒子的散射特性,与文献[10]进行对比,吻合较好;最后研究了球形与非球形火星沙尘粒子的传输衰减和透射率随粒子数浓度、波长以及海拔的变化趋势,发现非球形火星沙尘粒子的变化趋势与球形基本一致,并且其尺寸的比值越接近于 1,它们与球形粒子越接近.该研究对于分析火星的气候变化、改善火星光学探测设备性能以及提高未来火星上无线光通信性能具有重要的理论意义.

参考文献

- [1] GROTZINGER J P, BLAKED F, CRISP J, *et al.* Mars science laboratory: First 100 sols of geologic and geochemical exploration from bradbury landing to genelg[C]. Lunar & Planetary Science Conference, 2013.
- [2] PANG K, AJELLO J M, HORD C W, *et al.* Complex refractive index of Martian dust: Mariner 9 ultraviolet observations[J]. *Icarus*, 1976, **27**(1): 55-67.
- [3] ELTETO A, TOON O B. Retrieval algorithm for atmospheric dust properties from Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer data during global dust storm 2001A[J]. *Icarus*, 2010, **210**(2): 566-588.
- [4] DOMINIKA D D, OLGA M, FERNANDO M, *et al.* Scattering matrices of Martian dust analogs at 488nm and 647nm [J]. *Icarus*, 2015, **250**: 83-94.
- [5] VINCENDON M, AUDUARD J, ALTIERI F, *et al.* Mars Express measurements of surface albedo changes over 2004-2010[J]. *Icarus*, 2015, **251**:145-163.
- [6] OLIVA F, GEMINALE A, D' AVERSA E, *et al.* Properties of a Martian local dust storm in Atlantis Chaos from OMEGA/MEX data[J]. *Icarus*, 2018, **300**: 1-17.
- [7] YANG Yu-feng, QIN Jian-hua, WANG Zhao-lei. Influence of Martian dust aerosol on laser transmission characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(3): 0319001
- [8] 杨玉峰,秦建华,王昭雷. 火星沙尘气溶胶对激光传输特性的影响[J]. 光子学报, 2018, **47**(3):0319001.
- [8] CHEN-CHEN H, PEREZ-HOYOS S, SANCHEZ-LAVEGA A. Dust particle size and optical depth on Mars retrieved

- by the MSL navigation cameras[J]. *Icarus*, 2019, **319**: 43-57.
- [9] POLLACK J B, OCKERT-BELL M E, SHEPARD M K. Viking Lander image analysis of Martian atmospheric dust[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1995, **100**(E3): 5235-5250.
- [10] MERRISON J P, GUNNLAUGSSON H P, JENSEN J, *et al.* A miniature laser anemometer for measurement of wind speed and dust suspension on Mars[J]. *Planetary and Space Science*, 2004, **52**(13): 1177-1186.
- [11] CHASSEFIERE E, DROSSART P, KORABLEV O. Post-Phobos model for the altitude and size distribution of dust in the low Martian atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1995, **100**(E3): 5525-5539.
- [12] XU Qiang, WANG Dong-qin, WANG Xu, *et al.* Computation and analysis on scattering characteristics of single nonspherical particles of atmospheric haze by T matrix algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2017, **46**(11): 207-213.
徐强,王东琴,王旭,等. 应用 T 矩阵法对大气灰霾简单非球形粒子散射特性的计算与分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(11): 207-213.
- [13] WANG Rong-rong, WU Zheng-sen, ZHANG Yan-yan, *et al.* Transmission characteristics of terahertz signal in fog[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(8): 2662-2667.
王蓉蓉,吴振森,张艳艳,等. 太赫兹波段信号在雾中的传输特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(8): 2662-2667.
- [14] OCKERTBELL M E, BELL J F, POLLACK J B, *et al.* Absorption and scattering properties of the Martian dust in the solar wavelengths[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1997, **102**(E4): 9039-9050.
- [15] FEDOROVA A A, MONTMESSIN F, RODIN A V, *et al.* Evidence for a bimodal size distribution for the suspended aerosol particles on Mars[J]. *Icarus*, 2014, **231**: 239-260.
- [16] 李挺. 大气悬浮颗粒物的光散射特性研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.