

doi:10.3788/gzxb20184703.0329001

火星沙尘气溶胶对激光传输特性的影响

杨玉峰¹, 秦建华¹, 王昭雷²

(1 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 西安 710048)

(2 国家电网河北省电力公司检修分公司, 石家庄 050070)

摘 要:对火星沙尘气溶胶粒子进行分析,利用对数正态分布拟合了火星沙尘的尺寸分布.分别用 Mie 理论和 Monte Carlo 方法研究了不同波长的激光在火星沙尘条件下的传输特性,分析了火星上沙尘条件下的传输衰减、透射率和能见度随粒子质量浓度的变化关系,给出了波长为 0.55 μm 时能见度随粒子质量浓度的变化曲线,并将两种方法的计算结果进行了比较.结果表明:随着粒子质量浓度的增加,能见度先迅速降低后再缓慢降低并趋于 2 km 左右,粒子浓度越高多次散射现象越明显,利用 Monte Carlo 方法计算的能见度比 Mie 理论计算的结果更高.在选择的几个波长中,沙尘条件下 7.46 μm 的激光传输衰减最小,因此更适合火星无线激光通信.

关键词:火星;Mie 理论;Monte Carlo 方法;衰减;透射率;能见度

中图分类号:TN012

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)03-0329001-6

Influence of Martian Dust Aerosol on Laser Transmission Characteristics

YANG Yu-feng¹, QIN Jian-hua¹, WANG Zhao-lei²

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

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

Abstract: The properties of the martian dust aerosols was studied, and the log-normal distribution of particle sizes was used to fit the particle size distribution of the martian dust aerosols. The transmission characteristics of laser with different wavelength were studied by using Mie theory and Monte Carlo method. Under the condition of dust, the variety of the visibility, transmissivity and attenuation with particle mass concentration was analyzed. The curve of visibility along with particle mass concentration at wavelength of 0.55 μm was given, and the calculation results of Mie theory and Monte Carlo method were compared. The results show that the visibility drops rapidly and then decreases slowly and tend to be about 2km with the increase of particle mass concentration. The higher the particle concentration is, the more obvious the phenomenon of multiple scattering is, and the visibility calculated by Monte Carlo method is higher than Mie theory. In the several selected wavelengths, the laser transmission attenuation at wavelengths of 7.46 μm is minimal under the condition of dust, so it is the most suitable for wireless laser communication on Mars.

Key words: Mars; Mie theory; Monte Carlo method; Attenuation; Transmissivity; Visibility

OCIS Codes: 290.4210; 290.4020; 290.2200; 290.5820; 140.3430

0 引言

火星是太阳系的第四颗行星,与地球相邻,其自转周期为 24 时 37 分,与地球非常接近,因此也有明显的季节性气候.1971 年,世界上第一艘绕火星航天器 Mariner 传回的照片显示火星正在进行一次超大规模的沙

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61405157, 61377080)资助

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

通讯作者:秦建华(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信和大气传输. Email: 1342818640@qq.com

收稿日期:2017-11-09;录用日期:2017-12-08

<http://www.photon.ac.cn>

尘暴.图片显示除了北半球的那几座山峰和南极地区外,完全看不清外貌,经过6周之后,能见度才有所提高,此次沙尘暴从开始到结束总共经历了三个多月^[1].1997年9月,Mars Global Survey飞船进入绕火星飞行轨道,此后数年的观测资料都表明火星上常年有大大小小不同规模的沙尘暴发生,并且火星上的沙尘暴并不罕见而是频繁发生,甚至在彼此相距几公里内就有6个以上的小沙尘暴^[2].沙尘暴在火星气候系统中发挥着重要的作用,它对探测火星宇宙飞船安全运行、宇航员安全作业、火星上实施激光通信等具有重要影响.尤其是对无线激光通信,其主要的影响因素是能见度和激光传输特性.火星沙尘暴时的沙尘气溶胶粒子浓度越高能见度就越低,激光传输时会受到粒子的散射和吸收,使传输效率不断衰减,严重影响激光传输特性以及能见度.因此,研究激光在火星沙尘条件下的传输特性对于未来的火星无线激光通信具有重要的参考意义.

1995年CLANCY^[3]等利用 γ 分布拟合了火星沙尘气溶胶的粒径分布,并与文献[4]进行对比,发现两者基本一致,并且给出了 $0\sim 25\ \mu\text{m}$ 波段的复折射率.1999年TOMASKO^[5]等利用 γ 分布拟合了火星沙尘气溶胶的粒径分布,并与文献[6]进行对比,分别采用截面加权平均方差为0.2和0.5两种参数,结果证明两个文献中的粒径分布基本一致,并且截面加权平均方差越大,得到的复折射率越大,但单次散射反照率基本一致.2010年ELTETO^[7]等对文献[8]和[9]提供的火星沙尘复折射率进行研究,发现两个数据提供的折射率虽然基本相似,但是前者更加符合火星沙尘的条件.2013年FEDOROVA^[10]等利用对数正态分布拟合了火星沙尘粒子的尺寸分布,结果表明离火星球面高度范围为 $10\sim 13\ \text{km}$ 时,粒子数浓度范围为 $10^2\sim 10^3\ \text{cm}^{-3}$.

本文针对火星沙尘的物理特性进行分析,并利用对数正态分布对粒子尺度分布进行拟合,计算了不同浓度条件下能见度、透射率和传输衰减随波长的变化关系;最后利用Mie理论和Monte Carlo方法计算并分析了能见度、透射率和传输衰减随粒子质量浓度的变化关系.

1 火星沙尘气溶胶粒径分布

大量实验和研究表明,火星沙尘粒子的粒径分布可以用 γ 分布^[4]和对数正态分布^[6,10]描述,HANSEN^[11]指出,不同的粒径的分布函数具有相同的单散射特性,MONTMESSIN^[12]等指出,粒子的粒径大于 $0.01\ \mu\text{m}$ 时其粒径分布可以由对数正态分布更好地描述.其粒径概率分布为

$$n(r) = \frac{c}{r} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_g)^2}{2(\ln \sigma)^2}\right) \quad (1)$$

式中, c 为一个常数,通常取 $c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$, r_g 和 σ 分别为几何平均直径和标准差,这两个参数与粒子有效半径和有效分布宽度的关系为

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

$$v_{\text{eff}} = \exp((\ln \sigma)^2) - 1 \quad (3)$$

根据文献[6],取粒子有效半径和有效分布宽度分别为 $r_{\text{eff}} = 2.34\ \mu\text{m}$, $v_{\text{eff}} = 0.86$.采用对数正态分布拟合得到火星沙尘气溶胶的粒径分布曲线如图1.

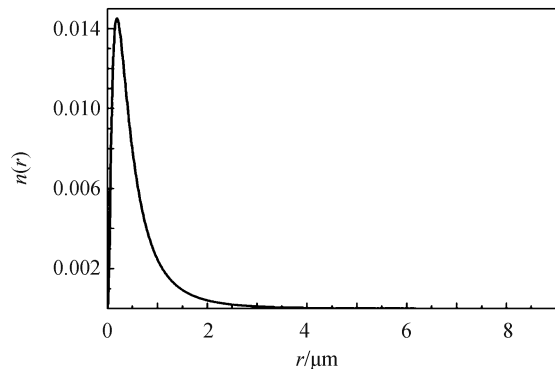


图1 火星沙尘粒子的粒径分布
Fig.1 Particle size distribution of dust aerosol particles

2 数值模拟及分析

虽然假设火星沙尘粒子大部分为非球形粒子或不规则的粒子更合适,但根据测量结果表明消光系数对其形状并不敏感^[10],因此可以利用Mie理论研究沙尘粒子的单粒子散射、消光和吸收系数^[13].激光在气溶胶中的传输衰减与气溶胶的粒径分布及粒子数浓度有关,当随机分布的气溶胶粒子比较稀少时,可认为激光在传播过程中只有单次散射.对于具有一定尺度分布的球形粒子,总的衰减、散射和吸收系数为

$$\mu_i = N \int_0^{\infty} \sigma_i(r) n(r) dr \quad (i = t, s, a) \quad (4)$$

式中, N 为气溶胶粒子数浓度, $n(r)$ 是气溶胶粒子粒径分布函数, σ_t 、 σ_s 和 σ_a 分别为单个粒子的消光、散射和吸收截面.能见度与衰减系数的关系为

$$V = \frac{3.912}{\mu_{10.55}} \quad (5)$$

因此,根据式(4)和式(5)可得气溶胶粒子数密度和粒径分布的关系为

$$N = \frac{3.912}{V \int_0^{\infty} \sigma_{10.55}(r) n(r) dr} \quad (6)$$

根据 Lamber-Beer 定律,当光强为 I_0 的激光通过距离为 l 的介质后,透射强度的表达式为

$$I = I_0 \exp\left[-\int_0^l \sigma_t(\lambda) dl\right] \quad (7)$$

传输衰减(dB/km)为

$$\mu \text{ (dB/km)} = 4.343 \times \mu \text{ (1/km)} \quad (8)$$

2.1 传输衰减和透射率随波长的变化关系

复折射率由实部和虚部两部分组成,虚部的绝对值越大对应的散射能力越强,实部的绝对值越大对应的吸收能力越强,火星沙尘复折射率实部和虚部如图 2^[4,14].基于复折射率,利用 Mie 理论计算沙尘气溶胶粒子的传输衰减和透射率.

火星上不同地区和高度对应的沙尘粒子浓度如表 1^[10]所示.分别得到相应沙尘浓度条件下红外波段激光的传输衰减和透射率随波长变化的关系,如图 3.

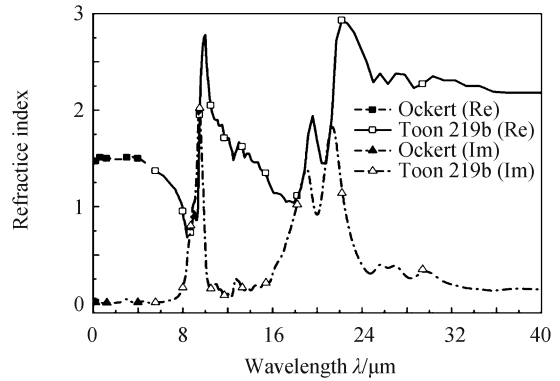


图 2 火星沙尘复折射率
Fig.2 Complex refractive index of Martian dust

表 1 火星沙尘粒子浓度

Table 1 Concentration of Martian dust particles

Area	Latitude	Height	Concentration (N)
Northern hemisphere	$>60^\circ$	18 km	$1.8 \times 10^9 / \text{m}^3$
Northern hemisphere	$<60^\circ$	18 km	$1.1 \times 10^9 / \text{m}^3$
Southern hemisphere	$<50^\circ$	22 km	$4.0 \times 10^8 / \text{m}^3$

图 3(a)、(b)分别为传输衰减和透射率随波长的变化关系,可知在沙尘条件下,传输衰减总体呈先减小后增加再减小的趋势,透射率则呈先增大后减小再增大的趋势.沙尘粒子浓度越大传输衰减随之变大,透射率则随之变小.

在波长为 $7.46 \mu\text{m}$ 时的透射率达到最高,衰减最小,并且粒子浓度为 $4.0 \times 10^8 / \text{m}^3$ 时衰减仅为 2.33 dB/km,而沙尘粒子浓度为 $1.1 \times 10^9 / \text{m}^3$ 和 $1.8 \times 10^9 / \text{m}^3$ 时对应的传输衰减分别为 6.41 dB/km 和 10.49 dB/km,在 $0.21 \sim 40 \mu\text{m}$ 波段达到最小,因此在中红外波段采用 $7.46 \mu\text{m}$ 激光在火星上进行激光通信为最佳选择.

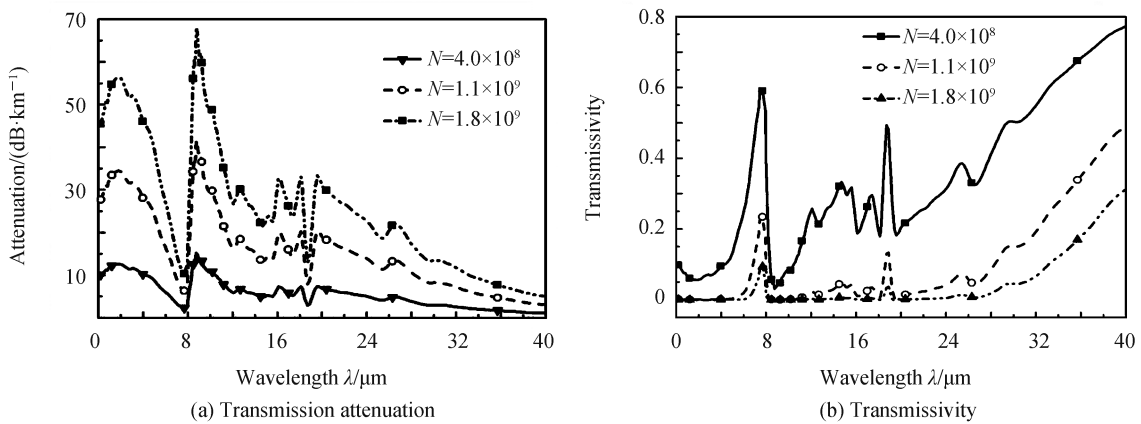


图 3 传输衰减和透射率随波长的变化曲线

Fig.3 Variation curve of transmission attenuation and transmissivity with wavelength

2.2 传输衰减随粒子质量浓度的变化关系

针对激光通信中常用的几个波长进行分析,如表 2^[4,14].基于复折射率,利用 Mie 理论和蒙特卡罗方法^[15]分别计算了沙尘气溶胶粒子的传输衰减和透射率.

表 2 火星沙尘的复折射率

Table 2 Complex refractive index of Martian dust

$\lambda/\mu\text{m}$	0.35	0.5	0.7	1.015	3.4	7.46	10.6
Refractive index	$1.50+0.039i$	$1.52+0.011i$	$1.51+0.003i$	$1.50+0.003i$	$1.52+0.013i$	$1.16+0.06i$	$2.5+0.16i$

利用 Mie 理论方法给出了几个常用波长的激光在火星沙尘条件下的传输衰减,如图 4,可知传输衰减与粒子的质量浓度呈正比关系,激光在 0.35~3.4 μm 波段以及 10.6 μm 处的传输衰减随粒子数浓度的变化基本一致,而在 7.46 μm 处的传输衰减增加最慢,当粒子质量浓度为 3000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,激光在 7.46 μm 波段的传输衰减仅为 2 dB/km.因此,波长 7.46 μm 时进行无线激光通信是最佳选择.

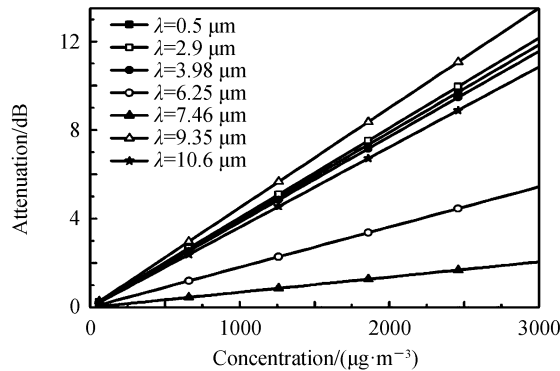


图 4 Mie 理论计算得到的传输衰减随粒子质量浓度的变化曲线

Fig.4 Variation curve of transmission attenuation with particle mass concentration by Mie theory

图 5 分别给出了用 Monte Carlo 方法和 Mie 理论计算 $\lambda=0.5 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=7.46 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=9.35 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ 时激光的传输衰减随粒子质量浓度变化的结果.

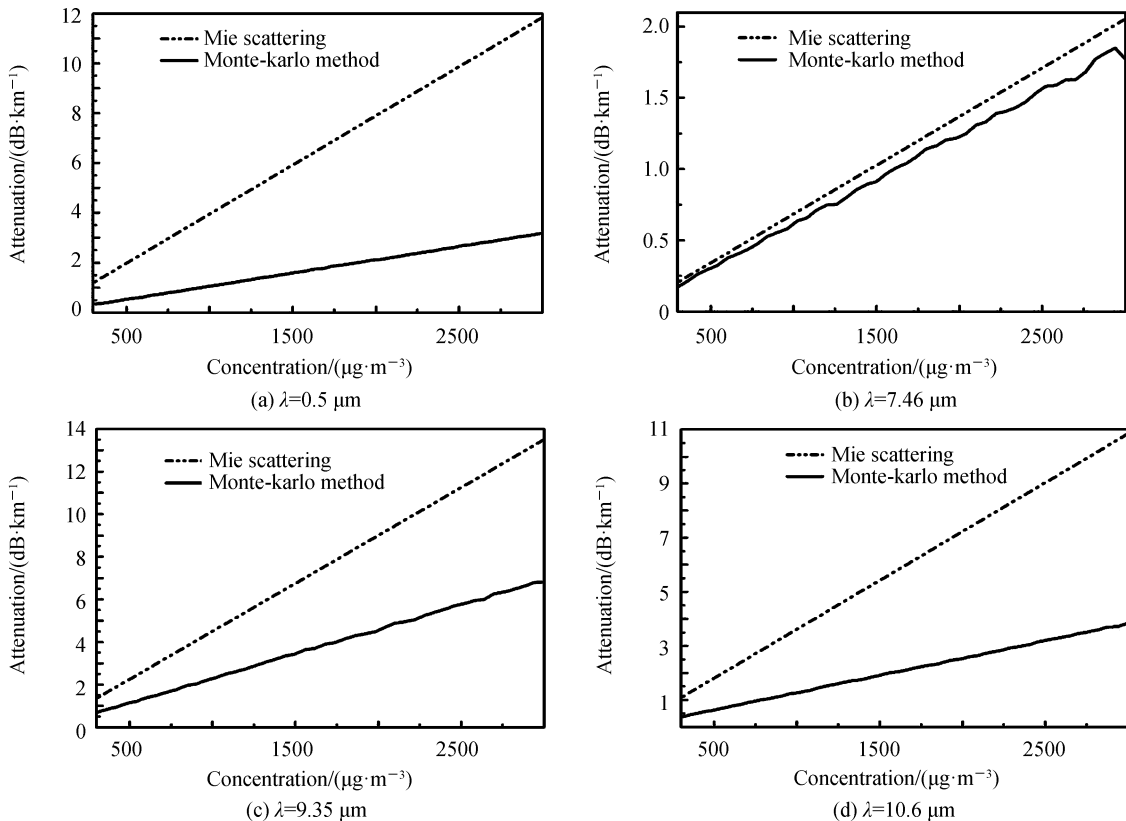


图 5 传输衰减随粒子浓度变化关系

Fig.5 Variation curve of transmission attenuation with particle mass concentration

由图 5 可知,四个波长具有相同的趋势,传输衰减与粒子质量浓度之间呈正比关系,利用 Monte Carlo 方法计算的结果比 Mie 理论计算的结果偏小,粒子质量浓度越大,二者偏差越大.其原因是沙尘粒子浓度越高,多次散射现象越明显,多次散射方法计算的传输衰减更小.四图相比可知,随着沙尘粒子质量浓度的增加,激光在波长为 $7.46 \mu\text{m}$ 时的传输衰减增加得最慢,并且两种方法计算的差值较小, $9.35 \mu\text{m}$ 激光传输衰减最大,因此火星上沙尘条件下采用 $7.46 \mu\text{m}$ 激光进行通信较好.

2.3 透射率随粒子质量浓度变化关系

图 6 分别为用 Monte Carlo 方法和 Mie 理论计算 $\lambda=0.5 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=7.46 \mu\text{m}$ 、 $\lambda=9.35 \mu\text{m}$ 和 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ 时激光透射率随粒子质量浓度变化的结果.

由图 6 可知,四个波长具有相同的趋势:随着粒子质量浓度的增加透射率逐渐减小, $\lambda=7.46 \mu\text{m}$ 时激光透射率最大,并且利用 Monte Carlo 方法计算的结果比 Mie 理论计算的结果稍大,并且粒子的质量浓度越大,偏差就越大,多次散射方法计算的透射率更大.四图相比可知,随着沙尘粒子浓度的增加, $7.46 \mu\text{m}$ 激光的透射率减速较慢.在 $3000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,利用 Monte Carlo 方法,波长 $7.46 \mu\text{m}$ 时激光的透射率为 0.65,而在其他波段的透射率均小于此波段,并且 $7.46 \mu\text{m}$ 激光利用 Mie 理论和 Monte Carlo 两种方法计算的透射率差值更小.

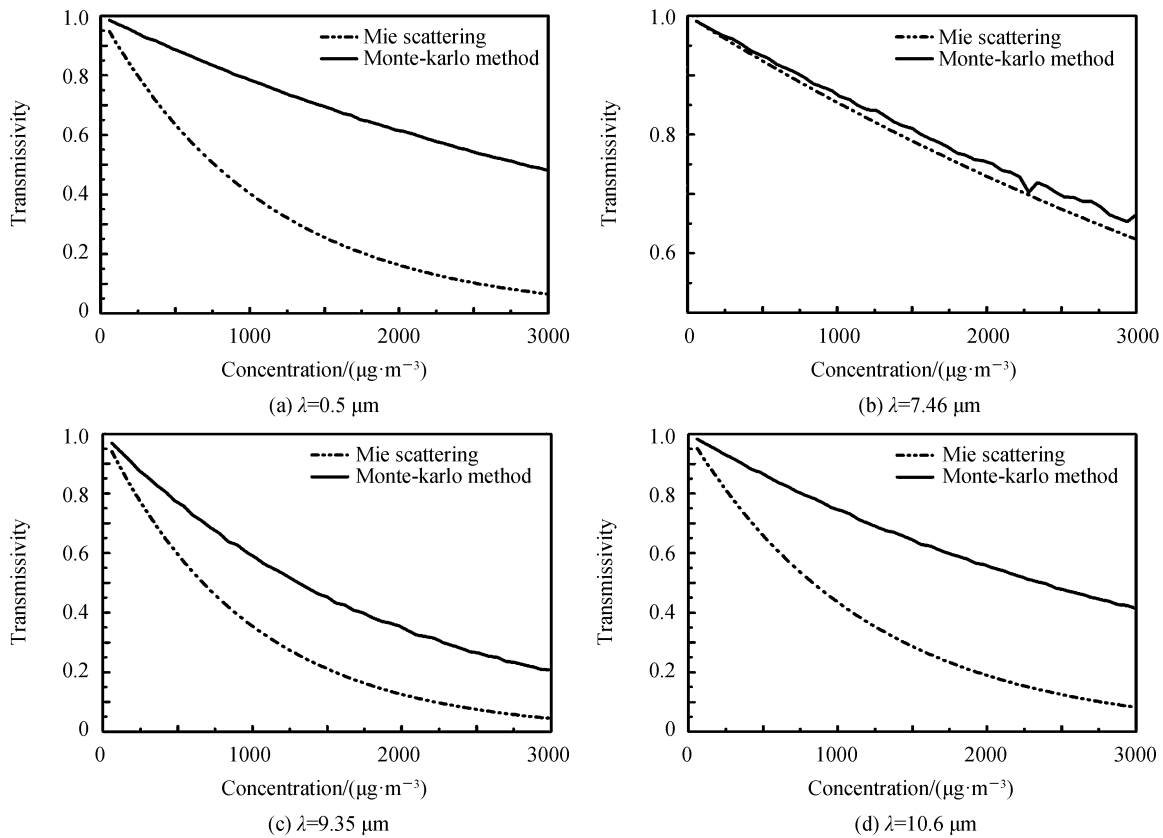


图 6 透射率随粒子质量浓度的变化曲线

Fig.6 Variation curve of transmissivity with particle mass concentration

2.4 能见度随粒子质量浓度变化关系

图 7 为用 Monte Carlo 方法和 Mie 理论计算 $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 时激光能见度随粒子质量浓度变化的结果, $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 激光波长对应的复折射率为 $m=1.5+0.007i$ ^[6].

由图 7 可知,能见度随沙尘粒子质量浓度的增加先是迅速减小后缓慢减小,利用 Monte Carlo 方法计算的结果比利用单次散射计算的结果大,多次散射方法计算的传输距离更大,并且随着粒子质量浓度的增加,两个方法计算的能见度都趋向 2 km 左右.

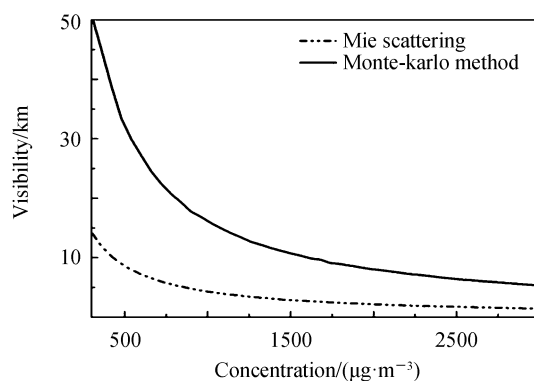


图7 能见度随粒子质量浓度的变化曲线

Fig.7 Variation curve of visibility with particle mass concentration

3 结论

采用对数正态分布对火星沙尘气溶胶的粒径分布进行了拟合,利用 Monte Carlo 方法、Mie 散射理论和 Lambert-Beer 定律,对火星上沙尘气溶胶的光散射特性进行了分析,并研究了传输衰减、透射率和能见度随火星沙尘粒子质量浓度的变化关系.结果表明,当入射光波长一定时,随着粒子浓度的增大,透射率逐渐减小,能见度先是迅速降低而后缓慢降低并趋于平稳.在此过程中,由于多次散射更加明显,因此单次散射比多次散射的计算结果更小,并且二者的差距随着粒子浓度的增大而减小,最终能见度都趋于 2 km 左右.在 0.2~10.6 μm 波段,波长为 7.46 μm 的激光明显比其他波段的传输衰减要小,因此在火星上此波长更适合光通信.

参考文献

- [1] STEINBACHER R H, KLIORE A, LORELL J, *et al.* Mariner 9 science experiments: preliminary results[J]. *Science*, 1972, **175**(4019):293.
- [2] CANTOR B A, JAMES P B, CAPLINGER M, *et al.* Martian dust storms: 1999 Mars orbiter camera observations[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2001, **106**(E10):23653-23687.
- [3] CLANCY R T, LEE S W, GLADSTONE G R, *et al.* A new model for Mars atmospheric dust based upon analysis of ultraviolet through infrared observations from Mariner 9, Viking, and Phobos[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1995, **100**(E3):5251-5263.
- [4] TOON O B, POLLACK J B, SAGAN C. Physical properties of the particles composing the Martian dust storm of 1971-1972[J]. *Icarus*, 1977, **30**(4):663-696.
- [5] TOMASKO M G, DOOSE L R, LEMMON M, *et al.* Properties of dust in the Martian atmosphere from the Imager on Mars Pathfinder[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1999, **104**(E4):8987-9007.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] WOLFF M J, CLANCY R T. Constraints on the size of Martian aerosols from Thermal Emission Spectrometer Observations[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2003, **108**(E9):5097.
- [9] WOLFF M J, SMITH M D, CLANCY R T, *et al.* Constraints on dust aerosols from the Mars Exploration Rovers using MGS overflights and Mini - TES[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2006, **111**(E12):41-51.
- [10] 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**(231):239-260.
- [11] HANSEN, J. E, TRAVIS L. D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, **16**:527-560
- [12] MONTMESSIN F, RANNOU P, CABANE M. New insights into Martian dust distribution and water - ice cloud microphysics[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2002, **107**(E6):4-1-4-14.
- [13] MISHCHENKO M I, DLUGACH J M, YANOVITSKIJ E G, *et al.* Bidirectional reflectance of flat, optically thick particulate layers: an efficient radiative transfer solution and applications to snow and soil surfaces[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 1999, **63**(2-6):409-432.
- [14] OCKERTBELL M E, RD B J, POLLACK J B, *et al.* Absorption and scattering properties of the Martian dust in the solar wavelengths.[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, **102**(E4):9039-9050.
- [15] WU Zhen-sen, YOU Jin-g uang, YANG Rui-ke. Study on laser attenuation character in sand and dust storms[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(9): 1075-1080.
吴振森,由金光,杨瑞科.激光在沙尘暴中的衰减特性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1075-1080.