文章编号:1001-5078(2013)01-0024-05

·红外技术及应用 ·

近红外波段气溶胶的消光特性研究

李丽芳¹,张记龙^{1,2},李 晓^{1,2},王志斌^{1,2},陈媛媛^{1,2} (1.中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心,山西太原 030051; 2.中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西太原 030051)

摘 要:在已知大气气溶胶折射率和气溶胶谱分布的基础上,对近红外波段的气溶胶消光特性进行了研究。利用 Mie 散射理论计算并讨论了气溶胶的消光、散射、吸收效率因子随尺度参数的变化和消光系数随半径和波长的变化,并且在 MATLAB 中对各种变化情况进行了仿真。结果表明,三种气溶胶粒子的消光和散射能力依次为沙尘性粒子,水溶性粒子,烟煤。消光系数 在粒子半径和入射波长相近时达到最大,并且粒子半径对消光、散射、吸收系数的影响比入射 波长更明显。这些结论可以为红外辐射在大气中的衰减计算和分析提供依据。 关键词:气溶胶;消光特性;效率因子;消光系数 中图分类号:O648 文献标识码:A DOI:10.3969/j. issn. 1001-5078.2013.01.005

Study on extinction characteristics of the aerosol in near-infrared bands

LI Li-fang¹, ZHANG Ji-long^{1,2}, LI Xiao^{1,2}, WANG Zhi-bin^{1,2}, CHEN Yuan-yuan^{1,2}

(1. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Optoelectronic Information and Instrument, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement(North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Based on the refractive indices of atmospheric aerosols and the measured values of aerosol size distribution, aerosol extinction characteristics have been studied in Near-infrared bands. The paper uses Mie scattering theory to calculate and analyze the characteristics of the extinction efficiency, scattering efficiency, absorption efficiency and extinction coefficient with various aerosols radius and wavelength, which is simulated with MATLAB. The results show that the scattering capability lines in order as such: the dust aerosol, the dissolvable particle and the smoke aerosols. Extinction coefficient of the particle is the biggest when the radius is close to the incident wavelength, and the impact of the particle radius on the extinction, scattering, absorption coefficient is more severe than the incident wavelength. These results can provide reference for calculating and analyzing the attenuation of infrared radiation in the atmosphere.

Key words: aerosol; extinction characteristics; efficiency factor; extinction coefficient

1 引 言

目标如飞机、导弹等在飞行时,会发出一定能量 的红外辐射,红外辐射在不同波段上的大气传输效 率不一样,所以在红外技术进行定位和测距的过程 中常利用此特点进行研究^[1],由于目标红外辐射在 大气传输过程受到各种影响而导致衰减,而气溶胶 的影响最为突出,因此,研究气溶胶对红外辐射的衰 减十分必要。目前在利用红外技术定位和测距的过

基金项目:国家自然科学基金仪器专项基金(No. 61127015);国家自然基金主任基金(No. 61040062);国际科技合作项目(No. S2012ZR0247);山西省国际科技合作项目(No. 2010081038)资助。

作者简介:李丽芳(1987-),女,硕士生,研究方向:大气气溶胶 散射的研究。E-mail:lbh5517259@163.com 收稿日期:2012-05-03;修订日期:2012-06-18 程中,气溶胶散射的影响经常采用的是经验公式计 算,所以针对定位和测距过程需要对近红外波段气 溶胶粒子的衰减特性进行研究。

气溶胶大多为非球形,由于气溶胶尺度较小,因 此可以采用等容方法处理后利用 Mie 散射理论^[2-9] 讨论气溶胶的散射特性^[9-11]。本文利用 Mie 散射 理论对球形粒子的消光、散射、吸收效率因子随尺度 参数的变化和消光、散射、吸收系数随粒子半径和入 射波长的变化进行了仿真并且对其衰减特性进行了 分析。

2 气溶胶的消光、散射、吸收系数

目标辐射能量在大气中传输的过程中,将受到 大气分子和气溶胶粒子的散射和吸收。气溶胶粒子 对辐射传输能的散射和吸收称为气溶胶的衰减即消 光。消光、散射、吸收系数的表达式如下:

$$K_{\text{ext}}(\lambda, r, m) = \pi \int_{r_1}^{r_2} Q_{\text{ext}}(\lambda, r, m) n(r) r^2 dr \quad (1)$$

$$K_{\rm sca}(\lambda, r, m) = \pi \int_{r_1}^{r_2} Q_{\rm sca}(\lambda, r, m) n(r) r^2 dr \quad (2)$$

$$K_{\rm abs}(\lambda, r, m) = \pi \int_{r_1}^{r_2} Q_{\rm abs}(\lambda, r, m) n(r) r^2 dr \quad (3)$$

$$Q_{\text{ext}}(\lambda, r, m) = \frac{2}{\chi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \operatorname{Re}(a_n + b_n) \quad (4)$$

$$Q_{\rm sca}(\lambda, r, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \left(|a_n|^2 + |b_n|^2 \right)$$
(5)

 $Q_{\rm abs}(\lambda, r, m) = Q_{\rm ext}(\lambda, r, m) - Q_{\rm sca}(\lambda, r, m) (6)$

式中, $K_{ext}(\lambda, r, m)$ 表示气溶胶消光系数;n(r)为气 溶胶粒子的尺度分布; $Q_{ext}(\lambda, r, m)$ 为衰减(消光) 效率因子; $Q_{sca}(\lambda, r, m)$ 是散射效率因子; $Q_{abs}(\lambda, r, m)$ 是吸收效率因子; $x = 2\pi r/\lambda$ 是尺度参数,其中, λ 是入射波的波长;r是球形粒子的半径;m是气溶胶 的折射率。 $a_n \pi b_n$ 成为 Mie 系数,其由复杂的贝塞 尔函数给出,我们可以利用贝塞尔函数的递推关系, 编写 MATLAB 程序,实现 Mie 系数的计算。

2.1 气溶胶粒子的折射率

由于气溶胶粒子的折射率决定于构成气溶胶粒 子的化学组成,不同化学组成的气溶胶粒子折射率 变化很大,显示不同种类的气溶胶的吸收和散射特 性,同时大部分气溶胶折射率是波长的函数,表明同 种类的气溶胶对不同波长辐射的散射和吸收差异。

1983年,IAMAP(国际气象与大气物理协会) 提出大气气溶胶的标准辐射大气(SPA)模型 (WMO)^[12],按成分将大气气溶胶分为六种:①水 溶性粒子;②沙尘性粒子;③海洋性粒子,由海浪 溅沫形成,可看作含 30% 的海盐和 70% 的水; ④煤烟;⑤火山灰;⑥75% 硫酸液滴。表 1 给出了 沙层性粒子、烟煤、水溶性粒子在可见光($\lambda = 0.69 \ \mu m$)和近红外($\lambda = 0.86 \ \mu m$ 和 $\lambda = 1.3 \ \mu m$) 波段的复折射率。

表1 气溶胶粒子的折射率

Tab. 1 the refractive index of aerosol particles

wavelength∕µm	dust aerosol	smoke aerosols	dissolvable particle
0.69	1.53 - 0.008 i	1.75 – 0.43 i	1.53 – 0.007 i
0.86	1.52 - 0.008 i	1.75 – 0.43 i	1.52 – 0.012 i
1.3	1.46 - 0.008 i	1.75 – 0.45 i	1.51 – 0.02 i

2.2 近地面气溶胶的谱分布

众多的实际观测表明近地面气溶胶尺度谱分布可近似为幂指数分布(Junge)^[7]:

$$\frac{\mathrm{d}n(r)}{\mathrm{d}r} = N_0 r^{-(\Lambda+1)} \tag{7}$$

这种幂指数分布比较直观,数学处理最方便, N_0 表示气溶胶粒子数密度, Λ 表示 Junge 指数, Λ 一 般处于 2~4 之间,对于半径 r 在 0.1~10 µm 范围 内,一般有 Λ = 3,对于 r 在 0.02~0.1 µm 范围内, 一般有 Λ = 4。由于本文没有对气溶胶进行实测,取 N_0 为 100, Λ = 3 的谱分布进行计算。

3 气溶胶衰减特性的计算结果及讨论

3.1 不同性质气溶胶粒子的效率因子

沙尘性和水溶性粒子是陆地近地面空气中气溶 胶的主要成分,烟煤是城市地区气溶胶的重要成分 之一^[9],所以本文讨论这三种粒子的衰减特性。

图1给出了近红外波段(860 nm)气溶胶粒子 的消光、散射、吸收效率因子随尺度参数的变化。在 近红外波段,沙尘性粒子的折射率 m = 1.52 -0.008 i,烟煤粒子的折射率 m = 1.75 - 0.43 i,水溶 性粒子的折射率 m = 1.52 - 0.012 i,由图1(a)可以 看出,沙尘性粒子在尺度 x = 4 附近 Q_{sea}近达到最大 值,然后呈振动形式变化,且总体趋势变小,最后趋 近1.17 左右。此结论与文献[9]得出的结果一致。 同样,Q_{ext}也在尺度参数 x = 4 附近达到最大,最后随 着 x 的增大而趋于一个稳定的值。由图1(b)可以 看出,水溶性粒子粒子的 Q_{sea}在尺度参数 x = 4 附 近达到最大。由图1(c)可以看出,烟煤粒子在 x = 2 附近达到最大值,随着 x 的增大,最后趋近于 1.2,在 x < 90 时,烟煤粒子的散射效率因子总小 于沙尘性粒子,但是由于烟煤粒子折射率虚部大, 所以烟煤粒子的吸收效应较大。总体而言,在近 红外波段散射能力依次为沙层性粒子、水溶性粒 子、烟煤。



图 2(a)、图 2(b)给出了近红外波段(860 nm) 烟煤胶粒子的消光、散射、吸收效率因子随半径和波 长变化的归一化结果。图 2(c)给出了波长为 860 nm,当气溶胶粒子的实部为 1.52 时,虚部分别 为 0.01,0.1,1 时,气溶胶粒子 Q_{ext} 随半径变化的归 一化结果。以往的研究表明,气溶胶各项消光参数 对虚部的变化非常敏感,虚部即使有一个很小的变 化也会对总消光产生很大的影响,从图 2(c)得出, 随着折射率虚部的增大,即吸收增大,Q_{ext}曲线上的 振动大大减小并最后消失。



part of refractive index

3.2 不同性质气溶胶粒子的衰减系数

图 3 给出了近红外波段(860 nm) 三种气溶胶 粒子的消光、散射、吸收系数随粒子半径的变化的归 一化结果。从图中可以得到与上面相同的结果,在 近红外波段三种粒子的散射能力依次为沙尘性粒 子,水溶性粒子,烟煤。并且消光系数在粒子半径和 入射波长相近时达到最大。



Fig. 3 extinction, scattering, absorption coefficient of the different nature of aerosol particle changes with the particle radius in near-infrared(0.86 nm) band

图4给出了近红外波段(860 nm)三种气溶胶 粒子的消光、散射、吸收系数随粒子波长的变化的归 一化结果。从图4可以得到对于半径相同的沙尘性 粒子和水溶性粒子,两种粒子的折射率相近,它们的 消光、散射、吸收系数随波长的变化相似。与图3相 比,可知在近红外波段粒子半径对消光、散射、吸收 系数的影响比入射波长更明显。



4 小 结

在近红外波段,三种气溶胶的散射能力依次为 沙尘性粒子,煤烟和水溶性粒子。消光系数在粒子 半径和入射波长相近时达到最大,并且粒子半径对 消光、散射、吸收系数的影响比入射波长更明显。当 气溶胶粒子实部不变时,随着折射率虚部的增大,即 吸收增大,Q_{eu}曲线上的振动大大减小并最后消失。

本文在研究近红外气溶胶消光特性时,由于缺 少实测资料,计算过程中气溶胶的大小和折射率采 用了较为权威的数据。利用本文的方法和结论可以 将不同地区气溶胶折射率及谱分布的实测资料进行 分析讨论得到符合不同地区情况的近红外波段气溶 胶消光特性。

参考文献:

- [1] Lu Yuan, Shi Jiaming, Ling Yongshun, et al. Research on infrared passive location[J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 30(6):405-409. (in Chinese) 路远,时家明,凌永顺,等. 红外被动定位研究[J]. 红 外与激光工程, 2001, 30(6):405-409.
- [2] Aden A L, Kerker M. Scattering of electromoynclic waves from two concentric spheres[J]. Journal of Applied Physics, 1951:22 - 242.
- [3] Bohren C B, Hulman D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: Wiley, 1983.
- [4] L Liu, H Wang, B Yu, et al. Improved algorithm of light scattering by a coated sphere [J]. China Particuology, 2007, 5:230-236.
- [5] Yulin Xu, Bo A S Gustafson. A generalized multiparticle Mie-solution:further experimental verifcation [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2001, 70:395-419.
- [6] Grainger R G, J Lucas, G E Thomas, et al. The calculation of Mie derivatives [J]. Appl. Opt., 2004, 43 (28): 5386 5393.
- [7] Chen Xiuhong, Wei Heli, Li Xuebin, et al. Calculating model for aerosol extinction from visible to far infrared wavelength [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009,21(2):183-189. (in Chinese)

陈秀红,魏合理,李学彬,等.可见光到远红外波段气 溶胶衰减模式[J].强激光与粒子束,2009,21(2): 183-189.

- [8] Ma Jinji, Cheng Jin. Using the Mie theory to calculate aerosol optical characterization [J]. J. At. Mol. Phys., 2005,22(4):701-706.(in Chinese) 麻金继,陈瑾. 用 Mie 散射理论计算大气气溶胶光学 特性 [J]. 原子与分子物理学报,2005,22(4): 701-706.
- [9] Huang Peiqiang, Sheng Xia. A number of scattering characteristics of atmospheric aerosol particles in troposphere and stratosphere[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 1996, 16(3):233-238. (in Chinese) 黄培强,盛夏. 对流层与平流层大气气溶胶粒子的若 干散射特性[J]. 气象科学, 1996, 16(3):233-238.
- [10] Liu Xichuan, Gao Taichang, Han Xiaodong. Effect of the character of condensation nucleus on raindrops scattering characteristics at near-infrared wave band [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(1):42 - 47. (in Chinese) 刘西川,高太长,韩小冬. 近红外波段凝结核性质对雨 滴散射特性响[J]. 气象科学, 2010, 30(1):42 - 47.
- [11] Song Zhengfang. Applications based on atmospheric optics
 [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. (in Chinese)
 宋正方.应用大气光学基础[M].北京:气象出版社, 1990.
- [12] Shi Guangyu. Atmospheric radiological [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京:科学出版社, 2007.