

沙尘暴对大气能见度影响的数值模拟与分析 *

李曙光¹ 刘晓东² 侯蓝田¹ 张焕平³

(¹ 燕山大学红外光纤与传感研究所, 秦皇岛 066004; ² 中国科学院物理所光物理国家重点实验室, 北京 100080;
晋中师范高等专科学校, 山西榆次 030600)

提要 本文从 Mie 散射理论出发, 通过数值法研究了大气中沙尘气溶胶粒子对可见光的散射和吸收特性以及由此而引起的大气消光问题, 讨论了这种消光效应对大气能见度的影响, 发现沙尘暴天气对可见光具有显著的散射和消光效应, 其中对于红光的消光最为严重, 沙尘暴天气对城市交通具有严重的影响。

关键词 沙尘 Mie 散射 消光系数 能见度

Theoretical Calculation about Influence of Sand Storm on Atmospheric Visibility

Li Shuguang¹ Liu Xiaodong² Hou lantian¹ Zhang Huanping³

(¹ Institute of infrared optical fibers and sensors, Yanshan University, Qinhuangdao, 066004)

Abstract Starting from Mie scattering theory the scattering and extinction characteristics of sand-dust particle on visible light have been studied by numerical method. Influence of the extinction effect on atmospheric visibility has been discussed. It is found that the scattering and extinction effect of sand storm on visible light especially red light is substantial. Sand storm has a bad effect on urban traffics.

Key words Sand and dust, Mie scattering, Extinction coefficient, Visibility

近年来, 由于人类活动对环境的破坏导致草原沙漠化越来越严重, 沙尘暴活动的范围和出现的频度日益扩大, 沙尘气溶胶粒子能够引起光的散射和吸收, 这种散射和吸收不但引起光的衰减, 对大气能见度产生不容忽视的影响, 而且将直接影响大气辐射的收支, 进而影响局部甚至全球气候的变化。^[1]对于沙尘暴性质以及在沙尘天气各种光探测仪的工作性能和工作环境的研究迫切需要这方面的定量数据。实际研究表明, 当有扬沙、浮尘天气发生时, 直径大于 $2.0 \mu\text{m}$ 的粒子比清洁大气时要增加 2030 倍, 当发生沙尘暴天气时大粒子所占的比例会更高。^[2]由于沙尘粒子数浓度的变化以及大粒径粒子所占比例的增大, 沙尘的消光特点和消光程度都会发生显著的变化。本文通过数值法研究不同粒径的沙尘粒子对可见光的散射和吸收特性, 以及不同类型的沙尘天气由于这种散射和吸收所引起的能见度的变化。

理论基础

Mie 散射理论是适用于球形粒子散射的经典理论, 空气中的沙尘粒子可以近似地以球形粒子处理

(实际测量表明沙尘粒子中有 50% 左右是球形粒子, 采用等容球方法处理, 仍可借用 Mie 理论进行计算), 沙尘粒子对光的吸收和衰减可以用吸收效率因子 Q_{abs} 和消光效率因子 Q_{ext} 来表示。

下面简要地给出相关的 Mie 公式^[3]。假设球形粒子的直径为 D , 入射光波长为 λ , 粒子的复折射率为 $n = n_r + i n_i$, 单粒子的散射截面 σ_{sca} 为:

$$\sigma_{sca} = \lambda^2 / 2\pi \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) (a_m^2 + b_m^2) \quad (1)$$

其中 a_m 和 b_m 是 Mie 系数, 散射截面与相应的粒子几何截面之比为无量纲的散射效率因子 (Q_{sca}):

$$Q_{sca} = 2/\alpha^2 \sum_{n=1}^{\infty} (2m+1) (a_m^2 + b_m^2) \quad (2)$$

其中 $\alpha = \pi D / \lambda$ 。类似地, 利用消光截面与相应的粒子几何截面之比可得粒子的消光效率因子 (Q_{ext}):

$$Q_{ext} = 2/\alpha^2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2m+1) (a_m^2 + b_m^2) \quad (3)$$

吸收效率因子 Q_{abs} 等于消光效率因子 Q_{ext} 减去散射效率因子 Q_{sca} :

$$Q_{abs} = Q_{ext} - Q_{sca} \quad (4)$$

实测结果表明^[4]一些分散性和凝集性气溶胶都遵从对数正态分布。另外通过对固体微粒破裂的过程特性的假设出发,可以得到微粒大小的分布渐近地趋向对数正态分布的结论^[5]：

$$R(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\eta D} \exp\left[-\frac{(\ln D - \delta)^2}{2\eta^2}\right] \quad (5)$$

其中 δ 和 η 分别为 $\ln D$ 的平均值和标准方差。

考虑到沙尘粒子的尺寸分布,波长为 λ 、强度为 I_0 的辐射通过距离为 L 的介质后,根据 Bouguer 定律其强度 I 可写成^[6]：

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-\int_0^L \kappa(\lambda) dl\right] \quad (6)$$

其中 $\kappa(\lambda)$ 为消光系数,它表示了粒子系统的消光能力,即对辐射的衰减能力。对于球形粒子可由下式计算：

$$\kappa(\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2}{4} Q_{ext} N(D) \lambda dD \quad (7)$$

相应地,可以定义粒子系统的吸收系数 σ_a ,它表示由于吸收而引起辐射衰减的能力：

$$\sigma_a(\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{\pi D^2}{4} Q_{abs} N(D) \lambda dD \quad (8)$$

$N(D)$ 为粒子的尺度谱分布：

$$N(D) = N_0 R(D) \quad (9)$$

N_0 表示沙尘粒子的浓度,即单位体积中的沙尘粒子数。

表 1 三种不同类型沙尘天气沙尘气溶胶粒子浓度的粒径分布(对不同地点和时间的测量结果取平均值)

粒径范围(μm)	< 0.43	0.65	1.1	2.1	3.3	4.7	5.8	9.0	> 9.0	合计
浮尘 ($\delta = -7.70$, $\eta = 0.790$)										
质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	32.3	26.1	33.1	68.3	69.0	51.7	30.0	37.0	58.3	406.6
粒子数浓度($10^6 / \text{m}^3$)	292.8	150.5	75.9	28.5	5.37	1.04	0.21	0.12	0.06	554.5
粒子数浓度百分比	52.8	27.2	13.7	5.14	0.97	0.19	0.038	0.022	0.010	100
扬沙 ($\delta = -7.68$, $\eta = 0.890$)										
质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	67.3	68.1	83.0	192.5	151.3	169.0	105.5	185.0	178.0	1199.4
粒子数浓度($10^6 / \text{m}^3$)	609.6	392.1	190.5	80.3	11.8	3.39	0.732	0.617	0.170	1289.2
粒子数浓度百分比	47.3	30.4	14.8	6.23	0.914	0.263	0.057	0.048	0.013	100
沙尘暴 ($\delta = -7.48$, $\eta = 0.995$)										
质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	159.3	162.1	210.6	333.9	256.2	276.3	250.0	307.5	708.4	2745.8
粒子数浓度($10^6 / \text{m}^3$)	1301.0	934.6	482.7	229.3	39.94	15.541	11.74	8.03	6.678	3029.5
粒子数浓度百分比	42.9	30.8	15.9	7.57	1.32	0.513	0.388	0.265	0.22	100

(1)单粒子散射、消光和吸收效率的数值模拟和分析

图 1 和图 2 分别表示粒径 D 为 $0.5 \mu\text{m}$ 和 $0.$

根据 Koschmieder 定律^[1]能见度与消光系数满足如下关系式：

$$V = -\ln \epsilon / \sigma \quad (10)$$

其中 V 为能见距离, σ 为消光系数, ϵ 为视觉对比阈值,一般可取为 0.020-0.05。本文中所涉及到的计算利用 Mathematica 软件编程,可以对 Mie 系数和进行精确计算,对散射效率因子 Q_{sc_a} 、消光效率因子 Q_{ext} 和吸收效率因子 Q_{abs} 的计算可以达到 $m = 50$,这对于本文的问题已经具有足够高的精度,在主频 (CPU) 为 1G 的微机上运行,整个计算耗时仅 8 小时左右。

数值模拟与分析

参考对贺兰山地区三大沙漠,即毛乌素沙漠、腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠春季沙尘气溶胶质量浓度的观测数据^[7]对于不同的地点和时间取其平均值,分别得到浮尘、扬沙和沙尘暴天气的气溶胶质量浓度的粒径分布,并进一步根据公式将其转化成粒子数浓度的粒径分布^[8]通过曲线拟合得到对数正态分布中的参数 δ 和 η 值,结果如表 1 所示。在可见光范围,沙尘粒子的复折射率^[9]取为 $= 1.53 - 0.008i$,下面对沙尘粒子的单粒子散射效率 Q_{sc_a} 、吸收效率 Q_{abs} 和消光效率 Q_{ext} 以及考虑粒度分布的消光系数 σ 和能见度 V 进行数值模拟。

$7 \mu\text{m}$ 的沙尘气溶胶粒子对不同波长的可见光的单粒子散射、消光和吸收效率,从图中可以看出,在可见光波段沙尘粒子的散射和消光效率相差很小,沙

尘粒子对可见光的吸收很小,粒子的消光主要由散射引起。粒径为 $0.5\mu\text{m}$ 的粒子的散射和消光效率的峰值位于 $0.4\mu\text{m}$ 附近,而粒径为 $0.7\mu\text{m}$ 的粒子的散射和消光效率的峰值位于 $0.5\mu\text{m}$ 附近。随着粒径的增大,散射或消光效率的峰值向长波方向移动;图3对 D 为 $0.5\mu\text{m}$ 、 $0.7\mu\text{m}$ 和 $1.0\mu\text{m}$ 的沙尘粒子的消光效率因子的比较也说明随着沙尘粒径的增大消光效率的峰值向长波方向移动,并且当沙尘粒径和辐射波长差不多时单粒子消光效率最高,即沙尘粒子对可见光的散射和消光效率与无量纲尺寸参数 $\alpha = \pi D/\lambda$ 有关。

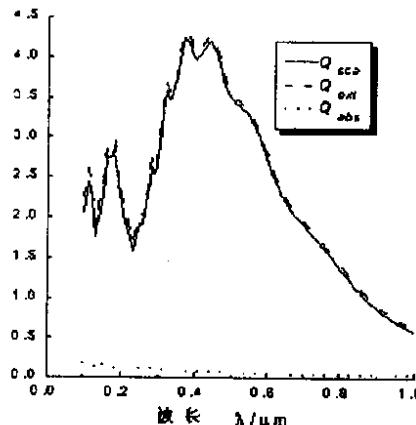


图1 粒径 $D = 0.5\mu\text{m}$ 沙尘粒子的散射、消光和吸收效率

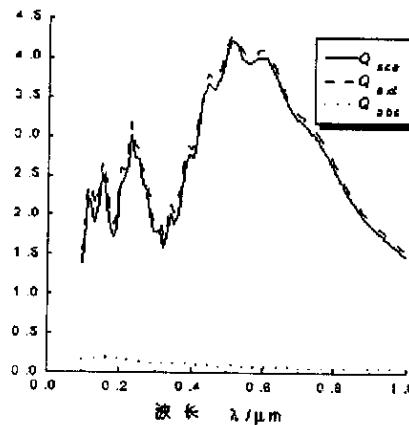


图2 粒径 $D = 0.7\mu\text{m}$ 沙尘粒子的散射、消光和吸收效率

(2)不同类型沙尘天气对可见光的消光效应和大气能见度的影响

由表1可以看出各种尺度的沙尘粒子数浓度按照浮尘、扬沙、沙尘暴的次序依次增大,其中扬沙时的总粒子数浓度是浮尘天气的2.3倍,沙尘暴时的总粒子数浓度是浮尘时的5.5倍,其中大尺度粒子占总粒子数的百分比按照浮尘、扬沙、沙尘暴天

气的次序增大。

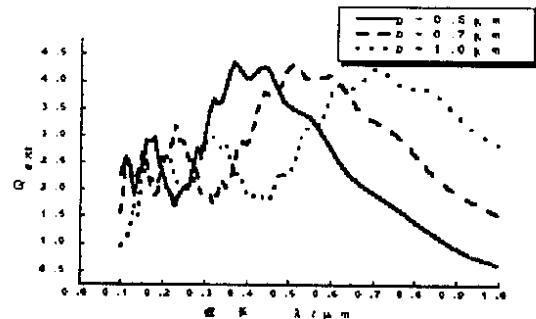


图3 粒径分别为 $D = 0.5\mu\text{m}$ 、 $0.7\mu\text{m}$ 和 $1.0\mu\text{m}$ 时沙尘粒子的消光效率

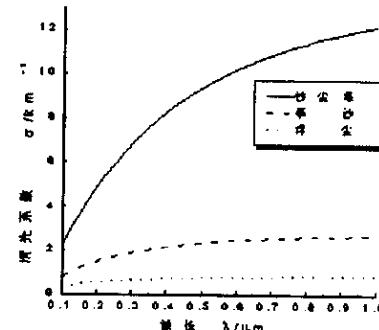


图4 三种不同沙尘天气消光系数随波长的变化规律

图4给出了三种不同类型沙尘天气消光系数随波长的变化规律,从中可以看出,在可见光波段($\lambda 10.4 - 0.76\mu\text{m}$),三种不同类型沙尘天气的消光系数都随着波长的增大而增大,其中沙尘暴天气对大气的消光最为严重且消光系数随波长的变化比较显著,沙尘暴天气对紫光的消光系数约为 8.3 km^{-1} ,对红光的消光系数可达 11.2 km^{-1} ,这与沙尘暴天气大尺度粒子所占比例增大有关;扬沙天气和浮尘天气对不同波长可见光的消光系数变化比较平稳,扬沙天气时的消光系数约为 $2.2 - 2.6\text{ km}^{-1}$,浮尘天气的消光系数更小约为 $0.73 - 0.83\text{ km}^{-1}$,通过分析可知沙尘暴天气对可见光的消光效应最显著,尤其对于红光最为严重。

图5给出了三种不同沙尘天气能见度随波长的变化规律,从图中可以看出三种不同类型沙尘天气大气的总体能见度按照浮尘、扬沙和沙尘暴的次序依次下降,三种天气能见度都随波长的增大而减小,在可见光波段浮尘天气能见度为 $4.1 - 3.63\text{ km}$,扬沙天气能见度为 $1.39 - 1.16\text{ km}$,沙尘暴天气能见度为 $0.36 - 0.27\text{ km}$ 。

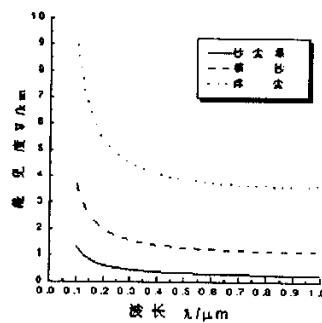


图 5 三种不同沙尘天气能见度随波长的变化规律

本文的理论计算是建立在总结不同天气沙尘粒径分布的大量的实测数据基础之上,其计算结果与实测沙尘天气的能见度变化相一致,如果发生特殊的强沙尘暴天气,大气能见度会更低。

从以上分析可以看出,三种沙尘天气对大气

的消光效应不同,对能见度的影响也不同。其中沙尘暴天气对大气的消光效应最为严重,使大气能见度显著下降,且随着波长的增大能见度降低,可见各种沙尘天气对可见光中红光的衰减最为严重,对红色物体的能见度最低。众所周知,城市交通中红色特别是红灯的警示作用很重要,沙尘天气特别是沙尘暴天气大气能见度的下降将对城市交通秩序产生不良的影响。

参 考 文 献

- [1] 沈志宝等, 大气科学 2000, 24(4): 541-547.
- [2] 戚天涛等, 高原气象 2001, 20(3): 291-297.
- [3] C. Bohren, et al, Absorption and scattering of light by small particles, New York: John Wiley, 1983, Chap. 5.
- [4] 董庆生等, 电波科学学报, 1996, 11(2): 29-32.
- [5] H. A. Fouks 著, 气溶胶力学, 北京: 科学出版社, 1960.
- [6] 陈正方, 应用大气光学基础, 气象出版社, 1990, 12.
- [7] 朱生杰等, 高原气象, 2001, 20(1): 82-87.
- [8] 董庆生, 电波科学学报, 1997, 12(1): 15-25.
- [9] 黄培强等, 气象科学, 1996, 9, 16(3): 233-239.
- [10] W. Viezee, 能见度测量技术, 气象出版社

(上接第 83 页)

并且 Zn 的衍射峰比 ZnO 的衍射峰强, 这说明在惰性气氛中制备的纳米粒子中主要含有大量的 Zn 和少量的 ZnO。这与元素分析结果相符。图 4b 为还原气氛(H_2)中制备的产品的 XRD 图, 可见与图 4c 相似, 并且, 金属 Zn 的衍射峰更强, 而 ZnO 的衍射峰基本消失, 说明还原气氛中制备的纳米粒子主要为金属 Zn。同样也与元素分析结果相符。图 4a 为氧气气氛中所得的纳米粒子的 XRD 图, 其分析结果表明主要是 ZnO 的纳米粒子。同样也与元素分析结果相符。由此可见, 通过改变反应气氛可以实现单质 Zn 和 ZnO 产品的可控制备。

结 论

1. 采用激光蒸凝法, 以金属 Zn 为靶材成功地制备出了金属 Zn 和 ZnO 纳米粒子, 产物粒子具有粒径小且分散性好的优点。

2. 不同的反应气氛制备的产物不同, 在惰性

气氛下产品纳米粒子是 Zn 和 ZnO 的混合物;而在氧气气氛下, 所得的纳米粒子是纯 ZnO; 在氢气气氛中得到较纯的 Zn 纳米粒子。实验结果表明, 通过改变反应气氛, 可以实现单质 Zn 和 ZnO 纳米粒子的可控制备。

3. 制备工艺条件对形成的纳米粒子有一定的影响, 反应压力和载气流量影响纳米粒子的形貌。

参 考 文 献

- [1] 町田 泰宏, 日本公开特许公报, 特开平 6-24743.
- [2] 沈茹娟等, 无机材料学报, 2001, 16(4): 625.
- [3] 沈茹娟等, 无机化学学报, 2000, 16(6): 906.
- [4] 刘超峰等, 无机材料学报, 1999, 14(3): 391.
- [5] 朱勇等, 无机材料学报, 1993, 8(1): 111.
- [6] R. Wu, et al, J. crystal growth, 2000, 217(3): 274.
- [7] R. Wu, et al, Scripta Materialia, 2000, 43: 841.
- [8] 谢长生等, CN1250701A, 2000-04-19.