

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2011.04.005

霾天气气溶胶谱分布特征分析

李学彬, 伽丽丽, 李建玉, 周凯兵, 徐青山

(中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 霾天气是一种常见的天气现象, 它严重影响大气能见度和大气光传输。为了研究霾气溶胶的特性, 利用粒子计数器对不同地区霾天气气溶胶实际测量结果使用 Junge 谱和对数正态谱对霾气溶胶粒子谱进行拟合, 得到不同地区霾气溶胶粒子谱分布的特征, 最后还分析了霾天气过程中气溶胶粒子大小随相对湿度变化规律。

关键词: 大气光学; 气溶胶; 霾; 谱分布

中图分类号: TN21

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2011)04-0274-06

Characteristics of Size Distribution of Haze Particles

LI Xue-bin, QIE Li-li, LI Jian-yu, ZHOU Kai-bing, XU Qing-shan

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The extinction characteristics of haze particles can cause the attenuation of atmospheric visibility and infrared light transmission. In order to study the characteristics of haze aerosol, the size distribution of haze aerosol particles are measured using optical particle counter. The characteristics of haze particles according to Junge and lognormal distribution theory are analyzed, and the size distribution of haze and fog with the variety of relative humidity is analyzed.

Key words: atmospheric optics; aerosol; haze; size distribution

1 引言

霾天气是指空气中的灰尘、硫酸与硫酸盐、硝酸与硝酸盐、有机碳氢化合物等非水成物组成的气溶胶系统造成的视野模糊、大气混浊并导致能见度恶化, 如果水平能见度小于 10 km, 这种天气即称为霾天气^[1]。霾气溶胶粒子从 0.001 μm

到 10 μm , 平均直径大约在 1~2 μm 左右。一般认为相对湿度小于 80% 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾造成的, 相对湿度大于 90% 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的, 相对湿度介于 80%~90% 之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同

收稿日期: 2010-04-12; 修改日期: 2011-03-17

基金项目: 中科院合肥物质科学研究院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助

E-mail: xbli@aiofm.ac.cn

造成的^[2]。由于灰尘、硫酸、硝酸等粒子组成的霾, 其对波长较长的光有很强的散射作用, 因而霾看起来呈黄色或橙灰色。在严重空气污染的地区, 经常出现霾天气, 又主要呈橙灰色, 因而也称之为灰霾天气。吴兑等^[3]对珠江三角洲地区灰霾天气进行了深入的研究, 提出了分辨雾和霾的方法。赵金平等^[4]对霾气溶胶的化学成分进行了研究。2010年6月1日起, 中国气象局发布的《霾的观测和预报等级》正式实施, 使对“灰霾”的判别、监测和预报有了正式统一的标准。目前国家行业标准对霾的判识条件有三个: 能见度、空气湿度和大气成分, 分别都有一定限值。比如, 能见度小于 10.0 km, 排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象造成的视程障碍, 湿度小于 80%, 可判识为霾。但霾的问题非常复杂, 不是一个界限能分清的, 如果湿度大于 80%, 还需要综合分析, 各地可根据实际情况判断。由于霾天气是大气污染以及二次污染直观的天气表现, 因此研究霾气溶胶谱分布特征是很有现实意义的。

本文根据在北京和厦门测量的霾天气气溶胶数据, 从霾气溶胶粒子的谱分布、霾与雾的区别和霾粒子受相对湿度的影响等方面进行了分析, 总结了两地区霾粒子谱分布的特征。

2 谱分布拟合及霾和雾对比分析

早在 20 世纪 50 年代, Junge^[5]根据大量观测资料的统计, 首先提出了一个简单的分布函数来近似描述粒子谱。其定义为^[6]

$$n(r) = dN/dr = cr^{-(\nu+1)}, \quad (1)$$

其中, r 为粒子半径, N 是单位体积的粒子数, 其尺度从最小的下限至 r ; c 是依赖于浓度的常数; 指数 ν 决定了分布曲线的斜率。 dN 是 dr 的每一增量所对应的粒子数。 $n(r)$ 的单位是 cm^{-3} 。个别测量的实际粒子谱可能相当大地偏离严格的幂指数形式, 然而平均来说, 幂指数规律似乎较好地代表了有多种多样来源和组成的气溶胶。尽管浓度可以差别很大, 但一般情况下指数 ν 在 2

和 4 之间变化。 $3 < \nu < 4$ 符合典型的霾, $\nu \approx 2$ 表征了雾。

对数正态分布是目前比较常用的一种谱分布, 对于某一种来源的气溶胶粒子谱一般可以用对数正态函数来描述, 其峰值半径称为模半径 r 。大气中几个主要粒子来源形成的气溶胶谱分布, 是几个正态分布即几个模的叠加。不同来源的粒子对应不同的模粒径 r 。对数正态分布表达式^[7]如 (2) 式所示

$$n(r) = \frac{dN}{dr} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \cdot \ln 10 \cdot r \cdot \ln \sigma_{gm}} \times \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_{gm})^2}{2 \ln^2 \sigma_{gm}} \right], \quad (2)$$

式中 N_0 是单位体积空气中的粒子总数, r_{gm} 和 σ_{gm} 为描述对数正态分布的两个特征参数, 分别叫做几何平均半径和几何标准偏差, $\ln \sigma_{gm}$ 也称为对数标准偏差。只要选择合适的参数, 原则上对数正态分布 (包括它们的叠加) 可以描述整个气溶胶粒子谱分布。

一般情况下一个粒子谱由三个模叠加而成: $r \leq 0.8 \mu\text{m}$ 的细粒模 (accumulation mode)、模半径 r 在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 的粗粒模 (coarse mode)、模半径 r 在 $1 \mu\text{m}$ 左右的中间模 (middle mode)。

2001、2002 和 2004 年在北京市、2003 和 2005 年在厦门使用散射角为 60° 的多道光学粒子计数器^[8-9]对霾气溶胶进行了测量, 测量前仪器经过严格定标。这里对霾气溶胶谱分布进行 Junge 谱和对数正态分布拟合。图 1 是霾和雾以及正常天气的气溶胶谱分布的对比, 可以看出, 霾天气过程中无论是大粒子浓度还是小粒子浓度都比正常天气大的多, 曲线斜率也大于正常天气, 相比于雾天气, 霾天气中的气溶胶小粒子浓度大于雾天气中气溶胶小粒子浓度, 而霾天气中气溶胶大粒子浓度远小于雾天气中气溶胶大粒子浓度。

图 2 是使用 Junge 分布对霾气溶胶谱分布进行拟合, 可以看出, 不同地区霾天气气溶胶谱分布的 Junge 指数在 3.5 附近, 且拟合误差较大。图

3 是霾和雾气象溶胶粒子谱分布拟合以及对比, 可以看出, 在粒子半径大于 $0.7 \mu\text{m}$ 时雾和霾谱分布可以使用对数正态分布来描述, 在粒子半径小于 $0.7 \mu\text{m}$ 时, 雾和霾谱分布都可以用 Junge 分布来描述. 图 4 是使用多个对数正态分布对霾气象溶胶谱分布的拟合, 可以看出, 使用两个或多个对数正态分布很好地描述霾气象溶胶粒子谱的特征.

几何平均半径都在 $1.1 \mu\text{m}$ 附近, 但对数标准偏差变化较大, 变化范围在 $0.3\sim 0.6$ 之间, 北京地区的中间模粒子浓度与厦门地区的中间模粒子浓度相当; 在粗粒模段, 北京地区霾气象溶胶的几何平均半径在 $2.8 \mu\text{m}$ 附近, 浓度很小, 北京 2002 年 1 月 17 日的霾气象溶胶没有粗粒模, 而厦门地区的霾气象溶胶粒子粗粒模特性不明显.

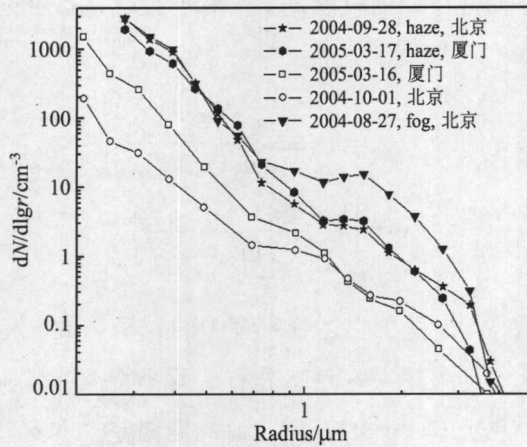


图 1 霾天气气溶胶粒子谱分布对比

Fig.1 Size distributions of haze particles

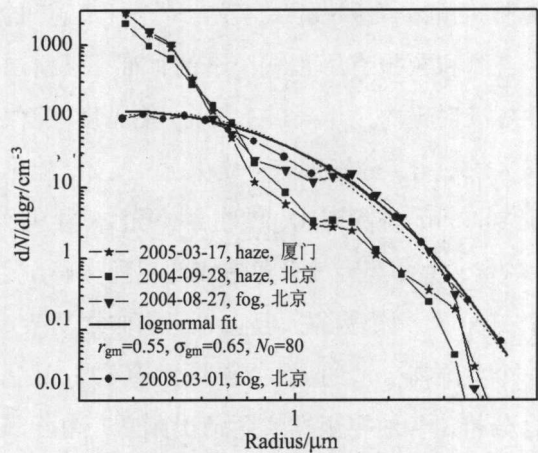


图 3 霾和雾天气气溶胶粒子谱分布对比

Fig.3 Comparison of size distributions of haze and fog

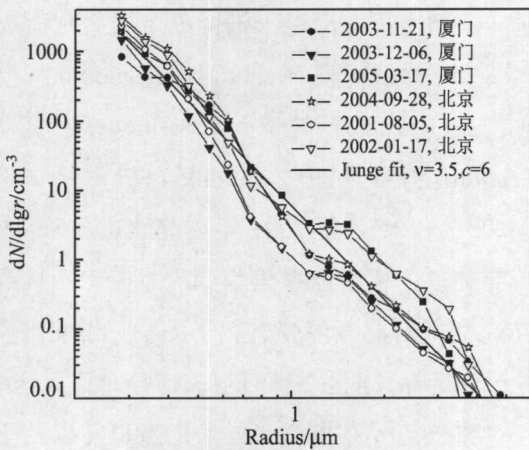


图 2 霾天气气溶胶粒子谱分布 Junge 拟合

Fig.2 Size distributions of haze particles of Junge fit

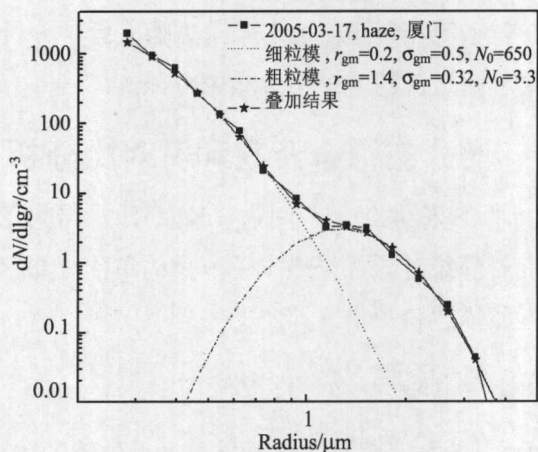


图 4 霾气象溶胶谱进行对数正态分布拟合

Fig.4 Size distributions of haze particles of lognormal fit

表 1 是图 2 中霾气象溶胶粒子谱使用对数正态分布拟合的参数, 可以看出, 在细粒模段, 厦门和北京两地的霾气象溶胶的几何平均半径都为 $0.2 \mu\text{m}$, 对数标准偏差也都在 0.4 附近, 但是北京地区的细粒模粒子浓度远大于厦门地区的细粒模粒子浓度; 在中间模段, 厦门和北京两地的霾气象溶胶的

表 1 还给出了雾粒子谱的对数正态分布拟合参数, 可以看出霾与雾粒子谱的区别: 1) 在细粒模段, 霾气象溶胶的几何平均半径小于雾气象溶胶的

几何平均半径, 在 $0.2 \mu\text{m}$ 附近, 而对数标准偏差大于雾气溶胶的对数标准偏差, 在 0.4 附近, 霾的细粒模粒子浓度远大于雾的细粒模粒子浓度; 2) 在中间模段, 霾气溶胶粒子的几何平均半径小于雾气溶胶的几何平均半径, 在 $1.1 \mu\text{m}$ 附近, 而

对数标准偏差大于雾气溶胶的对数标准偏差, 在 $0.4\sim 0.6$ 之间, 霾在中间模的粒子浓度远小于雾在中间模的粒子浓度; 3) 百花山顶上的雾粒子谱分布是由一个细粒模组成的, 模半径在 $0.55 \mu\text{m}$ 附近, 对数标准偏差和浓度分别为 0.65 和 80 cm^{-3} 。

表 1 霾和雾气溶胶粒子谱对数正态分布拟合结果

Table 1 Variations of r_{gm} , σ_{gm} and N_0 of haze particles

地区月份 / 参数	细粒模			中间模			粗粒模		
	$r_{gm}(\mu\text{m})$	σ_{gm}	N_0	$r_{gm}(\mu\text{m})$	σ_{gm}	N_0	$r_{gm}(\mu\text{m})$	σ_{gm}	N_0
2008-03-01 百花山, 雾天气	0.55	0.65	80	-	-	-	-	-	-
2004-08-27 北京, 雾天气	0.28	0.3	500	1.5	0.3	15	-	-	-
2003-11-21 厦门, 霾天气	0.2	0.4	650	1.0	0.6	2	-	-	-
2003-12-06 厦门, 霾天气	0.2	0.4	500	1.1	0.5	1	-	-	-
2005-03-17 厦门, 霾天气	0.2	0.5	650	1.4	0.32	3.3	-	-	-
2001-08-05 北京, 霾天气	0.2	0.45	1300	1.2	0.4	1.5	3	0.3	0.15
2002-01-17 北京, 霾天气	0.2	0.38	1000	1.0	0.6	1.0	-	-	-
2004-09-28 北京, 霾天气	0.2	0.42	1200	1.2	0.43	4	2.6	0.18	0.5

3 相对湿度对霾天气的作用

2004 年 8 月 6 日 06:00 北京市大兴区出现了霾天气过程, 随着相对湿度的增大 07:00 左右相对湿度达到极大值, 气溶胶粒子与水汽结合形成了最浓的霾和雾的混合体, 随着相对湿度的下降 08:00 以后粒子慢慢扩散, 10:00 以后霾消失。

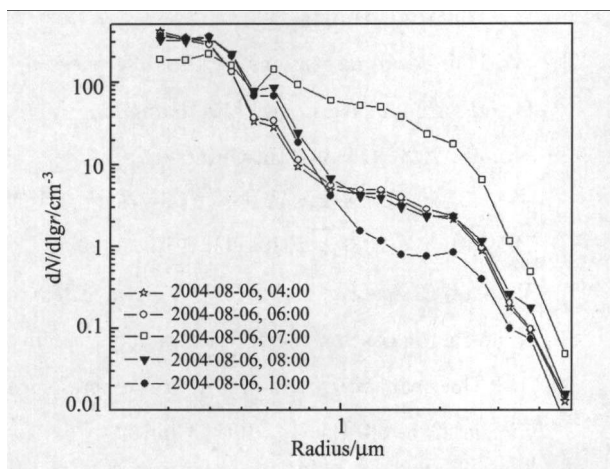


图 5 霾天气过程

Fig.5 Process of haze weathers

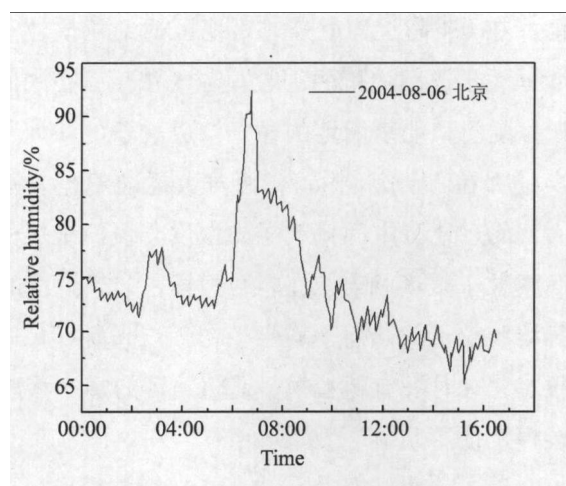


图 6 相对湿度随时间的变化

Fig.6 Variations of relative humidity

图 5 和图 6 是霾天气过程中相对湿度随时间的变化, 可以看出在 07:00 左右相对湿度达到 95% 以上, 此时雾和霾粒子浓度最大, 能见度最低。表 2 是霾天气过程气溶胶粒子谱对数正态分布拟合的结果, 可以看出, 在霾粒子转化为雾粒子的过程中: 细粒模几何平均半径增加, 对数标准偏

差稍微增大, 而细粒模粒子浓度却在减小; 中间膜的几何平均半径增加, 中间膜粒子浓度增大约 4 倍; 粗粒模的几何平均半径减小, 粗粒模粒子浓

度增大约 12 倍。随着相对湿度的减小, 中间模和粗粒模粒子浓度在变小, 而细粒模粒子浓度有所增大。

表 2 霾天气过程气溶胶谱对数正态分布拟合结果

Table 2 Variations of r_{gm} , σ_{gm} and N_0 of haze's weathers process

霾天气过程 参数 / 月份	细粒模			中间模			粗粒模		
	$r_{gm}(\mu\text{m})$	σ_{gm}	N_0	$r_{gm}(\mu\text{m})$	σ_{gm}	N_0	$r_{gm}(\mu\text{m})$	σ_{gm}	N_0
2004-08-06, 06:00	0.33	0.25	80	0.55	0.25	12	1.5	0.4	6
2004-08-06, 07:00	0.4	0.3	60	0.7	0.25	50	1.3	0.4	70
2004-80-06, 08:00	0.35	0.3	100	0.55	0.2	24	1.3	0.45	7
2004-08-06, 10:00	0.35	0.3	90	0.55	0.2	22	2	0.3	1.4

4 结 论

本文根据在北京和厦门测量的结果分析了霾天气气溶胶谱分布特性:

1) 在细粒模段, 厦门和北京两地的霾气溶胶粒子的几何平均半径都为 $0.2 \mu\text{m}$, 对数标准偏差也都在 0.4 附近, 但是北京地区的细粒模粒子浓度远大于厦门地区的细粒模粒子浓度; 在中间模段, 厦门和北京两地的霾气溶胶粒子的几何平均半径都在 $1.1 \mu\text{m}$ 附近, 而对数标准偏差差别较大, 北京地区中间模粒子的浓度与厦门地区的中间模粒子浓度相当; 在粗粒模段, 北京地区的霾气溶胶粒子的几何平均半径在 $2.8 \mu\text{m}$ 附近, 浓度很小, 有时没有粗粒模, 厦门地区的霾气溶胶粗粒模特征不明显。

2) 霾与雾的区别是: (a) 在细粒模段, 霾气溶胶粒子的几何平均半径小于雾气溶胶粒子的几何平均半径, 霾的细粒模粒子浓度远大于雾的细粒模粒子浓度; (b) 在中间模段, 霾气溶胶粒子的几何平均半径小于雾气溶胶粒子的几何平均半径, 霾气溶胶粒子中间模浓度远小于雾气溶胶粒子中间模浓度。

3) 随着相对湿度的增大霾粒子转化为雾粒子, 细粒模和中间模模半径增大, 粗粒模模半径

减小, 细粒模粒子浓度在减小; 中间膜和粗粒模粒子浓度在增大。

由于测量结果有限, 有些结论还存在不足, 但这对于霾气溶胶的及研究还是有参考价值的。

参考文献:

- [1] Wu Dui. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data [J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(3): 327-330(in Chinese).
吴兑. 霾与雾的识别和资料分析处理 [J]. 环境化学, 2008, 27(3): 327-330.
- [2] Wu Dui. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. *Guangdong Meteorology*, 2006, (1): 9-13(in Chinese).
吴兑. 再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义 [J]. 广东气象, 2006, (1): 9-13.
- [3] Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the pear river delta [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(4): 510-516(in Chinese).
吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. 气象学报, 2006, 64(4): 510-516.

- [4] Zhao Jinping, Tan Jihua, Bi Xinhui, et al. Themass concentrations of inorganic elements in atmospheric particles during haze period in Guangzhou [J]. *Environmental Chemistry*, 2008, **27**(3): 322-326(in Chinese).
赵金平, 谭吉华, 毕新慧, 等. 广州市灰霾期间大气颗粒物中无机元素的质量浓度 [J]. *环境化学*, 2008, **27**(3): 322-326.
- [5] Junge C E. Atmospheric Chemistry [C]. In *Advances in Geophysics* [M]. New York: Academic Press, 1958.
- [6] Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. *Atmospheric Aerosol Tutorial* [M]. Beijing: Meteorology Publishing House, 1995: 10-12(in Chinese).
章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程 [M]. 北京: 气象出版社, 1995: 10-12.
- [7] Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Advanced Atmosphere Physics* [M]. Beijing: Meteorology Publishing House, 1991: 38-42(in Chinese.)
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学 (上册) [M]. 北京: 气象出版社, 1991: 38-42.
- [8] Li Xuebin, Gao Yiqiao, Ji Yufeng, et al. Development of optical particle counter of LED lamp-house [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(3): 406-409(in Chinese).
李学彬, 高亦桥, 纪玉峰, 等. LED 光源光学粒子计数器的研制 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(3): 406-409.
- [9] Hu H L, Li X B, Zhang Y C, et al. Determination of the refractive index and size distribution of aerosol from dual-scattering-angle optical particle counter measurements [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16): 3864-3870.

作者简介: 李学彬 (1980-), 男, 安徽太和县人, 博士, 主要从事大气气溶胶光学特性方面的研究。