

北京市区冬季大气气溶胶空气动力学 尺度谱分布的研究

赵德山 汤大钢 周舟

(中国环境科学研究院大气环境研究所)

马黎明 王怡力

(北京工业大学)

提 要

本文讨论了北京市区冬季大气气溶胶空气动力学尺度的各种谱分布,发现平均粒子谱为单峰型,而平均表面积谱和平均质量谱则通常为三峰型。但是,表面积谱和质量谱随时间变化明显。

三峰型质量谱与国外给出的城市双峰型质量谱差别显著,揭示了我国目前城市气溶胶污染所具有的一种带普遍性的重要特性。

一、引 言

1978年美国许多著名学者^[1]指出,空气动力学尺度直径大于 $10\mu\text{m}$ 的粒子,基本上被阻止于人的鼻腔;直径大于 $2\mu\text{m}$,小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子,大约90%可以进入并沉积于呼吸道的各个部位;10%可以到达肺的深处,并沉积于肺中;直径小于 $2\mu\text{m}$ 的粒子,100%可以吸入肺部,其中 $0.3-2\mu\text{m}$ 的粒子几乎全部沉积于肺部而不能呼出。

由此可见,以空气动力学尺度研究大气中气溶胶粒子数量浓度、表面积浓度、质量浓度,并获取相应的谱分布及其变化规律,能够更加直接地判断某一地区或一个城市大气气溶胶对人的危害程度。

同时,由于大气中气溶胶各种谱分布,和各种粒子的产生源及其物理、化学特性紧密相关,所以这种研究对于揭示气溶胶不同类型源的贡献比和对人的危害,评价大气污染现状,制订控制对策具有重要意义。

二、仪器和资料

测量仪器为美制 APS-33 型激光空气动力学气溶胶粒谱仪。该仪器在 $0.486-15.4\mu\text{m}$ 范围内可分 48 档测量各种谱分布。大于 $15\mu\text{m}$ 和小于 $0.5\mu\text{m}$ 各为一档。

本文 1986 年 6 月 5 日收到,1987 年 2 月 16 日收到修改稿。

采样时间为1983年1月7日—16日。地点为北京市美术馆南中国社会科学院二楼上。采样高度距离地面约8m。同时,还有3030型高压静电气溶胶分析仪,730型多道粒子计数器等多台仪器同步观测。

三、平均谱分布的特征

1. 平均粒子谱 北京市区冬季大气气溶胶空气动力学尺度平均粒子谱,是10天内720条瞬时谱平均得到的,如图1所示。

图1清楚地表明,动力学尺度平均粒子谱为典型的单峰型,峰值中心位于直径 $0.723\sim 0.835\mu\text{m}$ 之间,绝大部分粒子集中在直径 $0.6\sim 2\mu\text{m}$ 区域内。10天的平均结果表明,直径小于 $0.5\mu\text{m}$ 和直径大于 $7.8\mu\text{m}$ 的粒子数浓度极少,仅约占总粒子数浓度的百分之零点几;直径在 $1.7\sim 7.8\mu\text{m}$ 范围的粒子数约占总粒子数的2%;而直径为 $0.5\sim 1.7\mu\text{m}$ 之间的粒子约占总粒子数浓度的97.9%。因此,从空气动力学尺度来看,北京市区冬季气溶胶粒子绝大多数集中于 $0.5\sim 2\mu\text{m}$ 之间,这种比较狭窄的峰型分布,揭示出北京市区冬季产生这种粒子的源比较强,因而对人危害较大的可吸入量的相对含量也比较高。

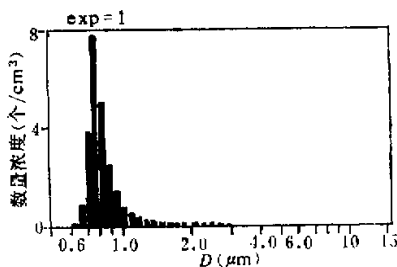


图1 北京市区冬季气溶胶空气动力学尺度平均粒子谱分布

2. 平均表面积谱 北京市区冬季大气气溶胶空气动力学尺度平均表面积谱的谱分布如图2所示。

可以看到,平均表面积谱基本上呈三峰型。第一峰位于直径 $0.5\sim 1.7\mu\text{m}$ 之间,其表面积浓度约占总表面积的76.6%;第二峰出现在直径 $1.7\sim 8\mu\text{m}$ 之间,其表面积浓度约占总表面积的17.9%;第三峰位于直径大于 $8\mu\text{m}$ 范围,峰值中心大约在 $10\sim 15\mu\text{m}$ 之间,其表面积浓度约占总表面积浓度的5.5%。

因此,十分明显地表明,北京市区冬季大气气溶胶空气动力学尺度粒子表面积主要是

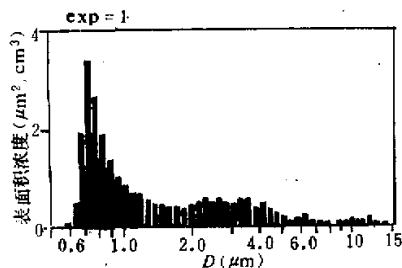


图2 北京市区冬季气溶胶平均表面积谱分布

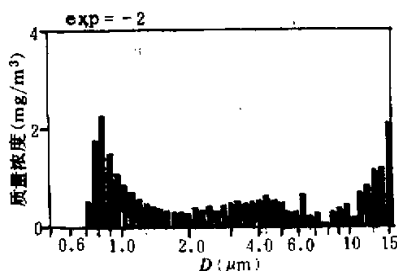


图3 北京市区冬季大气气溶胶平均质量谱

由直径 $0.5-1.7\mu\text{m}$ 范围的粒子贡献的。

3. 平均质量谱 以空气动力学尺度测量大气气溶胶质量谱,是气溶胶研究的最重要的组成部分。这不仅因为各国的环境质量标准,通常都是以质量浓度为基础的。而且,质量谱能够更加深刻地揭示地区大气气溶胶各类源的物理特性及其对总质量浓度的分担率,直接给出对人体危害最大的可吸入量的大小和不同粒径粒子的实际贡献量。

北京市区冬季大气气溶胶平均质量谱以图 3 表示。

很明显,平均质量谱为典型的三峰型。第一峰位于空气动力学尺度直径 $0.5-1.7\mu\text{m}$ 之间,峰值中心在 $0.7-0.8\mu\text{m}$ 处;第二峰出现在 $1.7-7.8\mu\text{m}$ 之间,峰值中心位于 $3-4\mu\text{m}$ 处;第三峰出现在直径大于 $8\mu\text{m}$ 区域,峰值中心大约位于 $10-15\mu\text{m}$ 之间。

10 天内 7650 个数据的统计平均值得到,空气动力学直径小于 $0.5\mu\text{m}$ 的所有粒子总质量浓度为 $4.89 \times 10^{-3} \text{mg/m}^3$, 约占总质量浓度的 0.1%, 因而这部分粒子对大气气溶胶质量浓度的贡献几乎是可以忽略的;直径 $0.5-1.7\mu\text{m}$ 之间的粒子质量浓度为 $9.94 \times 10^{-2} \text{mg/m}^3$, 约占总质量浓度的 4.0%;直径 $1.7-7.8\mu\text{m}$ 之间粒子质量浓度为 $8.13 \times 10^{-2} \text{mg/m}^3$, 约占总质量浓度的 30.4%;直径大于 $7.8\mu\text{m}$ (大约到 $20\mu\text{m}$) 的粒子质量浓度为 0.112mg/m^3 , 约占总质量浓度的 35.5%。

这一结果和美国 70 年代用串级式撞击采样仪取得的一般城市气溶胶质量谱有很大差别^[4]。他们的结论指出,城市气溶胶质量谱分布是双峰型。一个峰位于直径小于 $2\mu\text{m}$ 区域,另一个峰位于直径大于 $2\mu\text{m}$ 区域。并且指出直径小于 $2\mu\text{m}$ 的细粒子质量浓度,几乎和直径大于 $2\mu\text{m}$ 粗粒子的质量浓度相等。Whitby 等人后来在分析洛杉矶烟雾气溶胶时^[5]进一步指出这种双峰型质量谱,一个峰在直径大约 $0.3\mu\text{m}$ 处,另一个峰位于直径 $5-15\mu\text{m}$ 之间。此外,美国气溶胶研究者在城市建筑工地和高速公路,分别观测到第二峰远大于第一峰和第一峰大于第二峰的典型情况^[6]。这充分证明大气气溶胶质量谱分布特征和污染源有着直接的关系。

所以,北京市区冬季三峰型气溶胶质量谱分布给出了如下重要结果:

1. 北京市区冬季大气气溶胶质量浓度,大约 60% 以上是由直径大于 $2\mu\text{m}$ 的粗粒子贡献的,直径小于 $2\mu\text{m}$ 的细粒子的质量浓度远小于粗粒子。清楚地表明,北京冬季产生粗粒子的源是十分旺盛的。
2. 粗粒子区明显地分为两个峰,揭示出北京市冬季大气气溶胶粗粒子的产生源存在着两大类。一类产生直径 $3-6\mu\text{m}$ 的粒子,另一类产生直径 $15-20\mu\text{m}$ 的粒子。这些粒子虽然都主要是由于机械粉碎与燃烧过程中产生的原生粒子,但是,后者则更主要的是由于风沙、扬尘(包括交通、建筑等造成的二次扬尘)和没有任何消烟除尘设备的采暖锅炉燃烧排放的烟尘造成的。关于这一点在下一节还要进一步分析。

四、各种谱分布随时间的变化

1. 逐日变化 我们在 10 天的大量观测资料分析中,发现空气动力学尺度各种谱分布,无论是在一天的不同时期,还是在不同的日子里,都有明显的差别。

为了较详细地研究逐日变化,将 10 天按照日平均质量浓度划分为三种情况:重污染

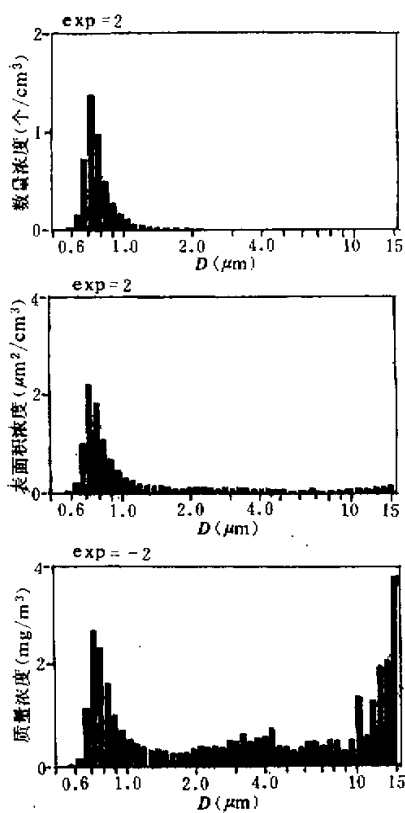


图4 重污染日的粒子谱、表面积谱、质量谱

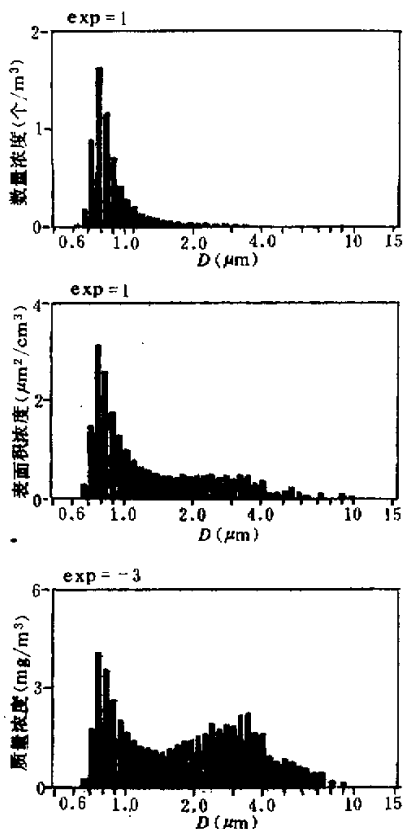


图5 轻污染日的粒子谱、表面积谱、质量谱

日(15—16日),轻污染日(13—14日),中等污染日(7—12日)。这里仅以典型的重污染日和轻污染日进行比较。

重污染日和轻污染日的粒子谱、表面积谱、质量谱见图4和图5。

由图可见,对于粒子谱而言,重污染日和轻污染日污染程度的差异,并未影响其粒子谱分布的基本特征,仍然是很窄的单峰型的对数正态分布形式。虽然,重污染日和轻污染日大于空气动力学直径 $1.7\mu\text{m}$ 的粗粒子数绝对值和相对含量都会有变化,但是由于97.8%的粒子集中于 $0.5\text{—}1.7\mu\text{m}$ 细粒子区,这种变化在粒子谱上的表现是不明显的。

在表面积谱中,重污染日和轻污染日谱型的变化较为明显:重污染日平均表面积谱开始显示出三峰型,而轻污染日的平均表面积谱为双峰型。

质量谱的逐日变化是最明显的。在重污染日观测到的几百个瞬时谱中,有81%的谱是三峰型。而在轻污染日观测的瞬时谱,有78.1%为典型的双峰型。

这种明显的质量谱的逐日变化表明,重污染日大气气溶胶粒子质量浓度的增加,是和

大气中直径大于 $8\mu\text{m}$ 的粗粒子的大量增加是直接相关的。

分析气象资料表明,北京市重污染日通常是在高压控制下的稳定型天气。其突出特征是天气晴朗、风速小、逆温强且持续时间长,不利于污染物的垂直扩散和水平输送。因此,在重污染日直径大于 $8\mu\text{m}$ 的粒子数浓度明显增大,并非只有自然风沙或尘暴造成,而大多数情况下主要是由于交通、建筑引起的扬尘和大量没有消烟除尘设备的锅炉燃烧排放的粗粒子,在上述不利气象条件下,在低层大气中大量积累而造成的。当然,在这种不利的气象条件下,细粒子同样会大量积累而增多,但是气溶胶粒子对质量浓度的贡献是和直径的立方成正比的,所以虽然数量浓度同样增大,而在质量浓度上的变化,则粗粒子的贡献会突出表现出来,因此质量谱显示为三峰型。

2. 日变化 通用总悬浮微粒质量浓度小时平均值的连续观测,我们将一天基本上可以分为四个不同的污染期:06—11点为强污染期;17—24点为次强污染期;01—05点为弱污染期;12—16点为光化学污染期。

发现粒子谱在任何时期均为单峰型。表面积谱只有在强污染期表现出不太明显的三峰型。而质量谱的日变化仍然表现的最为明显。153个气溶胶瞬时质量谱中,在一天中的强污染期和次强污染期,三峰型质量谱占70%以上,弱污染期和光化学污染期,双峰型质量谱约占77.6%;特别是光化学污染期,几乎全部为双峰型质量谱。并且,这种日变化规律在轻、重污染日都是一样的。

五、总悬浮微粒、飘尘和可吸入粒子质量浓度之间的经验计算公式

我们知道,总悬浮微粒中直径小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子可以不同程度的被人吸入体内,并且,大量资料证明,气溶胶中大多数有害化学组分(包括强致癌物质3、4苯并芘等)也正是多含在细粒子中。因此,判断一个地区或一个城市大气污染的轻或重,仅仅知道总悬浮微粒和飘尘质量浓度仍然是不够的。应该进一步研究和测量大气气溶胶中,能够被人吸入体内,并且沉积于呼吸系统各个不同部位的粒子质量浓度的绝对含量和相对含量。然而,目前由于测量可吸入粒子质量谱的仪器极少,因此我们用已测量的大量资料研究它们之间的定量关系,给出经验计算公式是非常有意义的。

本文利用 APS-33 激光空气动力学粒径谱仪测量的大量资料,进行了有意义的探讨,并给出了下列经验计算公式(以下所测资料中,总悬浮微粒质量浓度是用大流量采样仪直接测量的,飘尘小于 $15\mu\text{m}$ 的粒子质量浓度、可吸入粒子质量浓度,都是用 APS-33 仪直接测量的。)

1. 直径小于 $15\mu\text{m}$ 粒子与总悬浮微粒质量浓度之间的经验计算公式(见图6中a线)。

$$\begin{cases} y = 0.428x + 0.0021 \\ r = 0.868 \\ n = 15 \end{cases}$$

式中 y 为直径小于 $15\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子的质量浓度。 x 为直径小于 $100\mu\text{m}$ 的粒子

质量浓度。 r 是相关系数, N 是资料组数。

由此可以用大流量采样仪取得的总悬浮微粒质量浓度, 计算出小于 $15\mu\text{m}$ 粒子的质量浓度。

2. 飘尘 (直径小于 $10\mu\text{m}$) 与直径小于 $15\mu\text{m}$ 粒子质量浓度之间的经验计算公式 (见图 6 中 b 线)。

$$\begin{cases} y = 0.827x + 0.0055 & \text{当 } x < 0.15\text{mg/m}^3 \\ r = 0.978 \\ N = 82 \end{cases}$$

$$\begin{cases} y = 0.587x^{0.734} & \text{当 } x \geq 0.15\text{mg/m}^3 \\ r = 0.989 \\ n = 153 \end{cases}$$

式中 y 为直径小于 $10\mu\text{m}$ 飘尘的质量浓度, x 为直径小于 $15\mu\text{m}$ 粒子的质量浓度。其余符号同上。

如此联合上式我们可以从大流量或双通路采样仪资料, 直接计算出飘尘的质量浓度。

3. 可吸入粒子与飘尘之间质量浓度的经验计算公式:

$$\begin{cases} y = 0.680x + 0.0055 \\ r = 0.994 \\ n = 88 \end{cases}$$

式中 y 为可吸入粒子的质量浓度, x 为飘尘的质量浓度。其余符号同上 (见图 6 中 c 线)。

所以, 到此我们可以直接从总悬浮微粒质量浓度计算出可吸入粒子的质量浓度。

应当指出, 在一个地区或一个城市, 上述经验关系式, 是该地区大气气溶胶质量谱分布特征的具体反映。而大气气溶胶质量谱分布特征是由当地污染源、燃烧结构、粒子的物理、化学特性以及气象条件决定的。所以, 经验计算公式并不能随意乱用。然而, 我们通过大量研究大气气溶胶不同尺度粒子质量浓度的分布规律, 不仅可以判断不同地区产生气溶胶的各种源特征和影响粒子在大气中消沉的条件, 而且对于控制大气气溶胶污染, 采取有科学依据的有效对策是很有价值的。

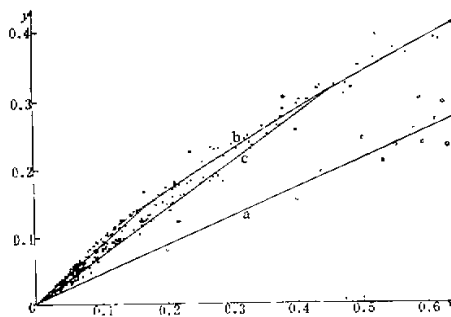


图 6 北京市区冬季气溶胶不同范围粒子质量浓度之间的相关曲线

六、结 论

北京市区冬季大气气溶胶污染,从大量资料的平均意义上讲,质量谱分布呈明显的三峰型。这种三峰型质量谱分布与国外发表的双峰型城市气溶胶质量谱显然不同。并且和我们在研究太原、兰州、沈阳、昆明等城市气溶胶质量谱的时候,发现各个城市的质量谱在谱形上虽然各自具有自己的特征,但是这种三峰型却基本上是普遍存在的,而且三个峰出现的粒径范围也基本上是一致的。

这就表明,三峰型质量谱是目前我国城市气溶胶污染区别于国外先进工业国家城市气溶胶污染的重要特征。也就是说,目前我国城市气溶胶粒子污染中,大量的工业粉尘、没有消烟除尘的民用煤的燃烧排放和风沙扬尘是造成严重污染的重要源。

另外,大气气溶胶粒子中,可吸入粒子的质量浓度和相对含量是判断大气污染的一个重要因素。必须引起足够的重视。

参 考 文 献

- [1] Ian T. T. Higgins, et al., *Airborne Particles*, 1—19, University Park Press, International Publishers in Science and Medicine, Baltimore, Maryland, 1978.
- [2] Whitby, K. T., R. B. Husar and B. Y. Liu, 1972, The Aerosol size Distribution of Los Angeles Smog, *J. Colloid Interface Sci.*, 39(1), 177—204.
- [3] Whitby, K. T., W. E. Cark, V. A. Marple, G. M. Sverdrup, G. J. Sem, K. Willeke, B. Y. Liu and D. Y. Pui, 1975, Characterization of California Aerosols—I, Size Distribution of freeway Aerosol, *Atmos. Environ.*, 9(4), 463—483.