

用 TSI3321 APS分析大气气溶胶浓度和粒径分布

拓 飞, 徐翠华

中图分类号: TL816⁺.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2009)04-0507-02

空气中存在着各类气溶胶粒子, 包括有天然和伴随着人类活动而产生的, 它们的浓度和粒径分布与人们健康密切相关, 其对健康和环境影响是近几年有待深入研究的前沿课题之一。放射性气溶胶粒径分布是评价人体吸入放射性核素及其子体所致内照射剂量的重要参数之一。某些附着在气溶胶上的放射性核素及其子体被人体吸入后将会沉积在呼吸道不同部位上, 沉积部位和沉积量与气溶胶粒径大小有关, 由于不同部位对辐射敏感性有所差异^[1], 导致其剂量贡献不一。目前, 尚无较好的方法直接测量其在人体呼吸道的沉积, 只能先对环境中的这些吸入体粒径和放射性活度进行测量, 再根据相关理论和呼吸道模型对其剂量贡献进行计算^[2]。因此, 放射性气溶胶粒径测量成为剂量评价的首要任务。笔者对大气气溶胶测量现状进行了综述, 并系统介绍了用 TSI3321 空气动力学粒径谱仪 (aerodynamic particle sizer 简称 APS) 测量大气气溶胶浓度和粒径分布的原理、方法, 简要给出了实验验证结果。

1 国内外研究状况

国际上对大气气溶胶的研究主要集中在 4 个方面^[3]: 气溶胶基本特性、气溶胶的气候效应、沙尘气溶胶、气溶胶对环境和人体健康的影响。起初研究侧重于一次颗粒物, 上世纪 50 年代以后转向可吸入颗粒物, 开始重视粒径小于 10 μm 的可吸入颗粒物, 因为这类粒子很容易经由呼吸系统沉积在肺中 (其中粒径小于 2.5 μm 的可直接进入人的肺泡)。90 年代后期, 更重视二次颗粒物问题。现在已经深入到小于 2.5 μm 亚微米、甚至超细颗粒。

在我国, 关于环境和沙尘暴方面气溶胶研究居多。研究者在沙尘暴形成的中尺度系统分析、沙尘气溶胶飞机观测、沙尘暴卫星监测和预报、黑风暴气溶胶质量浓度和化学组分分析、大气沙尘的光学特性等领域开展了较深入的研究工作, 得到了一些有意义的结论^[4-9]。在环境与健康方面, 一些学者研究了典型场所某些燃烧物 (如点蚊香、吸烟、供暖烧煤、厨房油烟、木屑等物燃烧) 产生的气溶胶浓度及粒径分布情况, 评价了其对人体健康的潜在危害^[7-8]。

除应用研究外, 我国在粒径谱仪自主研制方面也取得了一系列成果^[9]。苏州大学邹丽新等^[10]研制的仪器可进行空气悬浮颗粒物粒径分布及质量浓度的一体化测量; 中科院安徽光学精密机械研究所等多家单位联合^[11-13]自主研制了一台实时测量大气气溶胶粒径和化学成分的仪器, 经过标定后在实际测量中可给出木屑燃烧产生的烟气气溶胶粒子和芳香烃类等气溶胶特性。

在我国, 关于附着在大气气溶胶上的放射性气溶胶粒径研究主要是对 Rn-222 及其子体结合态和少量的非结合态粒子等天然放射性气溶胶测量^[12-14], 研究者通过测量矿井、居室等场所气溶胶浓度与粒径分布以及天然放射性 Rn-222 子体的浓度, 模拟计算了其呼吸道沉积率。

基金项目: 卫生部卫生行业科研专项 (20090103) 资助

作者单位: 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 北京 100088

作者简介: 拓飞 (1980-), 男, 甘肃省人, 助理研究员, 主要从事辐射检测与评价工作。

通讯作者: 徐翠华, xuc@njpc.cn

3321 型 APS 开展的研究国际上有 Thomas M 等^[15] 分别用 3321 APS 与撞击式气溶胶粒径测量装置测量了某气溶胶的浓度和效率, 并将二者的结果进行了比较。John Volckens 等^[16] 通过研究得出了不同大小粒径与计数效率之间的函数关系。H. Lyman 等^[17] 研究了 2005~2006 年西班牙某市区 0.5~20 μm 粒径范围气溶胶散射、背散射和吸收系数。Dongho Park 等^[18] 采用配备了标准聚乙烯粒子球 (PSL) 的 TSI3321 APS 标定了他们新研制粒径采样器的效率。在我国, 台湾职业安全与健康研究所 Sheng-Hsiu Huang 等^[19] 采用多台仪器联合研究了 4.5nm~10 μm 范围气溶胶粒子在纤维滤材中的穿透性, 其中采用 TSI 3321 APS 来进行次微米和微米级别粒子的研究。吴禹等^[20] 采用它采集了厨房油烟、吸烟室烟雾、路边扬尘及小区空气中的颗粒物, 分析了其粒径分布规律和对人体健康可能造成的危害。

2 TSI3321 APS 工作原理及其应用

2.1 原理 TSI3321 APS 是利用双束激光粒径测量原理测量气溶胶粒子的粒径。采用上下两束间距为 d 的激光沿垂直于粒子飞行路径的轴线照射到飞行的气溶胶粒子上, 当粒子通过焦点时与激光束碰撞产生的散射光分别被收集至两个光电倍增管 (PMT), PMT 产生的电脉冲信号经过放大和整形, 再输入到时标电路, 由该时标电路即可测出气溶胶粒子在这两束激光间飞行时所用的时间, 由此计算出粒子的飞行速度。由于粒子惯性不同, 将获得一个速度分布 (一般在几百 m/s 的数量级), 较小的粒子获得较大的速度, 而较大的粒子则获得较小的速度。利用这个性质, 先用粒径已知的标准粒子得到粒子飞行速度与粒径大小的关系曲线, 利用定标曲线, 以后只要测出待测气溶胶粒子的飞行速度即可得到该粒子粒径大小。该方法虽然较复杂, 但它不受气溶胶粒子固有性质等因素影响, 从而大大提高了粒子粒径测量精确度。

3321 APS 自带 AM (Aerosol Instrument Manager) 软件包可完成数据实时、自动采集分析和存储。当测得气溶胶颗粒空气动力学粒径后, 由 (1) 式即得到谱上每道中心点粒子的几何粒径, 然后软件可自动完成数据处理, 进一步给出气溶胶数量浓度、表面积浓度、体积浓度及质量浓度随粒径分布等信息, 计算原理基于公式 (1)~(5)。

$$D_p = D_a \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (1)$$

所测谱每道粒子数浓度 n 和粒子总浓度 N 由 (2) 式给出,

$$n = \frac{C \cdot \phi}{Q \cdot \eta}, \quad N = \sum_L^u n \quad (2)$$

每道表面积浓度 s 和总表面积浓度 S 由 (3) 式给出,

$$s = \pi D_p^2 n, \quad S = \sum_L^u s \quad (3)$$

每道体积浓度 v 和总体积浓度 V 由 (4) 式给出,

$$v = \frac{\pi D_p^3 n}{6}, \quad V = \sum_L^u v \quad (4)$$

每道质量浓度 m 和总质量浓度 M 由 (5) 式给出,

$$m = \rho \cdot v, \quad M = \sum_L^u m \quad (5)$$

(1) — (5) 式中: D_a ——空气动力学粒径 (μm); D_p ——几何粒径 (μm); ρ_0 ——单元密度 (g/cm^3); ρ ——粒子密度; c ——每道粒子数; ϕ ——采样稀释因子; t ——采样时间; Q ——采样流量; η ——采样效率因子; \downarrow ——道数下边界; \uparrow ——道数上边界; π ——圆周率。

采样的几何标准偏差为:

$$\sigma_g = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^N \eta_i \ln D_{pi} - \ln \bar{X}_g}{N} \right] \quad (6)$$

其中, $\bar{X}_g = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^N \eta_i \ln D_{pi}}{N} \right]$ 为几何平均值, $N = \sum_{i=1}^N \eta_i$ 如计算 \bar{X}_g 及 σ_g 时只需将式中 η_i 和 N 换为所要计算值即可。数据采集完成后, 也可将原始数据转换后手动分析。

2.2 组成 仪器主要包括三个部分: 主机, 气溶胶稀释器, 计算机控制及数据采集系统。测量时它对所采气溶胶浓度有一定要求, 可测量颗粒物最高浓度为 $104 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。在高浓度气溶胶分析中要加稀释器进行稀释, 才能使入口颗粒物浓度控制在仪器精度允许范围内。

2.3 应用 TSI3321 APS 体积小, 操作简单, 携带方便, 适合于现场测量。它作为一体化测量系统能给出所采气溶胶空气动力学粒径, 并同时分析给出气溶胶数量浓度、表面积浓度、体积浓度及质量浓度随粒径分布情况, 适用于测量粒径范围为 $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 的气溶胶。可以应用在大气学研究, 环境空气监测, 室内空气质量监测, 生物危害性监测, 药物代谢示踪研究, 过滤器与空气清洁剂测试, 吸入毒理学, 以及其它空气动力学设备的性能评估等领域。因为是对同一气体同时进行测量, 因此能更准确地反映被测区域、被测时刻的气溶胶特性。

3 实验

仪器出厂时采用 11 个不同大小粒径的标准粒子进行了标定, 标定经美国标准技术研究院 (National Institute of Standards and Technology NIST) 授权, 所用标准均可溯源至 NIST。采用美国 Duke 公司提供的 DRI-CALIM $10 \mu\text{m}$ 标准微粒子球进行了粒径测量准确度验证, 标称值 $9.9 \mu\text{m} \pm 0.5 \mu\text{m}$, 材料为聚苯乙烯和二乙烯基苯聚合体粒子球, 密度 $1.05 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。实验地点在 4 楼, 室内有 3 窗 2 门, 处于正常通风, 温度 $18 \sim 21^\circ\text{C}$, 湿度 $50\% \sim 70\%$ 。仪器每 5 s 采样一次, 共采集 5 次。实验值为 $9.42 \mu\text{m} \pm 1.13 \mu\text{m}$ (具体数据见表 1) 与标称值在误差范围内符合。实验同时也进行了室内空气气溶胶粒径测量, 多次测量结果表明, 典型值为 $0.75 \mu\text{m}$ 浓度值 $35 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。

调试结果显示仪器运行稳定, 方法可靠, 在条件基本相同的情况下, 给出了一致的结果。表明 TSI3321 APS 仪器及目前建立的方法能满足气溶胶浓度、粒径分布的测量要求, 可以应用于一些场合气溶胶浓度、粒径分布的实时在线测量。

表 1 实验验证数据

采样轮次	标准粒子球				
	中位数	均数	几何平均数	众数	几何标准偏差
1	9.61	9.57	9.51	9.65	1.12
2	9.58	9.53	9.46	9.65	1.13
3	9.59	9.54	9.47	9.65	1.13
4	9.53	9.43	9.36	9.65	1.13
5	9.46	9.37	9.30	9.65	1.13

4 应用展望

下一步工作拟开展系统的现场采样测量, 根据已经建立的方法和制定的规范, 选择代表性采样场所 (工作场所测量必需跟踪职业人员到达的地方), 安排科学合理的采样时间 (室内测量时, 采样时间应涵盖通风最差的时间段), 采样频次、采样个数,

并结合大流量放射性气溶胶取样分析, 得到场所工作人员活动情况、通风情况与粒径的关系。进一步评价可吸入性气溶胶对特定场所工作人员的职业危害, 估算放射性气溶胶内照射剂量, 给出典型工作场所气溶胶、矿尘粒径和放射性核素分析报告。

参考文献:

- [1] 张磊, 卓维海, 郭秋菊. ^{220}Rn 子体结合态放射性气溶胶粒径分布实验研究 [J]. 原子能科学技术, 2008, 42 (增刊): 344—348.
- [2] 李德红, 卓维海, 黄刚, 等. 某铜矿巷道内气溶胶浓度与粒径分布的测量和分析 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2008, 28 (5): 462—465.
- [3] 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. 气候与环境研究, 2001, 6 (1): 119—124.
- [4] 权建农, 奚晓霞, 王鑫, 等. 兰州市 2001 年沙尘气溶胶质量浓度的特征分析 [J]. 中国沙漠, 2005, 25 (1): 93—97.
- [5] 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学进展, 2007, 22 (1): 12—16.
- [6] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京秋季大气气溶胶质量浓度的垂直分布 [J]. 中国环境科学, 2008, 28 (1): 2—6.
- [7] 王海霞, 陈新华, 李海洋. 空气及蚊香燃烧产生的亚微米气溶胶的粒径谱 [J]. 环境科学与技术, 2007, 30 (10): 34—39.
- [8] 林治卿, 裴著革, 杨丹凤, 等. 采暖期大气中不同粒径颗粒物污染及其重金属分布状况 [J]. 环境与健康杂志, 2005, 22 (1): 33—34.
- [9] 王蓓, 刘建国, 刘增东, 等. 利用 APS 分析大气气溶胶数浓度和质量浓度 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24 (5): 710—713.
- [10] 邹丽新, 季晶晶, 朱桂荣, 等. 空气悬浮颗粒物粒径分布及质量浓度一体化测量系统的研制 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (8): 1788—1792.
- [11] 夏柱红, 方黎, 郑海洋, 等. 气溶胶单粒子粒径的实时测量方法研究 [J]. 物理学报, 2004, 53 (1): 320—324.
- [12] 刑建永, 刘建国, 黄书华, 等. 空气动力学粒径谱分析仪标定方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2 (3): 211—213.
- [13] 郭晓勇, 赵文武, 朱元, 等. 气溶胶单粒子成分和粒径的实时测量 [J]. 过程工程学报, 2006, 6 (增刊 2): 42—45.
- [14] 尚兵, 崔宏星, 武云云, 等. 我国非铀矿山 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 水平初步调查研究 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2008, 28 (6): 559—565.
- [15] Thomas M Peters, David Leigh. Concentration measurement and counting efficiency of the aerodynamic particle sizer 3321 [J]. Journal of Aerosol Science, 2003, 34 (5): 627—634.
- [16] John Volckens and Thomas M Peters. Counting and particle transmission efficiency of the aerodynamic particle sizer [J]. Journal of Aerosol Science, 2005, 36 (12): 1400—1408.
- [17] H. Lyamani, F. J. Ojmo and L. Alados-Arboledas. Light scattering and absorption properties of aerosol particles in the urban environment of Granada, Spain [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42 (11): 2630—2642.
- [18] Dongho Park, Yong-Ho Kim, ChulWoo Park, et al. New bio-aerosol collector using a micron-achieved virtual impactor [J]. Journal of Aerosol Science, 2009, 40 (5): 415—422.
- [19] Huang Sheng—Hsiu, Chen Chun—Wan, Chang Cheng—Ping, et al. Penetration of 4.5 nm to $10 \mu\text{m}$ aerosol particles through fibrous filters [J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38 (7): 719—727.
- [20] 吴禹, 周向东. 不同来源可吸入颗粒物粒径分布特征 [J]. 环境与职业医学, 2007, 24 (5): 528—529.

(收稿日期: 2009—08—31)