

# 环境空气中 PM<sub>2.5</sub> 自动监测方法比较及应用

解淑艳<sup>1</sup>, 王晓彦<sup>1</sup>, 吴迺名<sup>2</sup>, 潘本锋<sup>1</sup>, 李亮<sup>1</sup>, 杜丽<sup>1</sup>, 包权<sup>2</sup>, 崔虎雄<sup>2</sup>, 刘冰<sup>1</sup>,  
汪巍<sup>1</sup>, 王帅<sup>1</sup>

1. 中国环境监测总站, 北京 100012

2. 上海市环境监测中心, 上海 200030

**摘要:**在 PM<sub>2.5</sub> 监测受到日益重视的背景下, 对  $\beta$  射线法和微振荡天平法 (TEOM) 这 2 种主要的 PM<sub>2.5</sub> 自动监测方法的工作原理和使用情况进行概述, 给出了国内现有  $\beta$  射线法和 TEOM 法的比对测试结果, 对今后开展全面系统的 PM<sub>2.5</sub> 自动监测和研究工作提供参考。

**关键词:**PM<sub>2.5</sub>;  $\beta$  射线法; 微振荡天平法; 方法认证; 比对测试

中图分类号:X84 文献标志码:A 文章编号:1002-6002(2013)02-0150-06

## Study of the Comparison and Application of PM<sub>2.5</sub> Automatic Monitoring Methods

XIE Shu-yan<sup>1</sup>, WANG Xiao-yan<sup>1</sup>, WU Ya-ming<sup>2</sup>, PAN Ben-feng<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>, DU Li<sup>1</sup>, BAO Quan<sup>2</sup>, CUI Hu-xiong<sup>2</sup>, LIU Bing<sup>1</sup>,  
WANG Wei<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>

1. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

2. Shanghai Environmental Monitoring Centre, Shanghai 200030, China

**Abstract:** Under the growing demand of PM<sub>2.5</sub> monitoring, this paper compares two commonly used methods of PM<sub>2.5</sub> monitoring,  $\beta$ -ray method and Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) method, including an overview of the operation principles, and summary of the use of different instruments. Based on the results of recent comparison tests in China, this paper gives an outlook of comprehensive and systematic comparison study of PM<sub>2.5</sub> automatic monitoring methods in the future.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>;  $\beta$ -ray method; TEOM method; certification; comparison tests

近几年,不断增加的大范围的雾霾天气引起了公众和舆论对 PM<sub>2.5</sub> 的强烈关注,监测 PM<sub>2.5</sub> 的呼声越来越高。在随后颁布的新版《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中,PM<sub>2.5</sub> 正式成为标准要求的常规监测项目。面对在全国大范围开展 PM<sub>2.5</sub> 监测的迫切形势,了解 PM<sub>2.5</sub> 监测的主要方法以及国内外的应用情况,并对各类自动监测方法进行比对测试,成为推广 PM<sub>2.5</sub> 监测的前提条件和当务之急。

## 1 常用 PM<sub>2.5</sub> 自动监测方法

目前,国内外监测大气细粒子 PM<sub>2.5</sub> 常用的自动监测方法为  $\beta$  射线法和微振荡天平法 (TEOM), 2 种方法的工作原理有所不同。

### 1.1 $\beta$ 射线法

$\beta$  射线法是利用  $\beta$  射线的衰减量来测定测量

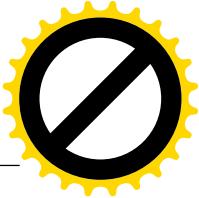
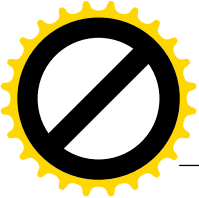
期间颗粒物质量增加量的一种监测方法。气样被采样泵吸入采样管,气样中颗粒物被截留在滤膜上,当  $\beta$  射线通过滤膜时,由于颗粒物的吸收会导致  $\beta$  射线能量衰减,通过  $\beta$  射线的衰减量与颗粒物质量增加量的关系计算颗粒物的质量浓度。

### 1.2 振荡天平法

TEOM 监测仪的核心结构,是在特殊的热膨胀系数很小的石英锥形管的上端加装滤膜,由锥形管、滤膜和沉积其上的颗粒物形成一个振荡系统,并按其自然频率进行振荡。当气样通过滤膜时,颗粒物被截留,滤膜质量变化,导致锥形管的振荡频率产生变化,通过测量锥形管的频率变化,并结合气样流量来计算颗粒物的质量浓度。

### 1.3 差异性比较

$\beta$  射线法原理是根据颗粒物对  $\beta$  射线的吸收强度进行分析,颗粒物吸附在滤纸带表面后,盖革计数器通过测量采样前后  $\beta$  射线强度变化来计



算吸附的颗粒物浓度。采用这种分析方法,人工维护量较低,在数据时间分辨率上,一般 1 h 监测 1 个数据,个别厂家的仪器也可以提供实时连续数据。

TEOM 法是基于石英振荡杆负重改变而导致振荡频率变化的原理来测量颗粒物的质量浓度。目前,市场上 TEOM 法仪器可提供分钟级的高时间分辨率监测数据,该方法使用的仪器对人员维护水平要求较高。根据实验和监测结果分析,未安装膜动态测量系统(FDMS)的 TEOM 法自动监测设备的监测值一般会略低于  $\beta$  射线法自动监

测设备的监测值<sup>[1]</sup>。

## 2 国外 PM<sub>2.5</sub> 监测仪器使用情况

在欧盟发布的关于 2008 年空气质量评价的年度报告中显示,27 个欧盟成员国中,共有 518 个 PM<sub>2.5</sub> 监测点位,如表 1 和图 1 所示。其中,使用  $\beta$  射线法、TEOM 法和振荡天平-膜动态测量系统(TEOM-FDMS)联用法的 PM<sub>2.5</sub> 监测点位数分别为 186 个(占总点位数的 35%)、56 个(10%)和 105 个(19%)<sup>[2]</sup>。

表 1 2008 年欧盟成员国 PM<sub>2.5</sub> 监测点位及仪器使用情况 个、台/套

成员国	点位数	参与 AEI 评价 的点位数 <sup>a</sup>	空军基地的 点位数 <sup>b</sup>	城市 人口 <sup>c</sup>	监测方法				
					$\beta$ 射线 吸收法	重量法	TEOM 法	TEOM-FDMS 联用法	其他方法
奥地利	12		12 (4)	2.1 ~ 5.6	0	10	0	2	0
比利时	30	4	32 (10)	2.4 ~ 10.2	5	0	1	9	15
保加利亚	3		4 (2)	7.7 ~ 5.4	0	3	0	0	0
塞浦路斯	1		3 (0)	0 ~ 0.6	0	0	0	0	0
捷克	31		32 (18)	2.8 ~ 7.5	23	8	0	0	0
德国	80		98 (50)	28.1 ~ 60.8	26	38	6	0	14
丹麦	8	3	11 (4)	1.3 ~ 4.7	7	0	4	0	0
爱沙尼亚	3		2 (2)	0.5 ~ 0.9	3	0	0	0	0
西班牙	97		92 (21)	23.4 ~ 34.4	39	47	11	0	0
芬兰	7		7 (2)	1 ~ 3.3	4	0	3	0	0
法国	56	4	35 (26)	25.6 ~ 47.9	0	0	7	49	0
英国	47	36	54 (37)	25.5 ~ 54.9	1	3	6	39	0
希腊	5		5 (3)	4.3 ~ 6.8	4	0	1	0	21
匈牙利	3		3 (1)	2.5 ~ 6.8	3	0	0	0	0
爱尔兰	1	0	1 (0)	1 ~ 2.7	0	1	0	0	0
意大利	50		74 (28)	24.6 ~ 40.1	35	7	8	0	0
立陶宛	3		3 (0)	0.9 ~ 2.3	3	0	0	0	0
卢森堡	1		1 (0)	0 ~ 0.4	0	0	1	0	0
拉脱维亚	7	2	7 (2)	0.7 ~ 1.5	7	0	0	0	0
马耳他	3		3 (1)	0.3 ~ 0.4	2	0	0	1	0
荷兰	19		20 (7)	5.1 ~ 13.5	0	19	0	0	0
波兰	13		13 (11)	9 ~ 23.3	5	8	0	0	0
葡萄牙	19		17 (5)	4.4 ~ 6.3	19	0	0	0	0
罗马尼亚	2		2 (0)	5.7 ~ 11.6	0	2	0	0	0
瑞典	10		9 (2)	2.9 ~ 7.7	0	1	8	1	0
斯洛文尼亚	3		(0)	0.4 ~ 1	0	0	0	0	0
斯洛伐克	4		4 (3)	0.7 ~ 3	0	0	0	4	0
合计	518	49	544 (239)		186	147	56	105	50

注: “a”, AEI 为 “Average Exposure Indicator”, 即平均暴露示踪物, 空白处表示未参与该评价; “b”, 括号内数字为郊区背景地区点位数 “c”, 人口单位: 百万, 左边数字为城市群中总城镇人口数, 右边数字为联合国世界城市化展望报告中的数据。

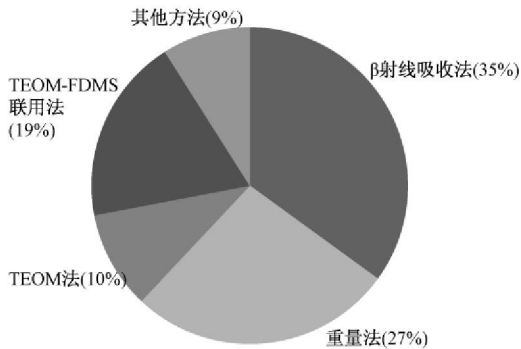
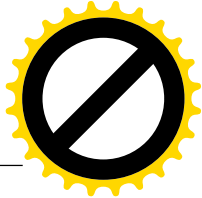
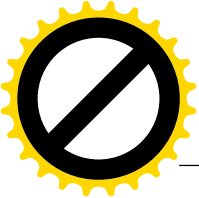


图 1 2008 年欧盟成员国使用不同  $PM_{2.5}$  监测方法的点位比例

3 发达国家对颗粒物自动监测方法的认证情况

3.1 英国颗粒物自动监测方法认证情况

英国的空气质量监测网络中,在颗粒物监测上多使用 TEOM 法监测仪。但是,TEOM 法监测仪的采样膜一直保持在  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这种持续的高温会使硝酸铵等一些半挥发性的颗粒物挥发而导致测量结果偏低,为了满足“重量等效结果”的要求,TEOM 法的监测数据应用一个默认的纠正系数 1.3,来校正因挥发而损失掉的颗粒物质量<sup>[3]</sup>。

2006 年英国环境食品农业事务部 (DEFRA) 及其下属机构委托 BUREAU BERITAS 针对颗粒物 (包括  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$ ) 监测仪进行了详细研究。研究结果认为,使用了 1.3 的纠正系数之后 TEOM 法仍不能作为欧盟标准方法的等效方法,

但是在 TEOM 监测仪上增加 FDMS 之后,可满足等效标准要求<sup>[4]</sup>。

FDMS 是用于校正 TEOM 法监测仪因半挥发性颗粒物的质量损失引起的测量结果偏差而研发的系统。其具体工作原理:气样通过 FDMS 的进样管干燥后进入 TEOM 监测仪,大气样品中的颗粒物沉积在 TEOM 监测仪的滤膜上,并测定一段时间后滤膜上的颗粒物重量,计算出颗粒物的质量浓度;之后通过 FDMS 的切换阀,气样进入 FDMS 中的冷凝器,大气中的颗粒物和有机物等组分被冷凝并被滤膜截留,通过冷凝器之后的纯净气流再进入 TEOM 监测仪测量,由于此时气样不含颗粒物,因此滤膜不会增重,反而因滤膜上半挥发性颗粒物的持续挥发,而造成滤膜质量减轻,减轻的质量即为半挥发性颗粒物损失的质量;假设在两次相同时间的测量过程中,TEOM 监测仪滤膜上损失的质量相等,将第一次测得的颗粒物质量浓度加上第二次测得的半挥发性颗粒物的损失量,即得到校正后的颗粒物质量浓度。

表 2 显示的是英国发布的关于颗粒物监测标准等效方法的测试报告中,7 种可能等效替代颗粒物标准自动监测方法的监测仪器的测试结果。表 2 中各自动监测仪器的测试结果显示,单独使用 TEOM 法监测仪测量  $PM_{10}$  时,不能满足标准等效自动监测方法的要求;但当 TEOM 监测仪和 FDMS 联用后,可以作为  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的标准等效自动监测方法;另外, $\beta$  射线法 SM200 监测仪可以作为  $PM_{10}$  的标准等效自动监测方法<sup>[4]</sup>。

表 2 英国颗粒物监测等效方法报告中各监测仪器的测试结果

备选仪器型号	颗粒物类别	仪器厂家	是否满足等效标准要求	校正要求
Partisol 2025	$PM_{10}$	美国热电	满足	不需要
TEOM	$PM_{10}$	美国热电	不满足	校正之后也不满足要求
$PM_{10}$ FDMS	$PM_{10}$	美国热电	满足	不需要
$PM_{2.5}$ FDMS	$PM_{2.5}$	美国热电	满足	不需要
SM200 by Beta	$PM_{10}$	瑞典 Opsis AB	满足	不需要
SM200 by Mass	$PM_{10}$	瑞典 Opsis AB	斜率和截距校正后满足	$SM200Mass_{Corrected} = \frac{(SM200Mass - 1.286)}{0.891}$
BAM*	$PM_{10}$	美国 Met-One	斜率校正后满足	$BAM_{Corrected} = \frac{BAM}{1.211}$ $BAM_{AmbientCorrected} = \frac{BAM_{Ambient}}{1.273}$

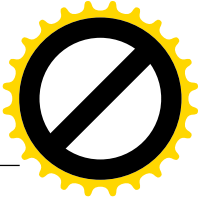
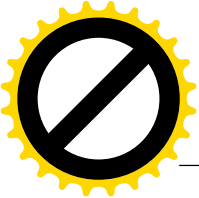
注:“\*”表示美国 Met-One 公司加热 BAM 自动监测仪也包含在此研究中,然而在进行数据分析时发现仪器配置不正确,此仪器不在统计分析之列。

3.2 美国颗粒物自动监测方法认证情况

美国环保署发布的颗粒物监测指定参考和等

效方法清单中,通过认证的自动监测分析仪见表 3、表 4。





由表 3、表 4 可以看出,通过认证的 PM<sub>10</sub> 自动监测方法中包括 TEOM 法监测仪(不含 FDMS),

通过认证的 PM<sub>2.5</sub> 自动监测方法中也包括 TEOM 法监测仪,但需联用 FDMS<sup>[5]</sup>。

表 3 部分美国环保署认证的 PM<sub>10</sub> 分析仪

方法	认证编号	方法代码
美国 Andersen 公司 β 射线仪 FH621-N	EQPM-0990-076	076
日本 DKK-TOA 公司 FPM-222/222C/223/223C	EQPM-0905-156	156
日本 DKK-TOA 公司 DUB-222(S)/223(S)	EQPM-0905-156	156
法国 ESA 公司 β 射线仪 MP101M	EQPM-0404-151	151
日本 Horiba 公司 β 射线仪 APDA-371	EQPM-0798-122	122
美国 Met One 公司 β 射线仪 BAM1020/1020-1, GBAM1020/1020-1	EQPM-0798-122	122
瑞典 Opsis 公司 SM200	EQPM-0810-193	193
美国 R&P 公司 TEOM 1400, 1400a	EQPM-1090-079	079
美国 Thermo Andersen 系列 β 射线仪 FH62C14, 5014i	EQPM-1102-150	150
美国 Thermo Scientific 公司 TEOM 1400AB, 1405	EQPM-1090-079	079
美国 W&A/Thermo Electron 公司 β 射线仪 650 Gauge	EQPM-0391-081	081

表 4 部分美国环保署认证的 PM<sub>2.5</sub> 分析仪

方法	认证编号	方法代码
德国 Grimm 公司 EDM 180 PM <sub>2.5</sub> 监测仪	EQPM-0311-195	195
美国 Thermo Scientific 公司 β 射线仪 FH62C14-DHS, 5014i	EQPM-0609-183	183
美国 Thermo Scientific 公司 5030 SHARP	EQPM-0609-184	184
美国 Thermo Scientific 公司 TEOM 1400a 联用 8500C FDMS	EQPM-0609-181	181
美国 Thermo Scientific 公司 TEOM 1405DF 联用 FDMS	EQPM-0609-182	182
美国 Met One Instrument, Inc 公司的 BAM-1020 β 射线仪	EQPM-0308-170	170

#### 4 中国 PM<sub>2.5</sub> 监测仪器使用情况

2007 年起,中国环境监测总站就已组织天津、上海、重庆、广东省环境监测中心和深圳、广

州、苏州、宁波和南京市环境监测站等 9 个试点单位,包括 16 个监测点位,开展 PM<sub>2.5</sub> 试点监测工作。表 5 显示的是各试点监测站所使用的 PM<sub>2.5</sub> 监测仪器。

表 5 中国 PM<sub>2.5</sub> 试点监测单位仪器使用情况

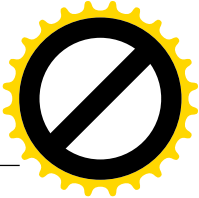
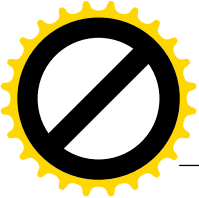
省市	点位数	厂家	型号	方法
天津	7	美国热电	1405	TEOM
上海	6	美国热电	1405	TEOM, TEOM-FDMS
重庆	3	法国 ESA	MP101	β 射线
南京	3	美国热电	RP1400(2), 1405(1)	TEOM
苏州	8	美国热电	1405	TEOM
宁波	4	美国热电	FH62C14	β 射线
广东省	10	美国热电	RP1400(2), 1405(3), FH62C14(5)	TEOM, β 射线
广州	9	美国热电、Met One	1405(7), Met One(2)	TEOM, β 射线
深圳	8	美国热电	1405	TEOM

注：“型号”中括号内数字表示使用该型号仪器的点位数。

此外,环保部于 2011 年组织全国 26 个城市开展空气质量试点监测工作,监测项目包含了 PM<sub>2.5</sub> 的自动监测,TSP、铅和苯并[a]芘的手工监测。26 个城市分别为石家庄、太原、呼和浩特、沈

阳、长春、哈尔滨、无锡、宁波、合肥、厦门、南昌、济南、安阳、武汉、长沙、东莞、桂林、海口、成都、贵阳、昆明、西安、兰州、西宁、银川和乌鲁木齐。

据中国环境监测总站初步统计,全国 113 个



环保重点城市中大约有 50 个城市具有  $\text{PM}_{2.5}$  监测能力,拥有大约 100 台(套)监测设备,主要集中在东部经济较为发达的城市。超过 60% 为 TEOM 法,主要生产厂家为美国热电,仅个别地方监测站具有 FDMS,但由于经常出现故障而拆除;30% 为  $\beta$  射线法,主要生产厂家为美国热电、法国 ESA、Met One、武汉天虹、中晟泰科、API 等;还有个别监测站采用了其他原理的自动监测方法,如凯米迪的光散射法。

目前,多种颗粒物自动监测方法之间的对比实验在国内已有所开展。上海市近期正在对  $\text{PM}_{2.5}$  自动监测方法进行比对研究,初步得出 TEOM 法监测仪测量的  $\text{PM}_{2.5}$  较  $\beta$  射线法监测仪监测结果偏低,2 种方法之间存在显著的线性相

关关系( $R^2 = 0.951$ ),方程式为  $y = 1.2463x - 0.0016$ ;TEOM-FDMS 联用法监测仪与 TEOM 法监测仪之间存在系统误差,前者测量结果比后者偏高,两者也呈现显著的线性相关关系( $R^2 = 0.954$ ),方程式为  $y = 1.151x + 0.0087$ ;方程式的斜率代表了 2 种方法之间的系统误差,截距说明 2 种方法之间的初始误差。2 个方程式表明,TEOM 法监测仪测量的  $\text{PM}_{2.5}$  监测结果与  $\beta$  射线法和 TEOM-FDMS 联用法均在不同颗粒物浓度段之间测量结果偏差存在一定的系统差异,且随着浓度的升高而增大,TEOM 法与  $\beta$  射线法的系统误差略高于 TEOM 法与 TEOM-FDMS 联用法的系统误差,3 种方法之间的初始偏差较小。见图 2 所示。

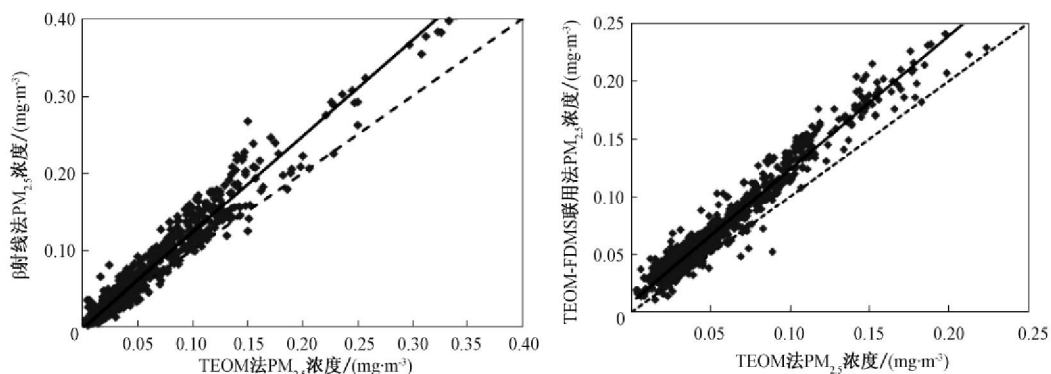


图2 TEOM 法与  $\beta$  射线法、TEOM-FDMS 联用法  $\text{PM}_{2.5}$  自动监测结果比对分析

2011 年 6 月 2—30 日,中国环境监测总站空气质量监测实验室也进行了 TEOM 法和  $\beta$  射线法  $\text{PM}_{10}$  监测仪的比较研究。监测数据比对结果如图 3 所示。

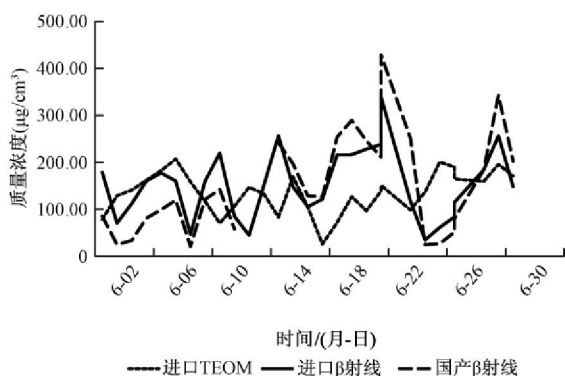


图3 2010 年 6 月份中国环境监测总站大气监测实验室  $\text{PM}_{10}$  日均值趋势图

总体上,TEOM 监测仪的测量值较  $\beta$  射线监测仪的测量值偏低 15% 左右;此外,2 种  $\beta$  射线监测仪的比较结果显示,进口 1405 型仪器与国产 XHAMS 2000 型仪器的监测数据平均偏差在 5% 左右。国内以往开展的相关研究结果显示<sup>[6-9]</sup>,2 种方法具有很好的相关性, $\beta$  射线衰减法的测定结果平均高于 TEOM 法 15.8% ~ 23%。

截至 2011 年 12 月 2 日,通过中国环境监测总站认证检测的系统有 5 个厂家 6 个型号的环境空气质量自动监测系统(表 6),共包括 3 个部分的认证检测:气态污染物采样和监测分析系统( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ )、可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )采样和分析系统、气体校准系统(零气发生器、多元气体校准装置)。 $\text{PM}_{2.5}$  为新增加的监测项目,建立  $\text{PM}_{2.5}$  监测设备的适用性测试平台是非常必要和迫切的。

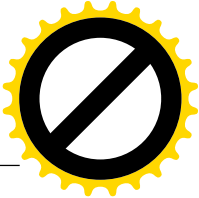
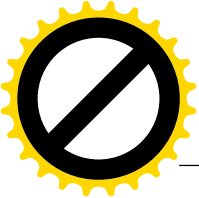


表 6 中国环境空气自动监测系统认证检测合格产品名录(截至 2011 年 12 月 2 日)<sup>[6]</sup>

序号	单位名称	仪器名称	报告编号
1	河北先河环保科技股份有限公司	XHAMS 2000 型空气质量连续自动监测系统	质(认)字 No. 2010-058
2	武汉宇虹环保产业发展有限公司	TH-2000 型环境空气质量自动监测系统	质(认)字 No. 2010-068
3	赛默飞世尔科技(中国)有限公司	MODEL 1500 型环境空气自动连续监测系统	质(认)字 No. 2010-077
4	武汉宇虹环保产业发展有限公司	TH-2000Z1 型振荡天平法颗粒物监测仪	质(认)字 No. 2011-019
5	聚光科技(杭州)有限公司	AQMS-2000 型空气质量自动监测站	质(认)字 No. 2011-032
6	北京雪迪龙科技股份有限公司	AQMS-900 型环境空气质量自动监测系统	质(认)字 No. 2011-040

## 5 结论

1) 国内外常用的  $PM_{2.5}$  自动监测方法主要为  $\beta$  射线法和 TEOM 法, 比对结果显示, 2 种方法具有很好的相关性, TEOM 法测量值较  $\beta$  射线法偏低, TEOM-FDMS 联用法测量值略高于 TEOM 法。6 月份实验室比对期间 TEOM 监测仪的测量值较  $\beta$  射线监测仪偏低 15% 左右。

2) 欧盟 518 个  $PM_{2.5}$  监测点位中, 使用  $\beta$  射线法、TEOM 法和 TEOM-FDMS 联用法的点位数分别占总点位数的 35%、10% 和 19%。

3) 英国测试报告显示, TEOM-FDMS 联用法可以作为  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的标准等效自动监测方法, 美国环保署认证中要求 TEOM 法  $PM_{2.5}$  自动监测仪必须联用 FDMS 才能满足等效方法要求。

4) 应尽快建立  $PM_{2.5}$  监测设备的适用性测试平台, 为在全国开展  $PM_{2.5}$  监测提供必要的技术支持。

### 参考文献:

- [1] 张元茂, 郑叶飞.  $\beta$  射线衰减法与微量振荡天平法测定  $PM_{10}$  的比较 [J]. 环境监测管理与技术, 2002, 14(4): 21-23.
- [2] Benno J, Frank de L, Erik N, et al. Reporting on

ambient air quality assessment in the EU Member States, 2008 [R]. Bilthoven: European Topic Centre on Air and Climate Change, 2010.

- [3] Matthew S, Victoria S, Ben F. National Monitoring & Assessment Technical Report: Study of Ambient Air Quality at Port Talbot [R]. Preston, Environment Agency: Ambient Air Monitoring Team, 2008.
- [4] David H, Richard M, Jeff B. UK Equivalence Programme for Monitoring of Particulate Matter [R]. London: Bureau Veritas, 2006.
- [5] Human Exposure & Atmospheric Sciences Division. List of Designated Reference and Equivalent Methods [S]. North Carolina: National Exposure Research Laboratory, United States Environmental Protection Agency, 2011.
- [6] 张予燕.  $\beta$  射线法与振荡天平法测定环境中  $PM_{10}$  的对比分析 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2006(1): 45-46.
- [7] 姜峰.  $\beta$  射线法和振荡天平法在监测中的应用 [J]. 辽宁城乡环境科技, 2005, 25(5): 16-17.
- [8] 郑道敏, 吴微燕, 王贤沛, 等.  $\beta$  射线衰减法和重量法测定环境空气中  $PM_{10}$  的对比研究 [J]. 环境污染与防治, 2007, 29(2): 138-140.
- [9] 张盛华. 美国 RP 公司微量振荡天平测尘仪与法国 ESA 公司 MP101M  $\beta$  射线测尘仪的比较 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2008(1): 34-37.