

# 基于主成分分析的 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 测量准确性影响因素分析

李德文<sup>1,2</sup>, 惠立锋<sup>1\*</sup>, 吴付祥<sup>1</sup>

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037;

2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400039)

**摘要:**采用主成分分析法探究环境温度、湿度、动态加热温度、采样流量、分离器切割性能、走纸精度、本底值分析时间、采样时间等8项因素对 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 测量准确度的影响,定量分析各影响因素的贡献率并提出主要影响因素的影响程度、控制范围及方法。结果表明:走纸精度、动态加热温度及采样流量的贡献率之和为54.2%,对 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 测量结果影响较为明显。为使测量结果误差 $<5\%$ ,滤带定位误差应不超过1.3 mm,动态加热温度控制在 $45\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,采样流量偏离在 $\pm 0.8\text{ L/min}$ 以内。

**关键词:**  $PM_{2.5}$ ;  $\beta$ 射线法; 主成分分析法; 影响因素

中图分类号: X851

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2020)05-0056-04

## Influence Factor on $PM_{2.5}$ Measurement Accuracy by $\beta$ -ray Method Based on Principal Component Analysis

LI De-wen<sup>1,2</sup>, HUI Li-feng<sup>1\*</sup>, WU Fu-xiang<sup>1</sup>

(1. China Coal Technology and Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China;

2. State Key Lab. of Methane Disaster Monitoring & Emergency Technology, Chongqing 400039, China)

**Abstract:** The influences of eight factors: ambient temperature, humidity, dynamic heating temperature, sampling flow, separator cutting performance, paper feeding accuracy, analysis time of background value and sampling time on the accuracy of  $PM_{2.5}$  measurement by  $\beta$ -ray method were studied based on principal component analysis. The contribution rate of each factor was quantitatively analyzed and the influences of the main factors, control of scope and method were put forward. The results showed that the sum of the contribution rate of paper feeding accuracy, dynamic heating temperature and sampling flow rate was 54.2%, which had an obvious influence on  $PM_{2.5}$  measurement by  $\beta$ -ray method. In order to make the measurement error less than 5%, the positioning error of filter strip should not exceed 1.3 mm, the dynamic heating temperature should be in the range of  $45\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the deviation of sampling flow should be within  $\pm 0.8\text{ L/min}$ .

**Key words:**  $PM_{2.5}$ ;  $\beta$ -ray method; Principle component analysis; Influence factor

$PM_{2.5}$ 是我国大气环境污染的主要污染物之一,会损害人体健康、降低城市能见度甚至影响全球气候<sup>[1-4]</sup>,准确监测 $PM_{2.5}$ 具有重要意义。 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 监测系统测定结果不受颗粒物种类、形状、粒径及化学成分影响,具有操作简单、维护方便、可实现连续测定等优点,被广泛使用。为了得到高质量的 $PM_{2.5}$ 监测数据,有必要掌握影响其监测数据质量的影响因素。不少学者使用单因素分析法对测量结果的准确性影响因素进行研究<sup>[5-8]</sup>,

可 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 测定的准确性受众多因素的复合作用,这些研究忽略了各因素之间的交互作用,

收稿日期:2019-06-28;修订日期:2020-06-22

基金项目:国家重点研发计划基金资助项目(2017YFC0805200);天地科技股份有限公司科技创新创业基金资助项目(2018-TD-QN058)

作者简介:李德文(1964—),男,四川岳池人,研究员,博士,主要从事粉尘检测及防治技术研究。

\*通信作者:惠立锋 E-mail: huilif0530@163.com

缺乏全面的分析。今采用主成分分析方法对  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  测量准确性影响因素进行分析, 在实现多维变量简化的同时, 综合考虑各因素之间的相互影响, 建立  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  浓度监测的准确性影响因素的影响权重模型, 并提出主要影响因素的影响程度、控制范围及方法。

### 1 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 测量原理及准确性影响因素

#### 1.1 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 浓度测量原理

$\beta$  射线法测尘是利用  $\beta$  射线穿透含尘滤带的衰减量来测量采样期间滤带增加的颗粒物质量。研究表明, 在一定条件下, 当  $\beta$  射线能量恒定时, 其强度随吸收物质层厚度的增加而减弱, 并符合指数衰减规律<sup>[9-10]</sup>。 $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  监测系统见图 1。其测试过程为: 在恒定强度的  $\beta$  射线束下对滤带的空白点位进行本底值测量, 空白点位在滤带传动系统的作用下移动到采样点位采样, 采样完成后, 采样点位滤带回到  $\beta$  射线测量点测定含尘滤带的衰减量。通过浓度计算公式可换算  $PM_{2.5}$  质量浓度<sup>[10]</sup>。

#### 1.2 影响因素

长期对  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  监测系统的运行维护及测试数据比对发现, 环境温度、环境相对湿度、动态加热温度、采样流量、分离器切割粒径、走纸偏移量、本底值分析时间、采样时间等都会对  $PM_{2.5}$  测量结果产生影响, 影响因素变量见表 1。

#### 1.3 主成分分析原理及指标选取原则

主成分分析是一种多元统计分析方法, 依据数据降维思想, 将高维空间问题转化到低维空间处

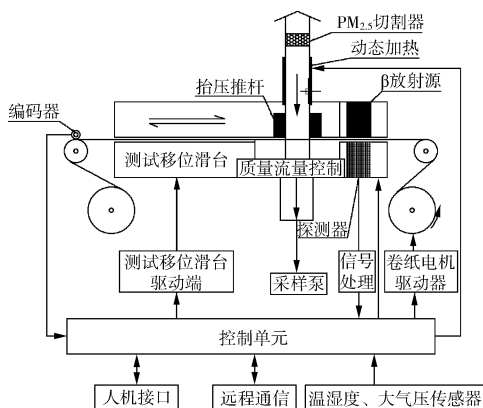


图 1  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  监测系统

Fig. 1  $PM_{2.5}$  concentration monitoring system by  $\beta$ -ray method

表 1 影响因素变量

Table 1 Variables of influence factors

变量名称	变量代码	变量单位
环境温度	$X_1$	$^{\circ}C$
环境相对湿度	$X_2$	%
动态加热温度	$X_3$	$^{\circ}C$
采样流量	$X_4$	L/min
分离器切割粒径	$X_5$	$\mu m$
走纸偏移量	$X_6$	mm
本底值分析时间	$X_7$	s
采样时间	$X_8$	min

理, 将多个原指标综合成较少的有代表性的几个主成分描述, 通过主成分的贡献率加权平均构造综合评价函数。主成分浓缩了指标信息, 避免了过多数据对描述对象造成混乱, 可有效抑制评价过程中人为因素的干扰, 较好保证评价结果的客观性<sup>[11-13]</sup>。根据  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  浓度监测系统的基本结构和工作原理, 提出该监测方法影响因素相关指标的选取原则。纳入的指标既具有重要影响作用, 又能充分反映监测系统进行  $PM_{2.5}$  采样及数据分析的主要过程, 并且可在满足建模需求的前提下尽量简化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 数据获取

以中煤科工集团重庆研究院有限公司研究开发的  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  监测系统在研发、标定与运行阶段的代表性测试数据为基础, 筛选同一范围组数据(取  $25 \mu g/m^3 \sim 30 \mu g/m^3$ ), 建立与表 1 中影响因素变量相对应的数据组。原始样本数据见表 2。

### 2.2 影响因素综合评价

根据主成分分析步骤对表 2 中的样本数据标准化处理后, 建立各影响因素相关系数矩阵并进行标准化。发现采样流量( $X_4$ )和走纸偏移量( $X_6$ )、

表 2 样本数据

Table 2 Sample data

样本号	$X_1/$ $^{\circ}C$	$X_2/$ %	$X_3/$ $^{\circ}C$	$X_4/$ ( $L \cdot min^{-1}$ )	$X_5/$ $\mu m$	$X_6/$ mm	$X_7/$ s	$X_8/$ min
1	22.5	82.5	30	16.3	2.52	1.3	60	45
2	23.2	78.1	30	16.3	2.52	0.8	60	45
3	22.7	64.1	35	16.9	2.46	1.8	180	30
4	28.1	69.4	28	16.6	2.52	0.8	60	30
5	28.6	83.2	35	17.4	2.55	2.1	120	60
6	25.3	70.6	30	16.6	2.52	1.8	180	60
7	22.4	75.3	28	17.2	2.46	1.8	60	45
8	25.9	70.6	35	17.2	2.52	2.1	180	60
9	28.6	84.3	30	16.6	2.55	1.3	120	45
10	27.1	77.0	28	16.3	2.55	0.8	120	60

环境温度( $X_1$ )和分离器切割粒径( $X_5$ )、动态加热温度( $X_3$ )和走纸偏移量( $X_6$ )之间的相关系数分别为 0.84、0.76 和 0.71,相关性较强,具有一定的信息重叠,适合做主成分分析。

计算相关系数矩阵的特征值贡献率及累计贡献率,并提取主成分。计算可知,前 3 个成分的特征值贡献率分别为 39.144%、30.358% 及 12.542%,超过原始 8 个变量信息的 80%,说明前 3 项主成分包含了主成分分析中所涉及的大部分信息,故该分析过程选取前 3 个主成分可满足要求。因子载荷矩阵显示各指标与主成分之间的关系,其值越大,主成分与指标之间的联系就越强。利用选定的前 3 个主成分计算因子载荷矩阵可知,指标中走纸偏移量( $X_6$ )、动态加热温度( $X_3$ )、采样流量( $X_4$ )在第一主成分上的载荷分别为 0.923、0.828 和 0.804,为变量中载荷相对较强的指标,说明第一主成分主要反映了这 3 个指标的信息。同理,第二主成分主要反映分离器切割粒径( $X_5$ ) (载荷强度为 0.899)、环境温度( $X_1$ ) (载荷强度为 0.770)这两个指标信息。利用  $F1$ 、 $F2$  和  $F3$  表达前 3 个主成分,计算得到其线性组合如下:

$$F1 = -0.2470X_1 + 0.4249X_2 + 0.4546X_3 + 0.4678X_4 - 0.0466X_5 + 0.5216X_6 + 0.1260X_7 - 0.2069X_8 \quad (1)$$

$$F2 = 0.3877X_1 + 0.1365X_2 + 0.0682X_3 + 0.1075X_4 + 0.4942X_5 + 0.0731X_6 + 0.4820X_7 + 0.57704X_8 \quad (2)$$

$$F3 = 0.5902X_1 - 0.0214X_2 + 0.3704X_3 - 0.0214X_4 - 0.3145X_5 + 0.2928X_6 + 0.1091X_7 - 0.16815X_8 \quad (3)$$

对以上指标权重归一化处理,计算各因素的权重向量,  $W_{X1}$ 、 $W_{X2}$ 、 $W_{X3}$ 、 $W_{X4}$ 、 $W_{X5}$ 、 $W_{X6}$ 、 $W_{X7}$  及  $W_{X8}$  分别为 0.0714、0.1054、0.1841、0.1601、0.0694、0.1976、0.1572、0.0549。基于各主成分的方差贡献率,建立  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  浓度监测系统影响因素综合评价模型:

$$Y = 0.0714X_1 + 0.1054X_2 + 0.1841X_3 + 0.1601X_4 + 0.0694X_5 + 0.1976X_6 + 0.1572X_7 + 0.0549X_8 \quad (4)$$

由模型(5)可知,各因素对  $\beta$  射线法  $PM_{2.5}$  监测系统测量结果的影响从大到小依次为走纸偏移量、动态加热温度、采样流量、本底值分析时间、环境相对湿度、环境温度、分离器切割粒径及采样时间。

## 2.3 主要影响因素的影响及控制方法

### 2.3.1 走纸偏移量

根据  $\beta$  射线法的测尘过程,滤带的采样区域需要在特定区间内往复运动,移动距离是否准确直接影响检测结果的准确性。以直径 10 mm 的圆形测尘灰斑为例,使用标准膜片进行对比测试,当灰斑与检测点相对位置发生偏移 0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、2.5 mm、3.0 mm、3.1 mm 时, $\beta$  射线浓度检测仪测量结果的相对误差分别为 2.36%、3.09%、5.12%、7.47%、9.96%、12.81%、14.05%。测量结果的相对误差随着滤带相对位置偏差的增大而增大。对该组数据进行多项式拟合,结果表明,若使测量结果误差在 5% 以内,则直径 10 mm 的灰斑与检测点的相对位置变化不可超过 1.3 mm。传统的滤纸移动方式是通过步进电机驱动收带轮和放带轮的转动来实现滤带在检测点和采样点的正反向进纸动作,滤带须保持一定张力,且不能发生形变<sup>[14]</sup>。滤带有一定伸缩性,在正反向进纸时,滤带张力难以保持恒定。为减少滤带移动过程带来的影响,在设计时可保持滤带不动,通过驱动检测台来切换探测点和采样点的位置,使用编码器反馈移动位移,减少因左右走纸摆轮弹簧弹性变化和滤带形变引起的走纸及检测误差。

### 2.3.2 动态加热温度

在实验环境舱中保持相对湿度 50% 不变,调节动态加热温度分别为 30 °C、35 °C、40 °C、45 °C、50 °C、60 °C、70 °C,与称重法结果相比, $\beta$  射线浓度检测仪测量结果误差分别为 -1.2%、-0.8%、-3.2%、-5.6%、-9.4%、-13.7%、-19.3%。测量结果相对误差随加热温度升高而降低,加热温度越高测量结果降低幅度越大。使用鼓泡法增大试验环境舱湿度时发现,加热温度和相对湿度的影响可部分抵消。当动态加热温度控制在 45 °C ~ 50 °C 范围内,相对湿度在 60% ~ 85% 之间变化时,加热温度对测量结果的影响可控制在 5% 以内。

### 2.3.3 采样流量

采样流量会影响粒径切割装置性能和总采样体积,导致测量结果变化。测试发现,当采样流量偏离 16.7 L/min 的标称流量  $\pm 0.8$  L/min 时,可导致测量结果变化 5%。因此,在保证系统气密性的前提下,采样管布置尽量保持笔直,流量调节可采用 PID 闭环控制,自动补偿因电压波动和阻力变化引起的流量变化,以实现流量的相对稳定。

### 3 结语

$\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 浓度监测系统准确性是多因素综合作用的结果,对影响准确性的主要因素按影响程度大小排序为走纸偏移量、动态加热温度、采样流量、本底值分析时间、环境相对湿度、环境温度、分离器切割粒径及采样时间,其中前3个主成分包含并解释了原始8个变量82.0%的信息,最大限度保持了原始信息。在进行 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 浓度监测系统的设计及标定时,首先需要考虑滤带移动的精度,以确保所采集样品均落入 $\beta$ 射线计数器的有效接收范围,其次需要设置合适的动态加热温度,以减少采样气中水气对颗粒物质量及采样滤膜的影响。为保证 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 浓度测量结果误差 $<5\%$ ,应保证滤带定位误差不超过1.3 mm,动态加热温度控制在 $45\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,采样流量波动在 $\pm 0.8\text{ L/min}$ 范围内,该结论对 $\beta$ 射线法 $PM_{2.5}$ 浓度监测系统的设计与标定具有参考意义。

#### [参考文献]

- [1] FENG S, GAO D, LIAO F, et al. The health effects of ambient  $PM_{2.5}$  and potential mechanisms[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 128: 67 - 74.
- [2] XIE Y, DAI H, DONG H, et al. Economic impacts from  $PM_{2.5}$  pollution-related health effects in China: A provincial-level analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(9): 4836 - 4843.
- [3] SEPOSO X, KONDO M, UEDA K, et al. Health impact assess-

- ment of  $PM_{2.5}$ -related mitigation scenarios using local risk coefficient estimates in 9 Japanese cities [J]. *Environment International*, 2018, 120: 525 - 534.
- [4] 莫招育, 杜娟, 刘慧琳, 等. 桂林市冬季大气 $PM_{2.5}$ 中重金属污染物健康风险评估[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(4): 23 - 27.
- [5] 胥全敏, 钟志京, 李群岭.  $\beta$ 射线法监测 $PM_{2.5}$ 的主要影响因素和控制方法分析[J]. *四川环境*, 2016, 35(1): 79 - 82.
- [6] 叶智, 黄宏, 刘俐, 等. 动态加热系统对 $\beta$ 射线法监测 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的影响[J]. *四川环境*, 2015, 34(6): 52 - 56.
- [7] 徐雪娇, 贺庆, 宋言明, 等. 气体流速对 $PM_{2.5}$ 浓度实时测量值的影响[J]. *自动化仪表*, 2019, 40(2): 85 - 87, 95.
- [8] 吴佳涛, 陈文亮, 张增福. 基于 $\beta$ 射线技术测量 $PM_{2.5}$ 的准确性研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(2): 338 - 342.
- [9] 周小棠.  $PM_{2.5}$ 挥发性颗粒物补偿测量装置的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2017.
- [10] 惠立锋. 基于PLC的三通道 $\beta$ 射线法大气颗粒物连续监测系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2018(7): 81 - 84.
- [11] 谭念, 孙一丹, 王学顺, 等. 基于主成分分析和支持向量机的木材近红外光谱树种识别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(11): 3370 - 3374.
- [12] WANG M, CAO W, SUN C, et al. To distinguish the primary characteristics of agro-waste biomass by the principal component analysis: An investigation in East China [J]. *Waste Management*, 2019, 90: 100 - 120.
- [13] 程晨. 基于主成分分析的上海市大气降水中DL-PCBs来源初判[J]. *环境监测管理与技术*, 2018, 30(4): 18 - 22, 45.
- [14] 贺振怀, 王杰. 滤膜形变对 $\beta$ 射线衰减法颗粒物质量浓度监测结果准确性的影响及修正[J]. *矿业安全与环保*, 2019, 46(1): 52 - 56.

#### · 征订启事 ·

### 欢迎订阅 2021 年《环境科技》杂志

《环境科技》是由江苏省生态环境厅主管,江苏省徐州环境监测中心、江苏省环境科学研究院联合主办的集学术性与实用性于一体的环境科学技术类期刊,为“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)。国内统一刊号:CN 32 - 1786/X,国际标准刊号:ISSN 1674 - 4829。

本刊以直接为污染防治实践服务为宗旨,重点报道环境科学最新实用技术、科研成果、治理开发及国内外最新信息与动态,内容涉及水、气、声、固等污染处理技术及清洁生产、生态保护等实用技术的推广应用。常设栏目有:研究报告、污染防治、环境评价与规划、专论与综述、环境管理、环保论坛等,从多角度向读者介绍国内外环境保护新成果、新技术、新动态、新经验等。对环境保护管理、科研院所、污染防治技术开发设计、环保产业、工矿企业等部门从事环保工作的管理和专业技术人员及大专院校师生均有较强的参考价值,欢迎有关单位和个人订阅。

本刊为双月刊,大16开国际标准版,80页,每逢双月25日出版。国内订价(含邮费)15元/期,全年90元。全国各地邮局均可订阅。联系方式:地址:徐州市新城区彭祖大道与太行路交叉口路西《环境科技》编辑部 邮编:221018。电话:0516 - 85635681;85635682 传真:0516 - 85737126 电子信箱:jshjkj@126.com。

订阅方式:一、当地邮局订阅:邮发代号:28 - 179。二、银行转账汇款:账号:10107501040010729 收款单位:江苏省环境监测协会 开户行:中国农业银行股份有限公司南京茶亭东街支行。请银行转账订户填写回执单后发送至编辑部邮箱jshjkj@126.com,回执单下载地址:http://jshj.cbpt.cnki.net/。