

监测与评价

便携式颗粒物监测仪室内
PM_{2.5} 监测性能评估研究高睿¹,李赛²

(1.北京科技大学附属中学,北京 100083;2.北京科技大学,北京 100083)

摘要:选取6种品牌的实时快速颗粒物监测仪,通过稳定室内环境PM_{2.5}的连续监测,比较了不同仪器的监测性能。结果表明,各监测仪对PM_{2.5}监测的响应度和性能与监测仪价格无正相关关系,品牌4和品牌5监测仪的监测性能较好,准确度误差<5 μg/m³,但不同品牌监测仪在不同环境下表现出不同的监测性能。

关键词:空气监测仪;PM_{2.5};连续监测;性能测试。

中图分类号:X701

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2019)01-0058-07

ASSESSMENT OF THE MONITORING PERFORMANCE OF
PORTABLE PARTICULATE MATTER MONITORS FOR PM_{2.5}GAO Rui¹, LI Sai²

(The high school affiliated to University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083,
China)

Abstract: Six different real-time rapid particle matter monitors were selected in this study. On the basis of continuous monitoring in stable indoor environment, the monitoring performance of these monitors was compared. The results indicated that, the PM_{2.5} monitoring responsibility and performance showed no positively correlation with the price. The Brand 4 and Brand 5 monitors illustrated better performance, with an accuracy error lower than 5 μg/m³. Different band Monitors showed various monitoring performances in different environment.

Key words: Air monitor; PM_{2.5}; Continuous monitoring; Performance assessment.

空气颗粒物,特别是粒径较小的颗粒物进入人体后会对人体健康产生影响,甚至引发心血管系统、神经系统、免疫系统等疾病^[1]。当室外污染较严重时,人们可为了规避危害而选择减少室外出行或采取有防范措施的出行方式。而研究表明,空气污染具有很强的室内外渗透性^[2-3],且室内外PM_{2.5}具有较强相关性^[4-6],室外空气污染可能对室内空气质量带来一定的影响。此外,室内吸烟、燃煤取暖、烹饪的油烟、打印等因素均可造成室内空气污染的加剧^[7]。而众多研究表明,人们每天超过80%的时间活动于室内环境^[8-9],因此室内空气质量的好坏对人体健康具有重要的影响作

用。最新一项针对全球居民死亡负担的研究表明,室内空气污染是造成居民死亡负担的第四位因素,高于位列第九的室外空气污染^[10]。而针对我国居民开展的死亡负担的研究结果表明,室内空气污染位列第五位危险因子^[11]。因此,有必要开展室内空气环境质量如细颗粒物水平的监测,以便于居民采取有针对性的防护措施,从而降低居民室内空气污染带来的健康风险。

目前,国际上广泛采用的PM_{2.5}测定方法主要有重量法、光散射法^[12]、β射线吸收法、微量振荡天平法^[13]等。重量法虽是现行颗粒物监测方法中的基准方法,但需基于滤膜的采样分析且无法实现高时间分辨率的实时监测^[14-15];微震荡天平和β

射线吸收法虽然目前技术成熟,较通用,但这两种方法的仪器价格昂贵、体积庞大且无法实现高分辨的实时监测,一定程度上也限制其应用于室内 PM_{2.5} 的监测。近年来研究表明,激光光散射原理的应用使光散射法的监测结果更为稳定^[16]。我国已将光散射法规定为测量公共场所可吸入颗粒物的标准测定方法^[17],且基于光散射法的空气颗粒物监测仪由于其快速、灵敏、高便携性、可自动连续监测及实时读数等优点而受到社会大众的广泛青睐。对于民用室内实时快速空气监测仪的准确度和精密度的判定,我国尚无统一可衡量的标准和规范。宜凯云等开展的室内 PM_{2.5} 浓度影响因素的研究,主要探讨初始浓度和气流组织对室内 PM_{2.5} 的影响,并未涉及室内环境温度和相对湿度对 PM_{2.5} 测定响应的影响^[18]。邓芙蓉等对基于光散射工作原理的 3 种类型颗粒物检测仪的室内监测及其影响因素开展研究,发现温度和相对湿度不是主要影响因素,但同时也提出存在许多问题,如室内环境变化不大,监测期间温度、相对湿度变化幅度较小等可能会对研究结果带来一定影响^[19]。王蛟男等对 3 种便携式实时 PM_{2.5} 监测仪的性能开展研究,虽评价了各监测仪的监测性能,但并未反映出不同监测仪的适用条件,且只是基于短期的观测分析,各监测仪长期的监测性能无从考评^[20]。

本研究从科学研究的角度选取市售的反映不同价格梯度、不同检测原理等 6 种畅销品牌/类型的实时快速颗粒物监测仪,在考虑不同使用环境下对其准确性和稳定性进行比较和测试,以筛选较为可靠的空气颗粒物监测仪,并分析不同原理的空气颗粒物监测仪的适用条件。该研究将对于指导居民选择适当的空气质量监测仪具有重要的现实意义。

1 材料和方法

1.1 实验仪器

综合考虑监测仪的价格、销售量、测定功能、监测原理等,本研究选用了基于光散射原理的、具有价格梯度和不同监测功能的(如颗粒物的单一测定,不同粒径颗粒物的综合测定,颗粒物和气态污染物的综合测定)10 种不同品牌的便携式空气监测仪,文中称为品牌 1、品牌 2、品牌 3、品牌 4、品牌 5、品牌 6、品牌 7、品牌 8、品牌 9 和品牌 10。

品牌 5 和品牌 6 同一批次各购置 4 台,其余品牌每款仪器同一批次各购置 3 台。其中,品牌 1 和品牌 6 可同时测定 PM_{2.5} 和 PM₁₀;品牌 2 可同时测定 PM_{2.5} 和甲醛;品牌 4 和品牌 5 可同时测定 PM_{2.5}, PM₁₀, TVOC 和甲醛;其余品牌监测仪均只能单一测定 PM_{2.5}。按品牌序号及各品牌的仪器个数进行顺序编号,如品牌 1 的三台仪器分别编为 1[#], 2[#] 和 3[#];品牌 2 的三台仪器依次编为 4[#]~6[#],以此类推,对所有监测仪进行编号。

1.2 测试方法

1.2.1 参照监测仪选择

本研究主要测试指标为 PM_{2.5}。根据“金标准”的评价方法,选用公认性能优异、准确度高的检测仪的监测结果为参照值的判定标准,同一监测环境下同步考察不同品牌监测仪的监测结果,以检验不同品牌仪器在不同监测环境下的性能。当前 MicroPEM 颗粒物监测仪 (Research Triangle Institute, RTI) 为受国际认可,技术成熟的颗粒物监测仪,且已被相关科学研究证实^[21]。其他相关研究将 MicroPEM 颗粒物监测仪的结果与颗粒物滤膜称重法的结果进行了对比分析,结果表明 MicroPEM 监测仪的监测精度和灵敏度均较高,适用于个体及固定站点 PM_{2.5} 的实时精确测量^[22-23]。因此,本研究将 MicroPEM 监测仪作为参照监测仪,分析过程中将其监测结果作为受测环境 PM_{2.5} 的参照水平。

1.2.2 预实验及其环境

在室内环境下进行预实验(2016 年 11 月 20 日~2016 年 12 月 10 日)。将所有监测仪放置位于北京市五环外某正常办公的办公室。该办公室建筑面积 20 m²,工作日上午期间平均工作人员 2 名,窗户正常开启,平均每天开窗通风 1.5 h。所有监测仪均放置于该办公室中央空置办公桌上,每台监测仪与墙壁的距离均大于 1.0 m,与通风口距离大于 2.0 m。预实验期间每台监测仪均进行 PM_{2.5} 浓度的连续监测,每 30 min 记录一次数据,根据同一品牌不同仪器之间的平行性,不同品牌仪器之间的差异等,对仪器品牌进行初步筛选,最终 6 个品牌(品牌 1~品牌 6)入选正式研究(即长期观测实验)。

1.2.3 正式长期观测实验

为创造不同的监测实验环境,利用 PLC 模拟箱稳定实验环境,同时改变模拟箱内的温、湿度和

PM_{2.5} 污染水平,采用实时连续监测模式运行各监测仪。从2016年12月19日~2017年2月4日,2017年2月15日~2017年3月15日,每30 min记录1个监测数据。同时,为识别不同品牌及不同功能仪器的适用环境条件,将入选的6个品牌仪器进行不同环境条件下的性能分析,进一步设定温度、湿度、PM_{2.5}浓度三种影响因素,因素水平为:15℃、20℃、25℃、30℃;10%RH、20%RH、30%RH、40%RH;低浓度(PM_{2.5}<100 μg/m³)、中浓度(PM_{2.5}<100~300 μg/m³)、高浓度(PM_{2.5}>300 μg/m³)。

1.3 评价方法

1.3.1 稳定性

本研究采用相对标准偏差来表征仪器的稳定性,相对标准偏差(Relative standard deviation, RSD)为多次分析测定结果的标准偏差与其算术平均值之比,又称为变异系数,通常用百分数表示。每台仪器的稳定性由每台仪器的多次实验的标准偏差/多次实验的平均值来表示。

标准偏差(Standard deviation)是偏差平方的统计平均值,又称均方根偏差,当测定次数n为有限次数时,即进行有限次分析测定时的标准偏差。

1.3.2 稳定性水平表征

本研究将RSD<0.5%视为稳定性好;RSD=0.5%~1%视为稳定性中等;RSD>1%视为稳定性差,共计三个水平来表征仪器稳定性水平状况。

1.3.3 准确性

本研究准确性主要由绝对偏差和相对偏差两个指标来表示。

1.4 质量控制

本研究所用的每台监测仪均从正规渠道购买,且购买时确保同一品牌的不同监测仪为同一生产批次,每台监测仪均具备仪器检定证书,能够正常使用。MicroPEM仪器除了有检定证书外,每次使用前均进行实验室的流量校准。在实验过程,各仪器均位于同一高度,且确保在相同的温度、湿度和空气污染水平下进行,不同监测仪之间距离不小于15 cm。各监测仪观测期间,确保持续供电,以避免数据的漏测或漏存。

1.5 数据分析

将实验监测记录的数据录入spss21.0并进行数据分析。对不同品牌、同一品牌不同仪器以及MicroPEM的监测数据作差异性分析,比较不同品

牌仪器监测结果的准确性、同一品牌不同仪器的稳定性和差异性、不同条件下仪器的准确性和稳定性,以遴选出准确性和稳定性相对较好的仪器,并评价在不同温度、湿度、空气污染水平下各监测仪的准确性和稳定性情况。

2 结果与讨论

2.1 不同品牌监测仪长期观测值

入选的6种品牌监测仪的基本情况如表1所示。

表1 各类监测仪基本情况

仪器及编号	市场价格(元)	时间分辨率	产品重量(g)	测量量程(μg/m ³)	是否直读数据
品牌1(1#~3#)	500~1000	30 min	<1000g	0~999	是
品牌2(4#~6#)	500~1000	30 min	<1000g	0~999	是
品牌3(7#~9#)	300~500	30 min	<300g	0~999	是
品牌4(10#~12#)	1000~1500	30 min	<600g	0~999	是
品牌5(13#~16#)	1000~1500	30 min	<500g	0~999	是
品牌6(17#~20#)	100~300	30 min	<1000g	0~999	是
MicroPEM(21#~23#)	>10000	30 min	<260g	3~15000	否

注:MicroPEM仪器内置存储卡可备份并导出相应监测数据;其他仪器也均可无线传输存储数据。

为比较不同品牌仪器在长期自然环境下监测的准确性,将不同品牌各仪器在自然环境下(上述办公室内环境)连续监测并对其监测数据分类分析,见图1。由图1可见,品牌1~品牌3和品牌6同一批次监测仪的观测值差异较大,表明在长期监测过程中该品牌仪器的内部质量不稳定,可能不同批次间仪器的差异更大;从品牌4和5的长期观测结果来看,各品牌三台仪器的监测数据分布较一致,差异较小,说明在长期自然监测环境下,品牌4和5的仪器质量较稳定,同一批次内不同监测仪的稳定性和重现性较好,但其准确度有待进一步分析。

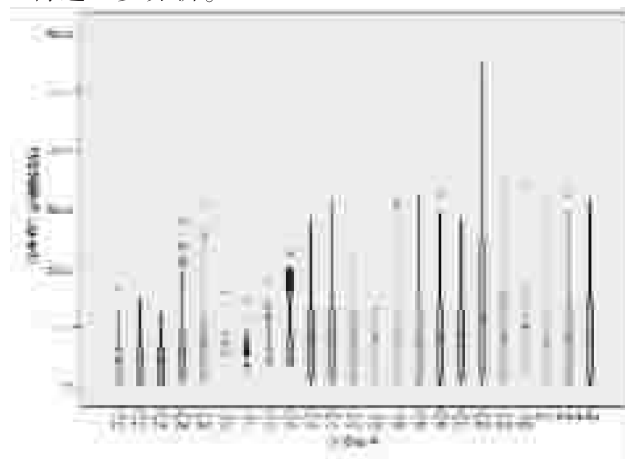


图1 各品牌仪器监测数值分布

2.2 不同品牌仪器对室内 PM_{2.5} 浓度监测的准确性

王蛟男等基于同一品牌内不同监测仪监测结果的相关性分析,以相关系数的大小来识别同一品牌监测测量的平行性^[20]。但是,邓芙蓉等^[19]的研究表明,虽然基于光散射原理的 PM_{2.5} 监测仪的监测结果相关性很好,但其监测结果的差别较大。综合考量,本研究由于开展长期观测,不同品牌的组内监测结果的相关系数差异不大(且均大于 0.98),故本研究不做相关性的深入探讨,而将仪器长期观测值与参考监测值的绝对偏差和相对偏差来表征其测量结果的准确性。

将每类监测仪监测数据求平均值作为此类仪器的数值,并计算 6 个品牌仪器的绝对偏差和相对偏差,以分析每个品牌监测仪的准确性情况,如表 2 所示。其中品牌 1、品牌 6 的绝对偏差很大,超过了 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 品牌 4、品牌 5 的绝对偏差很小,均小于 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,且同一品牌内不同监测仪之间的绝对偏差差异相对较小。由此说明,品牌 4 和 5 这两类仪器的准确性相对较好,一定程度上表明品牌内部同一批次间不同监测仪的差异性较小。

表 2 各类监测仪监测结果准确度

品牌	编号	绝对偏差 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			品牌	编号	绝对偏差 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
		平均值	最大值	最小值			平均值	最大值	最小值
1	1#	47.44	218.9	0	2	4#	15.13	111.44	0
	2#	15.75	46.14	0		5#	11.53	61.65	0
	3#	39.03	116.4	0		6#	9.25	96.3	0
	小计	34.07	218.90	0		小计	11.97	111.44	0
3	7#	6.88	50.9	0	4	10#	1.31	17.24	0
	8#	9.64	69.07	0		11#	0.89	10.57	0
	9#	10.43	68.4	0		12#	2.66	25.74	0
	小计	8.98	69.07	0		小计	1.62	25.74	0
5	13#	2.69	25.07	0	6	17#	54.89	228.5	0
	14#	4.92	40.39	0		18#	15.05	79.39	0
	15#	2.74	28.02	0		19#	23.43	115.27	0
	16#	0.94	14.08	0		20#	29.35	119.39	0
RTI	小计	2.82	40.39	0	小计	30.68	228.50	0	
RTI		0.00	0.00	0.00					

为分析同一品牌监测仪器监测性能的稳定性,对每个品牌不同仪器的监测结果进行相对偏差分析,由此对监测性能进行好、中和差三个等级的划分,见表 3。

表 3 各类仪器监测性能的稳定性

仪器品牌	好 (相对偏差<0.3%)	中 (0.3%<相对偏差<1%)	差 (相对偏差>1%)
1	24.4%	64.4%	11.1%
2	33.3%	53.3%	13.3%
3	42.2%	53.3%	4.4%
4	55.6%	42.2%	2.2%
5	71.7%	26.7%	1.7%
6	41.7%	48.3%	10.0%

从表 3 可以看出,对于品牌 4 和 5,同一品牌内部各监测仪分别有 55.6% 和 71.7% 的监测结果的相对偏差小于 0.3%,说明品牌 4 和 5 这两种监测仪的监测性能较稳定。对于品牌 1~品牌 3 和品牌 6,同一品牌内部各监测仪分别有 64.4%、53.3%、53.3% 和 48.3% 监测结果的相对偏差介于 0.3% 和 1% 之间;不足 50% 的监测结果相对偏差小于 0.3%,说明品牌 1~品牌 3 和品牌 6 这四种监测

仪的监测性能不如品牌 4 和品牌 5 稳定。

综合各监测仪测定结果的稳定性和准确度,与邓芙蓉等^[19]和王蛟男等^[20]的研究相似,本研究也在众多品牌监测仪中筛选出 2 种环境监测响应度好,监测性能较强的监测仪。此外,与王蛟男等^[20]的研究结果一致的是,本研究筛选出的监测性能较好的品牌 4 和品牌 5 的监测仪价格相对较高,但结合品牌 1~品牌 3 来看,PM_{2.5} 监测仪的监测性能并非随价格的增加而增强。因此,说明在选择监测仪时,其价格的高低并不能代表仪器监测性能的好坏。

2.3 不同实验条件下不同品牌仪器的准确性及适用条件

将筛选的 6 个品牌监测仪在不同温度水平下进行准确性和稳定性的分析,如表 4 所示。从表 4 可知,品牌 1 的稳定性随温度的上升呈先升后降再升的波动,在 30 $^{\circ}\text{C}$ 时稳定性最好,但准确度较差;在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时稳定性相对较好,准确性较好,说明其更适用于 20 $^{\circ}\text{C}$ 的监测环境。品牌 2 随温度上升

其稳定性总体增强,在30℃时其稳定性较高,准确性较好,说明该品牌监测仪在30℃能发挥较稳定的监测性能。品牌3和品牌4分别在15℃和30℃环境温度下其综合监测性能最好。品牌5和

品牌6在25℃环境下的综合监测性能最好。从表4可知,品牌4和品牌5在不同温度条件下,其测量的稳定性和准确度总体均较其他品牌监测仪好。

表4 各类仪器在不同温度水平下的稳定性和准确性

品牌	温度(℃)	稳定性(%)	绝对偏差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相对偏差(%)	品牌	稳定性(%)	绝对偏差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相对偏差(%)
1	15℃	0.79	11.04	0.29	2	0.70	30.97	0.75
	20℃	0.62	11.00	0.18		0.63	4.54	0.20
	25℃	0.88	52.73	0.86		0.77	16.32	0.13
	30℃	0.54	55.76	0.59		0.51	0.80	0.39
3	15℃	0.49	0.43	0.26	4	0.48	1.57	0.28
	20℃	0.54	5.44	0.13		0.76	0.00	0.48
	25℃	0.66	27.41	0.21		0.49	4.89	0.22
	30℃	0.43	0.51	0.29		0.50	0.00	0.63
5	15℃	0.40	5.73	0.25	6	0.58	55.37	1.20
	20℃	0.49	6.29	0.17		0.65	36.04	0.09
	25℃	0.34	0.00	0.40		0.55	1.36	0.29
	30℃	0.36	0.00	0.58		0.59	36.13	0.30

由于本研究筛选的6个品牌仪器均基于光散射原理,通过测量散射光强度,应用质量浓度转换系数K值,获取颗粒物的质量浓度^[24]。故浓度转换系数K值的准确度是该监测方法结果精确度的重要基础。而环境的湿度是影响K值的参数之一^[25],但研究表明当环境相对湿度 $\leq 60\%$ 时,其对颗粒物光散射系数的影响较小,不需要对监测结果进行校正^[26]。本研究中设置的湿度水平均不超过60%RH,故在使用期限内监测仪可自行补偿湿度调节,无需对结果再进行校正。对6个品牌监测仪在不同湿度水平下进行准确性和稳定性的分析,见表5。结果发现,品牌1的稳定性随湿度的上升呈先降后升波动,在30%RH时准确性最好,但稳定性最差;在20%RH时稳定性较好,绝对和相对

偏差相对较小,说明其更适用于20%RH的监测环境,但此条件下其绝对偏差达 $15.73\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。品牌2随湿度上升其稳定性先升后降,在30%RH时其稳定性和测量准确度均较高,说明该品牌监测仪在30%RH能发挥较稳定的监测性能。品牌3~品牌5监测仪随湿度的增大其稳定性总体增强,分别在30%RH,40%RH和40%RH湿度条件下的稳定和准确度较好。从表5可知,品牌6在30%RH环境下的综合监测性能较好,但相比品牌1~品牌5,其稳定性和准确度等监测性能最差。综合对比不同品牌监测仪,品牌4和品牌5在不同湿度条件下,其测量的稳定性和准确度均相对较好,且总体变化不大,说明品牌4和品牌5仪器的监测性能受湿度的影响较小。

表5 各类仪器在不同湿度水平下的稳定性和准确性

品牌	温度(℃)	稳定性(%)	绝对偏差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相对偏差(%)	品牌	稳定性(%)	绝对偏差($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相对偏差(%)
1	20%RH	0.62	15.73	0.29	2	0.66	0.00	0.18
	30%RH	0.98	2.14	0.25		0.56	0.81	0.14
	40%RH	0.65	49.97	0.73		0.66	10.02	0.05
	50%RH	0.54	63.87	0.73		0.72	34.06	0.28
3	20%RH	0.66	0.68	0.41	4	0.77	0.00	0.63
	30%RH	0.55	0.00	0.36		0.53	0.00	0.52
	40%RH	0.57	17.15	0.18		0.51	0.43	0.38
	50%RH	0.38	16.02	0.08		0.49	5.64	0.18
5	20%RH	0.45	0.00	0.57	6	0.64	39.90	0.20
	30%RH	0.59	6.29	0.21		0.54	16.12	0.68
	40%RH	0.31	0.00	0.33		0.59	40.02	0.04
	50%RH	0.26	4.30	0.37		0.61	28.99	0.10

注:湿度梯度分别是20%RH、30%RH、40%RH、50%RH。

对6个品牌监测仪在不同湿度水平下进行准确性和稳定性的分析,见表6。品牌1~品牌3监测仪的稳定性和准确度均在高PM_{2.5}污染水平下相对较高;而品牌6的综合监测性能在低PM_{2.5}水平

下相对较好。品牌4和品牌5监测结果的准确性受环境污染水平的波动较小,且其稳定性也相对较好,表明其综合监测性能不受环境条件影响。

表6 各类仪器在不同浓度水平下的稳定性和准确性

仪器品牌	浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	稳定性 (%)	绝对偏差 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相对偏差 (%)	品牌	稳定性 (%)	绝对偏差 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	相对偏差 (%)
1	低	0.65	54.57	1.13	2	0.65	8.65	0.04
	中	0.82	39.71	0.22		0.67	21.00	0.30
	高	0.58	0.00	0.33		0.61	2.58	0.40
3	低	0.52	14.13	0.27	4	0.56	0.34	0.42
	中	0.57	10.68	0.08		0.60	3.76	0.28
	高	0.50	0.00	0.63		0.51	0.00	0.60
5	低	0.44	5.03	0.29	6	0.53	5.98	0.33
	中	0.45	2.87	0.29		0.63	58.18	0.58
	高	0.26	0.00	0.54		0.61	20.31	0.06

注:浓度梯度分别是低浓度($<100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、中浓度($100\sim 300 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、高浓度($>300 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。

本研究发现各品牌监测仪在适当的环境条件下,具备不同的监测性能,尤其是温、湿度条件对其监测结果的稳定性和准确度影响较大。而邓芙蓉等^[9]等研究发现,室内环境的温度、湿度对PM_{2.5}监测性能的影响较小。这一研究结果的差异,可能与研究的设计有关。邓芙蓉等^[9]的研究只是基于2d的观测实验,且观测期间大环境较稳定,环境湿度、温度及污染状况变化较小;而本研究是基于长期的连续观测,且人为地设定不同的温、湿度等环境条件以摸索监测仪的最佳性能展现条件。因此,颗粒物监测仪的室内监测性能的判定要基于一定的环境条件来评价。

综合对比分析不同品牌监测仪监测结果的准确度,同一品牌不同监测仪监测性能的稳定性,品牌4和5的长期监测结果与标准参比值差异较小,说明其监测结果的准确度相对较好;且品牌4和5的品牌内不同监测仪监测结果的稳定性较好,说明同一品牌不同监测仪器之间的误差较小,表明品牌4和5的综合监测性能较其它四个品牌好。但是从不同的环境条件来看,品牌1在20℃、20%RH、高污染水平下的监测性能较好;品牌2在30℃、30%RH、高污染水平下的监测性能较好;品牌3在15℃、30%RH、高污染水平下的监测性能较好;品牌6在25℃、30%RH、低污染水平下的监测性能较好。由于时间关系,本研究并未

研究各品牌监测仪在不同温度、湿度和污染条件下的正交实验,因此,对各品牌监测仪的最佳综合适用条件需进一步探索。

3 结论

长期观测实验表明,不同品牌监测仪对PM_{2.5}监测结果的准确度存在较大差异,其中品牌4和品牌5的监测结果与标准参考值差异最小,说明此两种监测仪的监测结果较准确。同一品牌监测仪在长期观测中,不同品牌监测仪的组内差异不同。其中,品牌4和品牌5的品牌内不同监测仪监测结果的误差性较小,说明同一品牌不同监测仪器之间的稳定性和精密度较好。结合准确性的研究,表明品牌4和品牌5的综合监测性能较其它四个品牌好。

不同温度、湿度和环境污染条件下各品牌监测仪性能的分析结果表明,不同品牌监测仪在不同环境条件表现出不同的监测性能。其中,品牌1~品牌3和品牌6适用于不同的温度、湿度和PM_{2.5}污染水平;品牌4和品牌5在不同环境湿度、温度和空气污染水平下的波动较小,说明品牌4和品牌5的监测性能不受环境条件的影响,适用于一般环境的监测。综合对比分析各品牌仪器监测结果的准确度和稳定性,基于本研究,推荐品牌4和品牌5进行民用环境PM_{2.5}的监测。其他品

牌的监测仪在特定的环境件下和监测要求下,也可发挥较好的监测性能,但其最佳的综合监测条件需要开展深入的正交实验进一步探索。

本研究进行的连续监测时间较长,其结果有很好的参考意义,但本研究的实验条件是人为制造和控制的,与室内真实存在的污染源情况可能有差别,有关室内细颗粒物水平及其影响因素的探索,还需要进行更为广泛深入的研究。

参考文献:

- [1]Zhou P, Guo J, Zhou X Y, et al. PM2.5, PM10 and health risk assessment of heavy metals in a typical printed circuit boards manufacturing workshop [J]. *J Environ Sci—China*, 2014, 26 (10): 2018–2026.
- [2]Scheepers P T J, Wei L V, Beckmann G, et al. Chemical characterization of the indoor air quality of a university hospital: penetration of outdoor air pollutants [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2017, 14: 497–526.
- [3]Mosley R B, Greenwell D J, Sparks L E, et al. Penetration of ambient fine particles into the indoor environment[J]. *Aerosol Sci Technol*, 2001, 34(1): 127–136.
- [4]Diapouli E, Eleftheriadis K, Karanasiou A A, et al. Indoor and Outdoor Particle Number and Mass Concentrations in Athens. Sources, Sinks and Variability of Aerosol Parameters [J]. *Aerosol & Air Quality Research*, 2011, 11(6S):632–642.
- [5]Massey D, Masih J, Kulshrestha A, et al. Indoor/outdoor relationship of fine particles less than 2.5 μm (PM2.5) in residential homes locations in central Indian region[J]. *Building & Environment*, 2009, 44(10):2037–2045.
- [6]高军, 房艳兵, 江畅兴,等. 上海地区冬季住宅室内外颗粒物浓度的相关性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(2):110–114.
- [7]庄晓虹. 室内空气污染分析及典型污染物的释放规律研究[D]. 东北大学, 2010.
- [8]段小丽,赵秀阁, 王丽敏,王贝贝,姜勇,郭静,等. 中国人群环境暴露行为模式研究报告(成人卷).中国环境出版社,2014,北京.
- [9]赵秀阁,段小丽,王贝贝,等. 中国人群环境暴露行为模式研究报告(儿童卷).中国环境出版社,2016,北京.
- [10]Lim SS, Vos T, Flaxman AD, et al: A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010:a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J]. *Lancet* 2012;380: 2224–2260.
- [11]Yang G, Wang Y, Zeng Y, et al. Rapid health transition in China, 1990–2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010.[J]. *Lancet*, 2013, 381(9882):1987–2015.
- [12]杨书中, 邵龙义, 龚铁强,等. 大气颗粒物浓度检测技术及其发展[J]. *北京工业职业技术学院学报*, 2005, 4(1):36–39.
- [13]QX/T 173–2012 GRIMM 180 观测 PM10、PM2.5 和 PM1 的方法[S].北京:气象出版社,2013.
- [14]HJ 618–2011 环境空气 PM10 和 PM2.5 的测定重量法 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
- [15]HJ 656–2013 环境空气颗粒物(PM2.5)手工监测方法(重量法)技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版,2013.
- [16] 张晶, 朱一川, 周文刚. 光散射法在室内环境 PM10 检测中的应用及测尘仪器最新进展[J]. *环境与健康杂志*, 2008, 25(3):267–269.
- [17]3Rd P C, Burnett R T, Turner M C, et al. Lung Cancer and Cardiovascular Disease Mortality Associated with Ambient Air Pollution and Cigarette Smoke: Shape of the Exposure–Response Relationships [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119(11):1616–21.
- [18]宣凯云, 陈丽萍, 龚延风,等. 室内细颗粒物(PM2.5)浓度影响因素的数值模拟[J]. *暖通空调*, 2016, 46(9):120–123.
- [19]邓芙蓉, 王欣, 吴少伟,等. 三种空气颗粒物监测仪监测结果比较研究[J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26(6):504–506.
- [20]王蛟男, 王情, 孙庆华,等. 家用 PM2.5 监测仪器性能评估研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33(12):1086–1089.
- [21]Rodes C E, Chillrud S N, Haskell W L, et al. Predicting Adult Pulmonary Ventilation Volume and Wearing Compliance by On – Board Accelerometry During Personal Level Exposure Assessments. [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 57(5):126–137.
- [22]杜艳君, 孙庆华, 李焱焱. 不同通勤方式下 PM2.5 个体暴露与固定站点监测的相关性研究[J]. *环境与健康杂志*, 2015, 32(4):319–323.
- [23]杜艳君, 张翼, 李焱焱. 北京市冬季住宅内 PM2.5 暴露水平及室内外关系的研究[J]. *环境与健康杂志*, 2016, 33(4):283–286.
- [24]中华人民共和国卫生部.公共场所空气中可吸入颗粒物 PM10 测定方法光散射法.北京:中国标准出版社,2001.
- [25]黄婧, 邓芙蓉, 吴少伟,等. 相对湿度对光散射法测定大气细颗粒物浓度的影响[J]. *中国预防医学杂志*, 2012(5):321–325.
- [26]徐春雨, 王秦, 李娜,等. 大气 PM2.5 浓度的光散射测定法及湿度校正[J]. *环境与健康杂志*, 2015, 32(2):151–154.