

# 传感技术在环境空气监测中的方法适用性研究

车祥, 盛涛, 高松\*, 蔡云飞, 高宗江, 伏晴艳, 段玉森  
(上海市环境监测中心, 上海 200235)

**摘要:**采用某品牌3台传感器,对环境空气中气态污染物( $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CO}$ )和颗粒物( $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ )进行为期1个月的连续监测,探讨传感技术在环境空气监测中的方法适用性。研究表明,3台传感器监测的各污染物质量浓度均显著相关,Pearson相关系数 $>0.9(p < 0.01)$ ;监测的颗粒物与国控点数据显著相关且质量浓度水平接近,Pearson相关系数 $>0.9(p < 0.01)$ ;  $\text{PM}_{2.5}$ 传感器测定值相对于国控点数据的平均相对误差仅为 $-7.3\%$ ,均值绝对误差 $<2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;传感器在高湿度下的 $\text{PM}_{2.5}$ 测定值与国控点数据相吻合,当相对湿度为 $80\% \sim 90\%$ 时,平均相对误差仅为 $-0.9\%$ ;传感器气态污染物测定值与国控点数据之间存在差异,电化学原理气态污染物传感器性能仍有待提升。

**关键词:**传感器;颗粒物;气态污染物;在线监测;环境空气

中图分类号:X851 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2019)02-0062-04

## Applicability Study on Sensor Technology in Ambient Air Monitoring

CHE Xiang, SHENG Tao, GAO Song\*, CAI Yun-fei, GAO Zong-jiang, FU Qing-yan, DUAN Yu-sen  
(Shanghai Environmental Monitoring Centre, Shanghai 200235, China)

**Abstract:** The gaseous pollutants ( $\text{NO}_2/\text{SO}_2/\text{O}_3/\text{CO}$ ) and particulate matters ( $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ ) in ambient air were continuously monitored for a month by the sensors from three different brands for evaluating their applicability in ambient air monitoring. Results showed that the mass concentrations of all the pollutants measured by the three sensors were highly correlated. Pearson correlation coefficient was above 0.9 ( $p < 0.01$ ). The mass concentrations of particulate matters were approximate to the data from national monitoring sites and there were significant correlations between them. Pearson correlation coefficient was above 0.9 ( $p < 0.01$ ). The average relative error of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration between from sensor measurement and national monitoring sites was  $-7.3\%$ , while the average absolute error was less than  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . The concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  from sensor measurement were in good accordance with those from national monitoring sites in a high humidity environment. When the relative humidity was between  $80\%$  and  $90\%$ , the average relative error was merely  $-0.9\%$ . There were differences between the concentrations of gaseous pollutants ( $\text{NO}_2/\text{SO}_2/\text{O}_3/\text{CO}$ ) measured by the sensors and from the national monitoring sites, thus the requirement to sensor performance was enhanced.

**Key words:** Sensor; Particulate matter; Gaseous pollutant; On-line monitoring; Ambient air

环境空气中气态污染物( $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{CO}$ )和颗粒物(PM)的传统监测方法虽然准确度高,但是仪器体积大,点位布置受限,应用不够灵活,难以满足环境精细化管理的需求。近年来,传感器因快速、灵敏、体积小、持续动态监测、成本低等优点,在大气网格化监测及室内空气质量监测领域得到了一定应用。传感技术在环境空气监测领域具有良好的发展前景,可以利用其便携的特点,按照工作

需要灵活布点,监控交通、施工扬尘、工业区边界或其他区域的空气质量。因此,研究传感技术在环境

收稿日期:2018-05-03;修订日期:2018-12-02

基金项目:科技部国家重点研发计划基金资助项目(2016YFC0207401,2017YFC0209903);上海市科委科研计划基金资助项目(16DZ1204600)

作者简介:车祥(1991—),男,新疆克拉玛依人,助理工程师,硕士,从事大气环境监测工作。

\*通信作者:高松 E-mail: gs@semc.gov.cn

空气监测领域的方法适用性,评估传感器的数据质量,具有很强的参考意义和应用价值。目前,传感器仍存在着精度较低、一致性和稳定性不够理想等问题<sup>[1-2]</sup>,国内鲜有将其成功应用于在线监测的报道,国内外对传感器在线监测性能<sup>[3]</sup>及影响因素<sup>[4]</sup>的研究也较少。今将传感技术用于环境空气中气态污染物和颗粒物的在线监测,研究其在该领域的方法适用性。使用 3 组同型号传感器,进行为期 1 个月的环境空气质量在线监测,对各仪器的数据作比对,并与同时段临近国控点的监测数据作比对,考察传感器数据的一致性和准确性。

## 1 实验部分

使用市场上某品牌的颗粒物及气态污染物 ( $PM_{10}/PM_{2.5}/SO_2/NO_2/CO/O_3$ ) 传感器共 3 台,分别记为 A、B、C。其中,颗粒物传感器为国产产品,基于光散射方法;气态污染物传感器均为进口产品,采用电化学方法。集成应用前,通过气体舱内的标准物质和平行一致性测试优选合格传感器组件;应用过程中,通过组网测试进一步验证一致性。

用于传感器比对的国控点监测仪器均为 ThermoFisher 品牌,型号及原理分别为:42i,化学发光法,监测  $NO_x/NO/NO_2$ ;43i,脉冲紫外荧光法,监测  $SO_2$ ;48i,气体滤波相关红外吸收法,监测  $CO$ ;49i,紫外分光光度法,监测  $O_3$ ;TEOM 1405/1405F,微量振荡天平法,监测  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$ 。

于 2017 年 1 月 9 日—2 月 9 日,对环境空气进

行 24 h 连续在线监测。3 台传感器同步采样,进气口处于同一水平高度,距地面约 1.5 m。传感器的时间分辨率为 1 min,传感器读数平均计算得到采样区间内 1 h 均值用于分析。测点位于上海市徐汇区,周边主要为住宅区和办公楼,西面 400 m 为交通干道,无明显局地污染源,为典型的城区监测点。监测期间相对湿度为 26% ~ 97%,平均值为 65%,日平均气温为 10 °C ~ 11 °C。

监测开始 6 h 后,所有气态污染物传感器的数值均出现波动,将该不合理异常高值列为无效数据,不参与比对分析。该研究的目的在于探索利用传感器进行环境空气颗粒物监测的方法适用性,不考虑季节变化对温、湿度及颗粒物浓度的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒物

#### 2.1.1 数据分布与时间序列

3 台传感器的颗粒物测定值一致性高,百分位数接近。 $PM_{10}$  传感器测定值普遍较国控点监测数据低, $P_{50}$  值比国控点低  $8 \mu g/m^3 \sim 9 \mu g/m^3$ ,均值低  $9 \mu g/m^3 \sim 10 \mu g/m^3$ ,表明传感器的  $PM_{10}$  测量准确度有待提高。 $PM_{2.5}$  传感器测定值与国控点监测数据相比低值更多,总体上数据分布接近,百分位数基本一致,均值略低于国控点,绝对误差  $< 2 \mu g/m^3$ 。对数据进行时间序列分析,发现传感器与国控点颗粒物数据变化趋势基本一致,未见显著差异,结果见图 1(a)(b)。

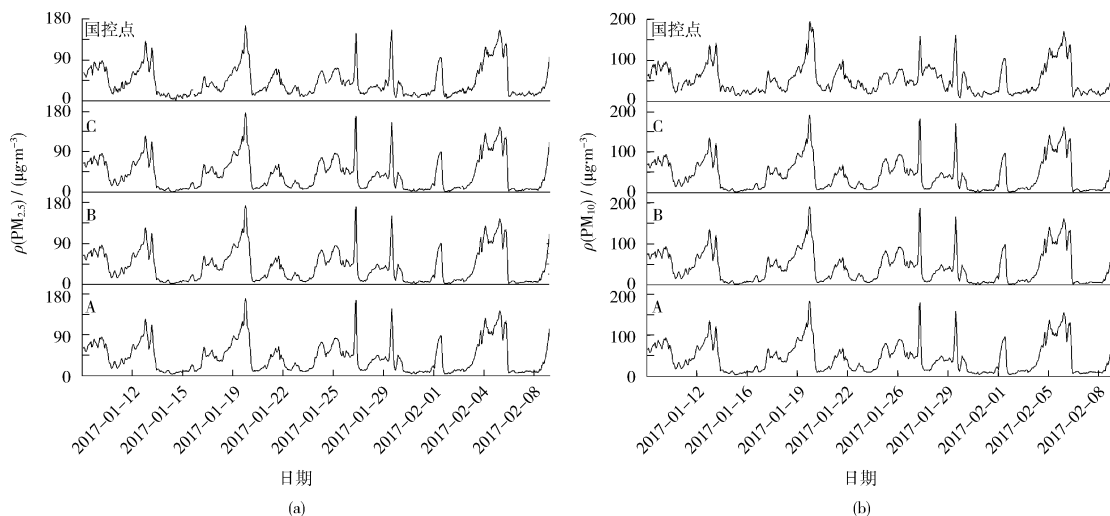


图 1 传感器与国控点颗粒物质量浓度时间序列

Fig. 1 Time series of PM mass concentrations obtained from sensors and the national control point

### 2.1.2 相关性分析

3台传感器的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度相关系数分别为0.999和1.000,与国控点监测数据也有显著的相关性。对传感器与国控点的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量浓度数据作相关性分析,Pearson相关系数PM<sub>2.5</sub>为0.971~0.975( $p < 0.01$ ),PM<sub>10</sub>为0.902~0.910( $p < 0.01$ )。结合上述数据分布结果,可以认为传感器PM<sub>2.5</sub>测定值与国控点监测数据的一致性优于PM<sub>10</sub>。

### 2.1.3 准确度分析

传感器PM<sub>2.5</sub>测定值与国控点监测数据的相对误差小,准确度高。经计算,传感器与国控点的PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>小时质量浓度平均相对误差分别为-16.0%~-7.3%和-27.8%~-24.5%,其中监测效果最佳的传感器有73%的PM<sub>2.5</sub>和52%的PM<sub>10</sub>数据相对误差在±30%以内。

传感器与国控点PM<sub>2.5</sub>数据之间存在系统误差,总体而言,传感器测定值低于国控点监测数据,在不同的质量浓度区间,相对误差分布规律有所变化。随着PM<sub>2.5</sub>质量浓度升高,传感器A与国控点PM<sub>2.5</sub>小时质量浓度的相对误差逐渐减小。以国控点监测数据为标准,将PM<sub>2.5</sub>质量浓度按每20 μg/m<sup>3</sup>划分为一档,计算传感器测定值的相对误差,结果见表1。在0 μg/m<sup>3</sup>~40 μg/m<sup>3</sup>范围,传感器测定值总体相对国控点监测数据偏低,相对误差基本分布在-50%~0范围,表现为先增大后减小,在20 μg/m<sup>3</sup>左右时平均相对误差最大;在40 μg/m<sup>3</sup>~80 μg/m<sup>3</sup>范围,传感器测定值总体相对国控点监测数据偏高,相对误差基本分布在±20%范围并逐渐减小;

表1 传感器PM<sub>2.5</sub>数据在不同质量浓度水平下的平均相对误差

Table 1 Average relative error of PM<sub>2.5</sub> data from sensors in different mass concentration levels

质量浓度范围 $\rho/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	样本量 $n/\text{个}$	平均相对误差/%		
		传感器A	传感器B	传感器C
0~20	253	-23.1	-45.0	-38.7
21~40	209	-0.1	-5.9	-3.6
41~60	94	4.9	5.1	6.1
61~80	86	3.1	4.3	4.8
81~100	42	-3.0	-2.3	-2.0
101~120	35	-0.4	1.1	1.7
121~140	12	-9.7	-8.5	-8.2
>140	11	-2.5	-0.6	-0.6
总体	742	-7.3	-16.0	-13.0

80 μg/m<sup>3</sup>以上的样本量较少,相对误差总体较小,尤其在100 μg/m<sup>3</sup>附近,传感器测定值与国控点监测数据十分接近。

### 2.1.4 相对湿度对监测性能的影响

根据文献报道,相对湿度对传感器的颗粒物监测性能有影响,在高湿度条件下传感器的颗粒物测定值会略微升高。颗粒物比表面积大,亲水组分吸水后使得颗粒的平均尺寸增加,从而增加了颗粒物的散射光吸收能力,相同质量浓度的颗粒物在较高湿度时,通常会得到较高的光散射法测定值<sup>[5-8]</sup>。传感器A的PM<sub>2.5</sub>测定值与国控点监测数据的相对误差随相对湿度上升而减小,当相对湿度>80%时由负误差转为正误差,表明在高相对湿度时,传感器测定值比国控点监测数据更高。

将相对湿度从20%起按每10%为一档划分成8个区间,计算传感器PM<sub>2.5</sub>测定值相对于国控点监测数据的相对误差,结果见表2。当相对湿度为20%~60%时,相对误差较大(-28%~-10%)且不随相对湿度升高而变化;当相对湿度>60%时,平均相对误差先减小后增大,由负误差转为正误差;在80%~90%相对湿度区间,相对误差最小。在不同相对湿度条件下,传感器测定值与国控点监测数据的相关系数R<sup>2</sup>为0.90~0.95。

表2 传感器PM<sub>2.5</sub>数据在不同相对湿度条件下的平均相对误差

Table 2 Average relative error of PM<sub>2.5</sub> data from sensors in different relative humidity levels

相对湿度 /%	样本量 $n/\text{个}$	平均相对误差/%		
		传感器A	传感器B	传感器C
20~30	11	-16.9	-27.2	-25.4
31~40	25	-13.3	-22.7	-19.5
41~50	58	-15.3	-28.2	-24.3
51~60	140	-9.7	-26.0	-21.8
61~70	155	-8.3	-16.3	-16.3
71~80	100	-5.6	-9.1	-7.2
81~90	95	-0.9	-4.2	-2.8
>90	19	5.4	4.1	6.0
总体	603	-7.6	-16.4	-13.6

## 2.2 气态污染物

### 2.2.1 数据分布与时间序列

3台传感器NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和O<sub>3</sub>的平均测定值相差不超过1 μg/m<sup>3</sup>,CO的平均测定值相差不超过10 μg/m<sup>3</sup>,而质量浓度分布情况略有差别。3台传感器监测SO<sub>2</sub>的质量浓度中位数均为4 μg/m<sup>3</sup>,分

布极为集中。传感器 C 出现了明显的  $\text{NO}_2$  和  $\text{CO}$  异常低值数据,且  $\text{O}_3$  测定值与传感器 A 和 B 相比偏高。总体而言,传感器 A 和 B 的数据分布基本一致,与传感器 C 差别明显,表明传感器之间的一致性仍须改进。

3 台传感器的数据变化趋势合理,代表了污染物变化的常见特征。传感器  $\text{NO}_2$  测定值变化趋势与国控点监测数据一致,均呈双峰型特征,与文献报道相符<sup>[9-10]</sup>。由于实验地点附近车辆较少, $\text{NO}_2$  变化趋势不如国控点明显。 $\text{O}_3$  的低值时间与  $\text{NO}_2$  的高值时间相对应,呈单峰型变化趋势,该分布特点与  $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  之间的光化学反应相关<sup>[9-12]</sup>。与国控点监测数据相比,传感器  $\text{O}_3$  测定值较低,变化趋势不一致。 $\text{CO}$  测定值呈双峰型日变化趋势,与文献报道相符<sup>[13]</sup>。传感器  $\text{SO}_2$  测定值与国控点监测数据存在显著差别,质量浓度低且稳定,未表现出明显的变化规律。

### 2.2.2 误差分析

国控点仪器与传感器  $\text{CO}$  和  $\text{NO}_2$  小时质量浓度相对误差较小,可以满足实际监测需求。 $\text{SO}_2$  测定值的相对误差较大,平均相对误差约 56%,最小相对误差超过 12%。 $\text{CO}$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_2$  测定值的相对误差较小,90% 的  $\text{CO}$  小时质量浓度相对误差在 33% 以内,平均相对误差约 17%;90% 的  $\text{O}_3$  小时质量浓度相对误差在 50% 以内,平均相对误差约 35%;90% 的  $\text{NO}_2$  小时质量浓度相对误差在 40% 以内,平均相对误差约 20%。对国控点和传感器测试点周边环境摸排分析,近距离范围内无明显污染排放源,表明误差主要来自监测仪器。

## 3 结论

(1) 传感器  $\text{PM}_{2.5}$  测定值与国控点监测数据显著相关,前者均值略低,绝对误差  $< 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。与国控点监测数据最接近的传感器,其  $\text{PM}_{2.5}$  小时质量浓度平均相对误差为 -7.3%,73% 的数据相对误差在  $\pm 30\%$  以内。传感器  $\text{PM}_{2.5}$  监测效果优于  $\text{PM}_{10}$ 。

(2) 相对湿度对传感器的  $\text{PM}_{2.5}$  监测性能有影响,高相对湿度 ( $> 90\%$ ) 时测定值略微偏高。当相对湿度为 80% ~ 90% 时,二者监测值最接近,平均相对误差仅为 -0.9%。

(3) 传感器气态污染物测定值与国控点监测数据之间存在差异,电化学原理气态污染物传感器

性能仍有待提升。传感器  $\text{CO}$  和  $\text{NO}_2$  测定值与国控点监测数据变化趋势一致,平均相对误差分别约为 17% 和 20%。 $\text{O}_3$  测定值低于国控点监测数据,变化趋势不完全一致。 $\text{SO}_2$  测定值的相对误差较大,平均相对误差约 56%。

利用冬季 1 个月连续监测,探索传感器在环境空气颗粒物和气态污染物监测中的方法适用性。研究结论或不能应用于所有传感器,而根据实验结果可知,传感器  $\text{PM}_{2.5}$  监测效果较理想,具有良好的应用价值和前景,电化学原理气态污染物传感器的一致性和准确性还有待提升。

### [参考文献]

- [1] 王琪.  $\text{PM}_{2.5}$  传感器监测性能研究[J]. 建筑热能通风空调, 2016,35(7):37-39.
- [2] 王东方,高松,包权,等. 基于厚膜传感器的空气质量监测仪性能及应用研究[J]. 中国环境监测,2009,25(6):50-53.
- [3] 高玉梅,孟国鑫,楼晟荣,等.  $\beta$  射线吸收法双通道  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  监测装置性能探究[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(5):47-50.
- [4] KELLY K E, WHITAKER J, PETTY A, et al. Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor[J]. Environmental Pollution, 2017, 221:491-500.
- [5] WU C F, DELFINO R J, FLORO J N, et al. Evaluation and quality control of personal nephelometers in indoor, outdoor and personal environments[J]. J Expo Sci Env Epid, 2004, 15(1):99-110.
- [6] GURUMURTHY R, JOHN L A, GREGORY C P, et al. Characterizing indoor and outdoor 15 minute average  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations in urban neighborhoods[J]. Aerosol Science and Technology, 2003, 37(1):33-45.
- [7] 姜迪,李聪. 南京市  $\text{PM}_{2.5}$  扩散与气象条件的关系[J]. 环境监测管理与技术,2016,28(1):36-40.
- [8] DAY D E, MALM W C. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity: a comparison between measurements made at three different sites[J]. Atmos. Environ., 2001, 35(30):5169-5176.
- [9] 王东东,朱彬,王静. 利用差分吸收光谱系统对  $\text{O}_3$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的监测分析[J]. 环境科学研究,2009,22(6):650-655.
- [10] 林艺辉,谢品华,秦敏,等. 北京冬季大气  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  与  $\text{O}_3$  的监测与分析[J]. 大气与环境光学报,2007,2(1):55-59.
- [11] 孙思思,丁峰,陆晓波,等. 南京市典型臭氧污染过程的激光雷达垂直观测解析[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(3):60-63.
- [12] 陈宜然,陈长虹,王红丽,等. 上海臭氧及前体物变化特征与相关性研究[J]. 中国环境监测,2011,27(5):44-49.
- [13] 薛敏,王跃思,孙扬,等. 北京市大气中  $\text{CO}$  的浓度变化监测分析[J]. 环境科学,2006,27(2):200-206.