

静态箱法与分流法在切割器评价中的差异研究

刘佳琪¹, 张国城¹, 王瑜², 吴丹¹, 田莹¹, 潘一廷¹, 屈晓虎³, 张艳伟³

1. 北京市计量检测科学研究院, 国家生态环境监测治理产品质量监督检验中心, 北京 100029

2. 中国环境监测总站, 国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012

3. 河北先进环保产业创新中心有限公司, 河北 石家庄 050035

摘要:静态箱法和分流法作为PM_{2.5}/PM₁₀切割器性能评价中的两种重要方法,在国内计量机构均有应用,但两种方法评价结果的差异一直未被报道和重视。采用两种方法分别对某一旋风式PM_{2.5}切割器进行评价,得到的D₅₀(捕集效率为50%时所对应的粒子空气动力学当量直径)分别为2.38 μm和2.31 μm,显示出明显差异。为了消除管路对颗粒物的吸附及气溶胶粒径谱仪的测量误差对实验结果的影响,在静态箱内安装分流管配件,将静态箱法简易快速地切换为分流法,然后再对同一PM_{2.5}切割器进行评价,得到的D₅₀为2.40 μm,而直接使用静态箱法得到的D₅₀为2.38 μm,两个结果差异较小。利用该简易快速切换装置,分别基于静态箱法和分流法两种方法,对另一台国产PM_{2.5}切割器、一台BGI PM₁切割器进行评价,得到的D₅₀分别为2.43 μm和2.44 μm、1.02 μm和1.01 μm,显示出两种方法评价结果基本一致。研究结果表明,静态箱法和分流法对同一台旋风式切割器的评价结果应该是一致的,如果有明显差异,可能是由不同评价装置的管路结构、粒径谱仪原理等的不同引起的。

关键词:切割器;捕集效率;空气动力学直径;静态箱法;分流法

中图分类号:TB99;X830.2

文献标志码:A

文章编号:1002-6002(2025)04-0286-07

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2025.04.25

Research on the Difference Between Static Box Method and Shunt Method in the Evaluation of Cutter

LIU Jiaqi¹, ZHANG Guocheng¹, WANG Yu², WU Dan¹, TIAN Ying¹, PAN Yiting¹, QU Xiaohu³, ZHANG Yanwei³

1. National Quality Supervision and Inspection Center for Ecological & Environmental Products, Beijing Institute of Metrology, Beijing 100029, China

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

3. Hebei Advanced Environmental Protection Industry Innovation Center Co., Ltd., Shijiazhuang 050035, China

Abstract: Static box method and shunt method are two important methods for evaluating the performance of PM_{2.5}/PM₁₀ cutters in domestic metrology institutions, but the differences in evaluation results between these two methods have not been reported and given sufficient attention. Through the evaluation of a cyclone PM_{2.5} cutter, the D₅₀ (the particle aerodynamic diameter corresponding to a 50% collection efficiency) obtained by the two methods was 2.38 μm and 2.31 μm respectively, showing obvious difference. To eliminate the effects of particle adsorption in the pipeline and measurement errors from the aerosol particle size spectrometer on the experimental results, a split-flow tube accessory was installed in the static chamber. This allowed the static chamber method to be quickly and easily switched to the split-flow method. Subsequently, the same PM_{2.5} cutter was reevaluated, yielding a D₅₀ of 2.40 μm, while the D₅₀ obtained using the static chamber method was 2.38 μm, the difference was not obvious. The D₅₀ values of 1.02 μm and 1.01 μm for a cyclone PM₁ cutter were evaluated by using the static box method and shunt method, and the results were basically consistent. Utilizing this rapid and simple switching device, evaluations were conducted on another domestic PM_{2.5} cutter and a BGI PM₁ cutter using both the static box method and the shunt method. The resulting D₅₀ values were 2.43 μm and 2.44 μm, and 1.02 μm and 1.01 μm respectively, indicating that the evaluation results from the two methods were virtually identical. The research showed that the static box method and the shunt method should have the same evaluation results for the same cyclone cutter. If there is any difference, it may be caused by the difference of pipeline structure and particle size spectrometer of different detection devices.

Keywords: cutter; capture efficiency; aerodynamic diameter; static box method; shunt method

收稿日期:2024-05-10;修订日期:2025-01-08

基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2023MK001);中央引导地方科技发展资金项目(科技成果转化项目)(226Z3901G)

第一作者简介:刘佳琪(1990-),女,河北邯郸人,博士,高级工程师。

通讯作者:张国城

固体、液体或生物粒子经雾化后可在空气中形成稳定悬浮的气溶胶颗粒物。由于粒径微小(通常小于 $10\ \mu\text{m}$),这些颗粒物可通过呼吸系统深入肺部甚至进入血液循环系统。此时,若颗粒物中含有有害化学成分或生物活性物质,则可能对人体健康造成危害。^[1-4]。近年来,全国对 $\text{PM}_{2.5}$ 监测的重视推动了光散射、 β 射线等颗粒物监测技术的快速发展。在 $\text{PM}_{2.5}$ 监测中,对环境颗粒物的有效采集及对不同粒径颗粒物的有效分离是影响检测结果的关键因素^[5-7]。为了提高检测结果的准确性,气溶胶在进入仪器检测单元之前往往需经过切割器的筛分。切割器的内部结构设计使之可实现对不同尺寸颗粒物的分级筛选。

根据筛分原理的不同,切割器主要可分为旋风式、撞击式、虚拟撞击式等。常用的切割器捕集效率评价方法主要有分流法^[8-9]和静态箱法^[10],但对于两种方法评价结果的差异,目前仍未见研究报道。本课题组前期基于静态箱法,已经对不同原理、不同采样流量切割器进行了测试,研究了不同种类颗粒物、不同串联方式等对切割器捕集效率的影响^[11-15],还进行了采样器采样物理效率评价研究^[16-18]。本文主要研究静态箱法与分流法对同一 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器的评价结果差异,并通过设计静态箱法与分流法简易快速切换装置,对差异原因进行分析。

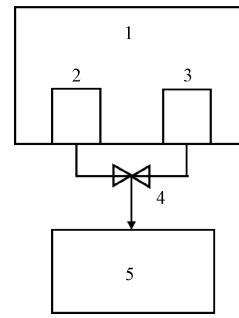
1 实验方法

1.1 静态箱法和分流法装置结构

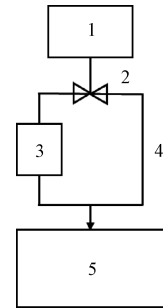
图1是静态箱法和分流法评价装置的结构示意图^[19]。可以看出,两种方法最大的区别在于切割器和参比管路前端是否有封闭的分流管路,即进入切割器和参比管路的气溶胶是来源于同一位置还是不同位置。

1.2 静态箱法与分流法简易快速切换设计

在之前的研究中,为了评价切割器的捕集效率,采用了静态箱法气溶胶模拟舱^[10-15]。本研究为了对比分流法与静态箱法对同一台 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器的评价结果差异,在静态箱法评价装置中加装了一个“Y”形分流管路,将其改造成分流法装置。如图2所示,“Y”形管路的两路宽度与切割器和参比管路之间的间隔一致,以保证两个分路的平行性。



1. 静态箱;2. $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 切割器;
3. 参比管路;4. 电磁阀;5. 空气动力学粒径谱仪。
(a) 静态箱法



1. 混合舱;2. 电磁阀;3. $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$ 切割器;
4. 参比管路;5. 空气动力学粒径谱仪。
(b) 分流法

图1 静态箱法和分流法评价装置结构示意图

Fig.1 Structure diagram of evaluation devices based on static box method and shunt method

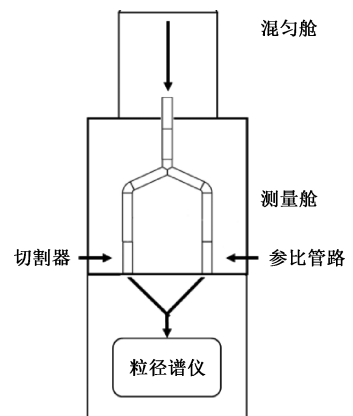


图2 静态箱中“Y”形分流管路示意图

Fig.2 Installation diagram of the Y-shaped distribution pipe in the static chamber

1.3 切割器捕集效率检测方法

先将不同种类的颗粒物粒子雾化成浓度足够均匀、稳定的气溶胶,再将待评价的切割器放置在测试舱内,通过空气动力学粒径谱仪检测气溶胶

通过切割器前后的颗粒物浓度变化,计算得到各粒径对应的捕集效率^[20]。之后,以粒径为横坐标、捕集效率为纵坐标,拟合得到捕集效率曲线,获取 D_{a50} (捕集效率为 50% 时所对应的粒子空气动力学当量直径),并按公式(1)和公式(2)计算曲线的几何标准偏差(σ_g)。

$$\sigma_g = \frac{D_{a16}}{D_{a50}} \quad (1)$$

$$\sigma_g = \frac{D_{a50}}{D_{a84}} \quad (2)$$

式中: D_{a16} 、 D_{a50} 、 D_{a84} 分别为捕集效率为 16%、50%、84% 时的空气动力学当量直径。

2 评价结果与讨论

为了得到更有代表性的结论,本文分别选择了进口和国产 $PM_{2.5}$ 旋风式切割器进行评价。使用《环境空气颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$) 采样器技术要求及检测方法》(HJ 93—2013)规定的 8 种粒径的单分散聚苯乙烯微球对切割器进行评价^[20],分别拟合出捕集效率曲线,再计算出 D_{a50} 和 σ_g 。

2.1 静态箱法与分流法独立装置评价结果

为了分析静态箱法与分流法装置的评价结果差异,分别使用两套独立的静态箱法和分流法评价装置对同一台美国 BGI 公司生产的 $PM_{2.5}$ 切割器进行了评价,结果如图 3 所示。可以看出,两条曲线有一些差别,但基本走向和形状一致。两种方案评价结果的具体数值如表 1 所示,评价得到的 $PM_{2.5}$ 切割器的 D_{a50} 均在合格范围内^[20],但相差 $0.06 \mu\text{m}$ 。

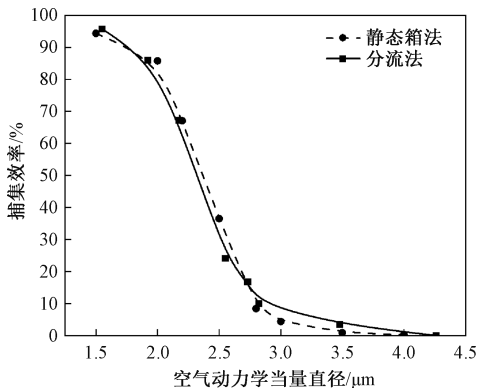


图 3 使用两种方法得到的 $PM_{2.5}$ 切割器评价结果对比

Fig. 3 Comparison of $PM_{2.5}$ cutter evaluation results based on two methods

表 1 使用两种方法评价得到的 $PM_{2.5}$ 切割器性能参数
Table 1 Performance parameters of $PM_{2.5}$ cutter evaluated by two methods

性能参数	静态箱法	分流法
$D_{a50}/\mu\text{m}$	2.37	2.31
$\sigma_g(D_{a16}/D_{a50})$	1.15	1.17
$\sigma_g(D_{a50}/D_{a84})$	1.17	1.17

为更加全面地表征两种方法所得数据的差异状况,使用 SPSS 27.0 软件对本次对比试验得到的 D_{a50} 进行统计学分析。两组结果之间的比较采用两独立样本 t 检验方法,显著性水平 P 值的范围在 0 到 1 之间。当显著性水平小于 0.05 时,认为结果差异显著。通过分析得出两组 D_{a50} 数据的 P 值为 0.000 4,表明两组数据之间具有显著性差异。为评价两种方法所得捕集效率的一致性,进一步计算了两组捕集效率数据的相对标准偏差,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,有 5 个粒径点的捕集效率的相对标准偏差大于 10%。需要说明的是,为了分析同一粒径点的捕集效率一致性,根据分流法捕集效率曲线,获取了用于对比的 8 个捕集效率值。HJ 93—2013 明确规定,每个粒径点 3 次测得的捕集效率相对标准偏差不大于 10% 时,测试结果方为有效数据^[17]。以此为判定标准,可认为采用两种方法得到的捕集效率相差较大。可见,评价方法的选择对 $PM_{2.5}$ 切割器性能评价结果有直接影响。

表 2 使用两种方法得到的捕集效率相对标准偏差
Table 2 The relative standard deviation of the capture efficiency obtained by the two methods

空气动力学当量直径/ μm	相对标准偏差/%
1.5	1.0
2.0	4.9
2.2	0.2
2.5	14.1
2.8	12.3
3.0	42.9
3.5	83.6
4.0	90.0

2.2 静态箱法与分流法快速切换装置评价结果

2.2.1 $PM_{2.5}$ 旋风式切割器

为了进一步研究造成分流法与静态箱法旋风式切割器评价结果差异的原因,在静态箱法评价装置中增加了分流管,将其改造为分流法评价装置,利用无分流管路的静态箱法装置和加装“Y”形管路的分流法装置分别对两台切割器(切割器 1,进口,型号为 VSCC;切割器 2,国产,型号为

VSCC-100)进行评价,得到的捕集效率曲线如图4所示。可以看出,两条曲线几乎重合,一致性非常好。由表3可见,加装分流管与不加装分流管两种情况的 D_{a50} 偏差均在 $0.02\ \mu\text{m}$ 以内。经过统计学分析,两台切割器的 D_{a50} 评价结果显著性水

平 P 值分别为 0.0601 和 0.1012 ,均大于 0.05 ,表示无显著性差异。由表4可见,两台切割器在加装与不加装分流管情况下的捕集效率相对标准偏差均在 10% 以内,说明是否加装“Y”形管路对切割器评价结果几乎没有影响。

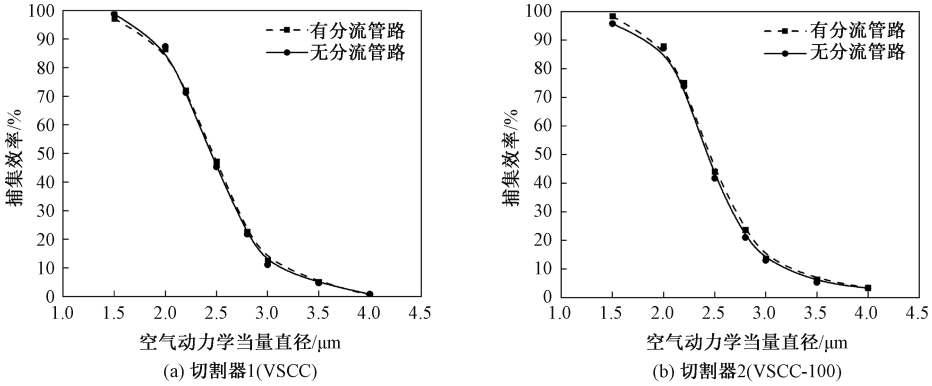


图4 加装分流管路前后的 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器捕集效率曲线对比
 Fig.4 Comparison of $\text{PM}_{2.5}$ cutter capture efficiency curve before and after Y-type shunt line was configured

表3 加装分流管路前后的 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器评价结果
 Table 3 Evaluation results of $\text{PM}_{2.5}$ cutter capture efficiency curve before and after Y-shaped shunt line was configured

型号	性能参数	无分流管路	有分流管路
VSCC	$D_{a50}/\mu\text{m}$	2.38	2.40
	$\sigma_g(D_{a16}/D_{a50})$	1.20	1.21
	$\sigma_g(D_{a50}/D_{a84})$	1.19	1.19
VSCC-100	$D_{a50}/\mu\text{m}$	2.43	2.44
	$\sigma_g(D_{a16}/D_{a50})$	1.19	1.21
	$\sigma_g(D_{a50}/D_{a84})$	1.19	1.19

表4 加装分流管路前后的 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器捕集效率相对标准偏差
 Table 4 The relative standard deviation of the capture efficiency of $\text{PM}_{2.5}$ cutter obtained before and after Y-shaped shunt line was configured

空气动力学当量直径/ μm	VSCC 相对标准偏差/%	VSCC-100 相对标准偏差/%
1.5	1.2	1.9
2.0	0.7	0.6
2.2	0.8	1.0
2.5	2.8	4.0
2.8	2.5	8.5
3.0	8.4	3.7
3.5	5.8	9.5
4.0	9.2	2.1

需要说明的是,影响切割器捕集效率的不确定度因素主要有3个,分别是捕集效率测量的不确定度、捕集效率曲线拟合引入的不确定度和颗粒物粒径引入的不确定度。据此,在进行测定结果评价时,需综合考虑以下几个不确定度分量:捕集效率测量模型引入的不确定度分量、测量重复性引入的不确定度分量、切割器评价装置所发生气溶胶浓度的均匀性及稳定性引入的不确定度分

量、 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器用国家有证单分散颗粒物标准物质引入的不确定度分量和反向非对称S形方程(A Reverse Asymmetric Sigmoid Equation)作为曲线拟合方程引入的不确定度分量。最终,得出 D_{a50} 的扩展不确定度 $U_r = 4.5\%$ ($k = 2$)。本研究在实际比较静态箱法及分流法 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器 D_{a50} 测量结果时,已经考虑了以上不确定度分量引入的影响。

2.2.2 PM_{10} 旋风式切割器

除了研究有无分流管路对 $PM_{2.5}$ 旋风式切割器的影响以外,还对美国 BGI 公司生产的 PM_{10} 旋风式切割器进行了评价,所用单分散聚苯乙烯微球的粒径是用 HJ 93—2013 规定的 $PM_{2.5}$ 切割器评价粒径值除以 2.5 得到的^[12]。利用在有无分流管路两种情况下得出的各粒径点捕集效率值,拟合出捕集效率曲线,结果如图 5 所示。

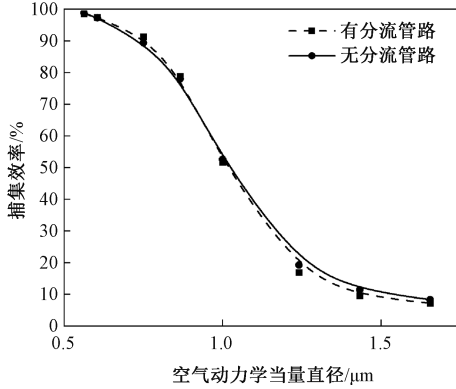


图 5 使用两种方法得到的 PM_{10} 切割器评价结果对比

Fig. 5 Comparison of PM_{10} cutter evaluation results based on two methods

以上测试结果的具体数据如表 5 所示。由图 5 可见,在有无分流管路两种情况下评价得到的 PM_{10} 切割器的 D_{a50} 仅相差 0.01 μm 。经过统计学分析,有无分流管路两种情况下的 D_{a50} 的显著性水平 P 值为 0.4918,大于 0.05,表示无显著性差异。捕集效率相对标准偏差如表 6 所示。由表 6 可见,各粒径点对应的捕集效率相对标准偏差均在 10% 以内。可见,是否加装分流管路对 PM_{10} 切割器评价结果的影响也非常小。

表 5 使用两种方法评价得到的 PM_{10} 切割器性能参数
Table 5 Performance parameters of PM_{10} cutter evaluated by two methods

性能参数	无分流管路	有分流管路
$D_{a50}/\mu m$	1.02	1.01
$\sigma_g(D_{a16}/D_{a50})$	1.29	1.25
$\sigma_g(D_{a50}/D_{a84})$	1.27	1.24

2.3 讨论

静态箱法和分流法都是通过测量气溶胶通过切割器前后的浓度变化,计算得到对应粒径的捕集效率,区别在于进入切割器和参比管路的气溶胶是来源于同一个点(分流法)还是不同点(静态箱法),并由此造成了评价装置设计结构的差异。

表 6 加装分流管路前后的 PM_{10} 切割器捕集效率相对标准偏差

Table 6 The relative standard deviation of the capture efficiency of PM_{10} cutter obtained before and after Y-shaped shunt line was configured

空气动力学当量直径/ μm	相对标准偏差/%
0.56	0.1
0.60	0.1
0.75	1.5
0.87	0.7
1.00	1.2
1.24	9.0
1.40	8.6
1.66	9.4

静态箱法是将气溶胶扩散传输至一个浓度足够均匀、稳定的检测舱中,将被检测的切割器也安装于检测舱中。由于此时的气溶胶运动速度很小(一般 $<0.1 m/s$),接近静止状态,所以称之为静态箱法。该方法的优点:(1)切割器和参比管路均安装在检测舱内,以开放的方式对气溶胶进行采集,适用于对各种口径切割器的检测;(2)采样口附近的气体流速很低,与实际使用环境类似。该方法的缺点:(1)对切割器和参比管路两个点位的颗粒物浓度的均匀性要求高,否则会引入大的偏差;(2)进入切割器的粒子只占总体的一小部分,浪费较多,检测成本较高。

分流法是将气溶胶扩散传输后,通过切换分流使其先后通入切割器和参比管路。该方法的优点:(1)进入参比管路和切割器的颗粒物的来源的一致性较好,避免了静态箱中不同位置的气溶胶浓度不均匀引入的差异;(2)产生的气溶胶基本都从切割器通过,利用率接近 100%,检测成本相对较低。该方法的缺点:(1)所安装的切割器需要通过特定接口才能与装置管路匹配,接口处理不好容易造成颗粒堵塞,不方便用于测量不同尺寸、不同流量的切割器,特别是 PM_{10} 切割器等开口比较大的切割器;(2)现有设计方案中多存在 90° 拐角,不利于气溶胶的传输;(3)气溶胶在经过分流后,以先后顺序分别进入切割器和参比管路,所以该方法对气溶胶浓度的稳定性要求较高;(4)管路中的气溶胶在进入切割器之前具有一定的速度,且管路越细运动速度越快,这与实际的环境空气采样存在差异。

目前,不同检测机构搭建的切割器检测装置在结构上有所不同,容易导致评价结果存在差异,但这并未引起关注。例如,分流法中的管路粗细的不同,管路与切割器接头形状和尺寸的不同等。

HJ 93—2013 虽然规定通过气溶胶粒径谱仪来检测切割前后的气溶胶浓度变化,但未明确规定是采用光散射法粒径谱仪还是空气动力学法粒径谱仪进行检测,而这两种仪器对同一气溶胶的检测结果可能存在差异。

由于切割器评价装置还不是很成熟,很多检测机构使用的装置为定制设备,而不同厂家的设计思路不同,特别是在一些细节上,容易造成检测结果出现差异。本研究通过设计可实现静态箱法与分流法快速切换的“Y”形管路,验证了如果只是采样点位的差异,并不会引起评价结果的显著差异,即两种方法评价结果的差异可能是由管路、接口等细节的差异引起的。

3 结论

为了分析分流法与静态箱法在旋风式切割器评价中的差异,本研究一方面对比了独立的静态箱法和分流法评价装置对同一台旋风式切割器的评价结果,发现两方法所得 D_{a50} 差异明显;另一方面,在静态箱法评价装置中增加了“Y”形分流管,实现了静态箱法与分流法的简易快速转换,并分别对进口、国产 $PM_{2.5}$ 切割器和 PM_1 切割器进行了评价,发现两种方法评价结果基本一致。以上研究表明,在管路设计、接口尺寸、粒径谱仪原理等因素一致的情况下,静态箱法和分流法对同一切割器的评价结果是一致的。目前,国内不同机构检测装置的检测结果存在差异,可能是由管路设计、接口尺寸、粒径谱仪原理等易被忽略的细节的差异引起的,这需要引起高度重视。

参考文献 (References):

[1] 王健颖,唐晓,陈科艺,等.武汉市冬季重污染过程中 $PM_{2.5}$ 组分特征与区域来源解析[J]. 中国环境监测,2024,40(3):47-59.
WANG Jianying, TANG Xiao, CHEN Keyi, et al. Analysis of $PM_{2.5}$ Components and Regional Sources During a Heavy Winter Air Pollution Process in Wuhan [J]. Environmental Monitoring in China, 2024,40(3):47-59.

[2] 孙凤霞,先兆娟,韦丽,等.南京市大气 $PM_{2.5}$ 污染控制对循环系统疾病的健康收益评估[J]. 现代预防医学,2023,50(11):1 970-1 974,2 002.
SUN Fengxia, XIAN Zhaojuan, WEI Li, et al. Evaluation of Health Benefits of Atmospheric $PM_{2.5}$

Pollution Control on Circulatory System Diseases in Nanjing[J]. Modern Preventive Medicine, 2023, 50(11):1 970-1974,2 002.

[3] 方博,钱耐思,陈蕾,等.2013—2017年上海市 $PM_{2.5}$ 短期暴露对人群呼吸系统疾病超额死亡的风险评估[J]. 疾病监测,2022,37(8):1 112-1 117.
FANG Bo, QIAN Naisi, CHEN Lei, et al. Assessing Excess Respiratory Disease Mortality Related to Short-Term Exposure to $PM_{2.5}$ in Shanghai, 2013-2017[J]. Disease Surveillance, 2022,37(8):1 112-1 117.

[4] 李媛,徐艺斐,袁明浩,等.基于高空间分辨网格的郑州市城镇居民 $PM_{2.5}$ 暴露浓度与健康风险变化评估[J]. 环境科学,2023,44(4):1 911-1 923.
LI Yuan, XU Yifei, YUAN Minghao, et al. Evaluation of Changes in $PM_{2.5}$ Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids[J]. Environmental Science, 2023,44(4):1 911-1 923.

[5] WU D, ZHANG G C, LIU J Q, et al. Influence of Particle Properties and Environmental Factors on the Performance of Typical Particle Monitors and Low-Cost Particle Sensors in the Market of China[J]. Atmospheric Environment, 2022,268:118825.

[6] 袁扬,柳靖,张正正,等.基于一种光散射仪器室内细颗粒物监测结果准确性及影响因素的探究[J]. 建筑科学,2023,39(6):130-135.
YUAN Yang, LIU Jing, ZHANG Zhengzheng, et al. Study on the Accuracy of Indoor Fine Particulate Matter Monitoring Results Based on a Light Scattering Instrument and Its Influencing Factors [J]. Building Science, 2023,39(6):130-135.

[7] 王瑜,吕怡兵,王万里,等. $PM_{2.5}$ 质量浓度分析仪现场校准方法研究[J]. 中国环境监测,2025,41(1):152-160.
WANG Yu, LYU Yibing, WANG Wanli, et al. Study on Field Calibration Method for $PM_{2.5}$ Mass Concentration Analyzer[J]. Environmental Monitoring in China, 2025,41(1):152-160.

[8] 师耀龙,王瑜,魏连涛,等. PM_1 与 $PM_{2.5}$ 切割器性能与测试系统研究[J]. 中国环境监测,2022,38(6):221-227.
SHI Yaolong, WANG Yu, WEI Liantao, et al. Research on the Performance of PM_1 and $PM_{2.5}$ Selectors and Its Test System [J]. Environmental Monitoring in China, 2022,38(6):221-227.

[9] 陈仲辉,张文阁,黄星亮,等. $PM_{2.5}$ 切割器切割特

- 性研究[J]. 中国计量, 2014(8):82-85.
- CHEN Zhonghui, ZHANG Wenge, HUANG Xingliang, et al. Study on Cutting Characteristics of $PM_{2.5}$ Cutter[J]. China Metrology, 2014(8):82-85.
- [10] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. 基于静态箱法的 $PM_{2.5}$ 切割器捕集效率评价及拟合曲线优化研究[J]. 计量学报, 2021, 42(10):1 398-1 403.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Study on Efficiency Evaluation and Curve Fitting Optimization of $PM_{2.5}$ Particle Separation Device Based on Static Chamber Method [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(10):1 398-1 403.
- [11] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. PM_{10} 切割器捕集效率评价装置及方法研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(6):2 340-2 346.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Research on the Efficiency Evaluation Device and Method of PM_{10} Cutter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(6):2 340-2 346.
- [12] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. PM_1 切割器的评价及其与 $PM_{2.5}$ 切割器的切换研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12):5 093-5 097.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Evaluation of PM_1 Cutters and Switching Between $PM_{2.5}$ Cutters [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12):5 093-5 097.
- [13] 刘佳琪, 张国城, 赵晓宁, 等. 进气流量对 $PM_{2.5}$ 切割器捕集效率的影响[J]. 计量学报, 2021, 42(4):532-536.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, ZHAO Xiaoning, et al. The Influence of Air Inlet Flow Rate on the Capture Efficiency of $PM_{2.5}$ Cutter [J]. Acta Metrologica Sinica, 2021, 42(4):532-536.
- [14] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. 不同种类颗粒物对切割器性能评价的影响研究[J]. 中国测试, 2022, 48(1):27-31.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Research on the Influence of Different Kinds of Particulate Matter on the Performance Evaluation Results of Cutter [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1):27-31.
- [15] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. 几种常见非国标法颗粒物切割器性能评价及问题分析[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11):4 489-4 493.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Performance Evaluation and Problem Analysis of Several Common Non-national Standard Particulate Matter Cutters [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11):4 489-4 493.
- [16] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. 安德森六级撞击采样器采集效率评价方法研究[J]. 计量学报, 2022, 43(6):826-830.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Study on Evaluation Method of Acquisition Efficiency of Anderson Six-Stage Impact Sampler [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(6):826-830.
- [17] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. 基于空气动力学的浮游菌采样器采集物理效率检测方法的研究[J]. 计量学报, 2022, 43(9):1 216-1 219.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Study on the Detection Method of Sampling Physical Efficiency of Planktonic Sampler Based on Aerodynamics [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(9):1 216-1 219.
- [18] 刘佳琪, 张国城, 吴丹, 等. 气旋式生物气溶胶采样器采集物理效率评价方法研究[J]. 计量学报, 2022, 43(10):1 378-1 381.
- LIU Jiaqi, ZHANG Guocheng, WU Dan, et al. Study on Evaluation Method of Physical Efficiency of Cyclone Microbiological Sampler [J]. Acta Metrologica Sinica, 2022, 43(10):1 378-1 381.
- [19] 北京市市场监督管理局. PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器校准规范:JJF(京) 78—2021[S]. 2021-04-02.
- [20] 环境保护部. 环境空气颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)采样器技术要求及检测方法:HJ 93—2013[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2013.