

# 新型空气净化器及其评价方法

路丽<sup>1,2</sup>, 贺军辉<sup>2</sup>, 田华<sup>2</sup>, 何溥<sup>2</sup>, 杨巧文<sup>1</sup>

1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

2. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190

**摘要** 随着雾霾天气日益频繁,室内空气质量备受关注,传统的室内空气净化器已不能满足室内空气净化化的要求,研发新型多功能空气净化器及复合空气净化技术已成为净化器发展的主要方向。本文总结近年来国内外对室内空气净化器的相关研究,综述当前应用最广泛的几种新型室内空气净化器(包括新型吸附材料、低温等离子体、光催化、催化氧化、复合式空气净化器)的研发进展,分析各净化器的优势与不足,总结新型空气净化器的主要评价指标及评价方法,分析其气体污染物、固体颗粒物、微生物污染物进行单一评价的方法,并展望室内空气净化器的研发方向。

**关键词** 新型空气净化器;评价指标;检测方法

**中图分类号** X131

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.12.017

## Novel air cleaners and their evaluation methods

LU Li<sup>1,2</sup>, HE Junhui<sup>2</sup>, TIAN Hua<sup>2</sup>, HE Pu<sup>2</sup>, YANG Qiaowen<sup>1</sup>

1. School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** More and more frequent haze days increase the concern over indoor air quality. Traditional indoor air cleaners no longer satisfy the requirements of indoor air purification. Thus, development of novel multifunctional air cleaners and comprehensive air purification technologies become a major research direction toward improving indoor air quality and meeting new needs of current market. By summarizing recent researches on indoor air cleaners of both at home and abroad, herein we review several novel indoor air cleaners, including new adsorption materials, non-thermal plasma, photocatalytic, catalytic oxidation and multifunctional air cleaners, and analyze their advantages and disadvantages. The main evaluation indexes and methods of novel air cleaners are also summarized, including the evaluation methods for gas pollutants, solid particles and microbial contaminants. An outlook is also made toward the future research directions of indoor air cleaners.

**Keywords** novel air cleaner; evaluation indexes; test methods

空气污染已成为影响人类健康的最大危害之一<sup>[1]</sup>。室内污染要比室外高25%~60%,人的一生中大约有80%~90%的时间在室内度过。因此,室内空气质量直接影响人们的身体健康。为了改善室内空气质量,室内空气净化技术已经在世界范围内得到广泛应用<sup>[2,3]</sup>。目前室内空气净化化的方法主要包括通风净化、植物净化和室内空气净化器净化3种方式。通风净化增加了室内空调系统的能耗,甚至可能导致室内污染物质量浓度增加,降低室内空气品质<sup>[4]</sup>。而植物净化只对特定的污染物起作用,且吸收能力有限,不能有效去除室内

挥发性有机物(VOCs)<sup>[5]</sup>。实践验证,室内空气净化器是改善室内空气质量行之有效的方法。室内空气净化器能够有效去除室内颗粒物、微生物和VOCs,杀菌消毒及释放负氧离子,从而改善和提高室内空气品质<sup>[6]</sup>。随着人们对室内空气污染的重视,室内空气质量控制指标、室内空气净化器评价方法及评价标准的建立,对室内空气污染的有效防治与空气净化器的研究起着重要作用<sup>[7]</sup>。本文介绍近年来几种新型空气净化器的工作原理及优缺点,阐述空气净化器的评价指标和评价方法的发展历程,讨论其优势与不足,并在此基础上

收稿日期:2015-03-04;修回日期:2015-04-23

基金项目:国家自然科学基金项目(21271177,21007076)

作者简介:路丽,硕士研究生,研究方向为环境催化材料的合成及其应用,电子信箱:llsyf114@163.com;贺军辉(通信作者,共同第一作者),研究员,研究方向为功能纳米材料和器件,电子信箱:jhhe@mail.ipc.ac.cn

引用格式:路丽,贺军辉,田华,等.新型空气净化器及其评价方法[J].科技导报,2015,33(12):101-109.

展望空气净化器及其评价系统的发展前景。

## 1 新型空气净化器

近年来,随着室内空气净化技术快速发展,室内空气净化材料不断更新,涌现出许多新型室内空气净化器。目前,市场上应用最广泛的室内空气净化器主要有新型吸附材料、低温等离子体、光催化、催化氧化和复合式空气净化器<sup>[8]</sup>。

### 1.1 新型吸附材料空气净化器

吸附式净化器是一种成熟的技术装置,也是目前净化性能较高的设备之一。传统吸附式净化器使用活性炭、沸石、活性氧化铝、分子筛和硅胶等吸附剂。近年研制出各种新型活性炭,如蜂窝状活性炭、球状活性炭、活性炭纤维等<sup>[9]</sup>。另外,由于介孔材料具有高度有序的介孔孔道,比表面积高,稳定性好,被认为是 VOCs 优异的吸附材料。目前介孔气体吸附剂已在 CO<sub>2</sub> 分离和 VOCs 富集方面展示出广阔应用前景<sup>[10]</sup>。

Jo 等<sup>[11]</sup>研究了纤维活性炭(FAC)作为室内空气净化器 VOCs 过滤材料的可行性,在模拟的室内条件下,测试了 FAC 对苯、甲苯、乙苯、二甲苯(4种化合物缩写为 BTEX)的吸附性能和再生性能(图 1)。

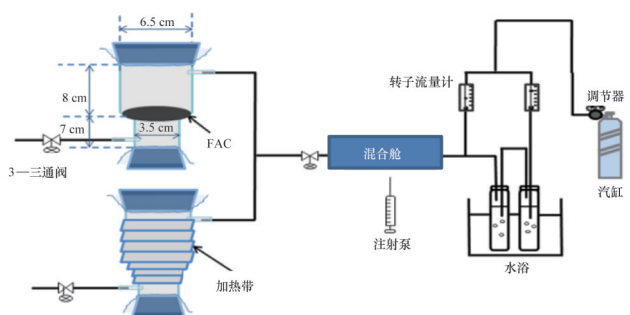


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

研究发现,当 FAC 作为过滤材料时,FAC 对 BTEX 的吸附性能取决于气体入口流速、室内相对湿度和室内初始质量浓度。苯、甲苯的吸附性能随着气体入口流速增加而降低,而

随着室内初始质量浓度增加而增加;BTEX 的吸附性能却随着相对湿度增加而降低。因此,FAC 在最佳操作条件和再生条件下对 BTEX 具有很好的吸附性能和再生性能。

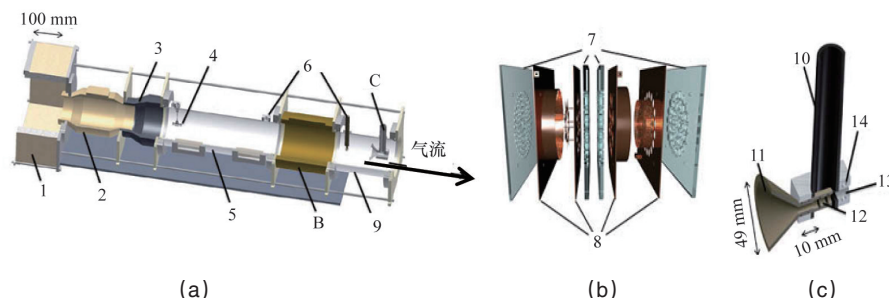
为拓展更多的新型吸附材料,研究者们尝试用沸石作为净化材料。Shen 等<sup>[12]</sup>开发了一种以镀银沸石(AgZ)作为过滤材料的室内空气净化器,并测试了其对于室内生物气溶胶(细菌和真菌)的去除性能。研究发现,以 150 g AgZ 为过滤材料,在呼吸病房运行 24 h 后,该净化器可去除细菌和真菌数量为 900~1088 cfu/g(每克空气含有的细菌菌落总数);持续运行 120 h 后,可去除细菌和真菌数量为 2700~3100 cfu/g,显示出优异的除菌性能。

吸附式净化器具有前期成本低、净化速率快、使用范围广、能够同时净化多种空气污染物等优点,是目前市场上应用较为广泛的装置。但是这种净化器也存在很多问题,如吸附阻力较大、易吸附饱和、使用寿命有限、需定期再生或更换材料。吸附剂的使用寿命是影响吸附式空气净化器净化性能的重要因素。因此,研究和开发新型高使用寿命的吸附材料成为一个迫切而重要的研究课题。

### 1.2 低温等离子体(NTP)空气净化器

NTP 技术是一种新兴的气体净化技术。目前,NTP 以高效、节能、覆盖面广等优势成为空气净化市场新焦点,NTP 对苯、甲苯和甲醛的净化效率可达 90% 以上<sup>[13]</sup>。NTP 净化器是在外加电场作用下,脉冲电晕放电产生大量高能电子和离子轰击污染物分子,使其电离、解离和激发,通过发生一系列复杂物化反应,最终降解为对人体无危害的 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等产物,达到 VOCs 无害化处理效果。同时,NTP 灭菌法是一种高效的低温灭菌技术<sup>[14]</sup>,该技术的应用可克服传统高温消毒方法耗时长、成本高等缺点,因此也适合在医疗部门推广使用。

Schmid 等<sup>[15]</sup>研究了 NTP 净化器在室内空气条件(297.5 K、水分 12.5 g/m<sup>3</sup>)下去除 VOCs 的机理及性能。该净化器(图 2)在标准空气流速下,分别对环己烯、苯、甲苯、乙苯和二甲苯的同分异构体进行测试,发现 NTP 净化器能有效降解上述有机化合物,降解过程中,O<sub>3</sub> 和 -OH 起决定性作用。但该净化器运行过程中会产生醇类、醛类、酮类等有害副产物。



1—高效微粒空气过滤器;2—风扇;3—聚氯乙烯(PVC)接口;4—雾化器;5—带有 2 个树脂玻璃窗孔的 400 mm PVC 管;  
6—空速测量孔;7—200 mm PVC 管;8—铜板;9—树脂玻璃隔圈;10—PVC 固定器;  
11—外径 52.5 mm、内径 49 mm 聚四氟乙烯(PTFE)漏斗;12—O 型环密封圈;13—内径 6 mm PTFE 管子;14—铝块

图 2 空气净化系统示意(a)、NTP 空气净化器部件分解图(b)和采样系统示意(c)

Fig. 2 Schematics of the air purifying system setup (a), exploded view of the plasma air purifier (Askokoro, Switzerland) (b) and schematic of the sampling system (c)



也已经在2008年北京奥运工程上得到应用。

Yu等<sup>[34]</sup>对氧化锰及氧化锰负载金属纳米粒子催化氧化甲醛开展了系列研究,如将铂和金的合金纳米粒子负载在鸟巢状氧化锰上,制备出了Au<sub>1-x</sub>Pt<sub>x</sub>/MnO<sub>2</sub>催化剂。考察了双金属纳米粒子原子比和尺寸对催化降解甲醛性能的影响。研究发现,负载Au/Pt合金纳米粒子的鸟巢状氧化锰比负载Au纳米粒子/Pt纳米粒子混合物的鸟巢状氧化锰催化效果更佳,其中Au<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub>/MnO<sub>2</sub>催化氧化甲醛效果最佳,在40℃时即可将甲醛完全降解。在此基础上,将Au<sub>0.5</sub>Pt<sub>0.5</sub>/MnO<sub>2</sub>应用于空气净化器上,在室温条件下对甲醛具有较好的净化性能。

Wang等<sup>[35]</sup>将Pt/TiO<sub>2</sub>纳米催化剂负载在Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>上,制得了Pt/TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂,实验发现,在室温条件下,此催化剂对甲醛具有良好的催化降解性能。为符合净化产品的工艺要求,Kameyama和Sakurai课题组研制出4种不同结构的实用型Pt/TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化剂(网状、片状、翅状、锯齿状)(图5),研究表明,结构化的Pt/TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>催化材料对降解甲醛具有优异催化活性,该类催化材料已产业化,成功运用于净化产品中。

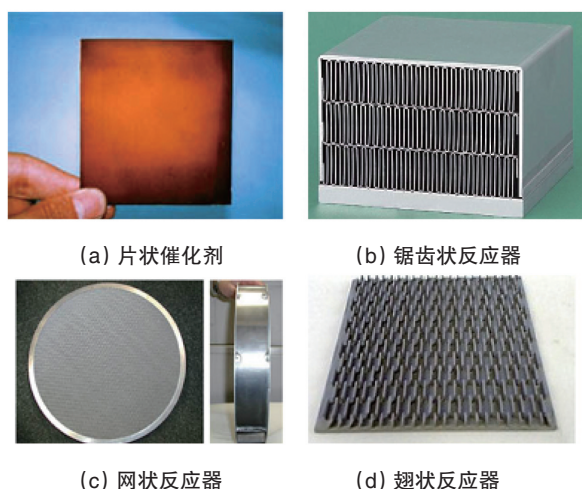


图5 结构化催化剂

Fig. 5 Structured catalysts

催化氧化空气净化器虽有高效、环保、无二次污染物等优点,但是仍然存在许多问题,如催化剂的成本高、稳定性差等。另外,纳米催化剂的制备方法、催化性能、机理等问题还需要深入研究。

### 1.5 复合式空气净化器

由于室内环境比较复杂,VOCs的质量浓度或组分会有很大差异,采用单一的净化技术很难处理室内空气中所有污染物。针对不同质量浓度或组分的有害物质,采用多种复合技术进行梯次去除才有可能实现VOCs的完全脱除。因此,为了使空气得到全面的净化,集合多种净化技术的复合式空气净化装置成为重要的研究方向。复合技术通常包括两种或两种以上的技术来去除VOCs,如等离子体与光催化结合,催化氧化与吸附结合以及等离子体与催化氧化结合等,利用各净化技术之间的耦合作用来提高VOCs的去除效果。

NTP与光催化联用技术为空气净化器的发展提供了一个新的研究方向<sup>[36]</sup>。这种复合式空气净化器的优点是,一方面NTP产生的臭氧对TiO<sub>2</sub>光催化有益,而且也可降解TiO<sub>2</sub>光催化的中间产物;另一方面TiO<sub>2</sub>光催化也可将NTP副产物转化为自由基或进一步氧化降解,使NTP技术得到优化<sup>[37,38]</sup>。

Maciuca等<sup>[39]</sup>研究了等离子体-光催化空气净化装置对空气中低质量浓度异戊醛的去除性能。与单一存在的等离子体或光催化技术相比,等离子体和光催化联用技术对异戊醛的降解效率显著增加,有利于异戊醛完全矿化。Ochiai等<sup>[40]</sup>自制了新型等离子体-光催化(PACT-TMiP)空气净化器,并考察了其对香烟烟雾中有机污染物的净化能力。结果表明,PACT-TMiP反应器(图6)降解醋酸的一级动力学速率常数是PACT反应器的5倍。其原因在于TMiP表面与气体之间的相关性增加了PACT反应器的净化性能。由此可以看出,等离子体与光催化技术之间具有明显的协同作用,这种协同作用可以显著提高空气净化器的净化效率。

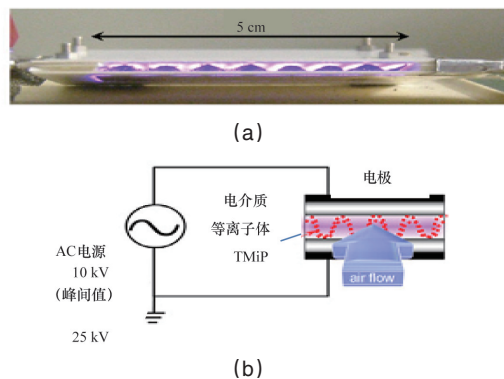


图6 PACT-TMiP协同反应器原理示意(a)、结构示意(b)

Fig. 6 A photograph (a) and schematic illustration (b) of the PACT-TMiP synergistic reactor

另外,催化氧化与吸附技术之间的复合也可以显著增强净化器的净化性能。Raso等<sup>[41]</sup>研发了在高比表面积的沸石上负载CeO<sub>2</sub>作催化剂的空气过滤器,并测试其对二乙基醚、三乙胺、单松烯、己酸的净化性能。研究表明,粒径约为50~100 nm的CeO<sub>2</sub>颗粒与沸石的结合明显降低了空气过滤器的能耗,提高了净化效率。其原因在于沸石作为一种强吸附剂,可以将VOCs快速地吸附到CeO<sub>2</sub>上,大大缩短VOCs扩散到催化剂表面的时间,并使CeO<sub>2</sub>表面VOCs质量浓度增大,提高反应速率,从而强化净化效果。

鉴于现有空气净化技术的优缺点,采用复合净化材料和集合多种净化技术的空气净化器是室内空气净化装置未来的发展方向。然而,多种净化技术复合也可能聚集各自的缺点,因此在选择不同技术时必须充分考虑各技术的特点,进行有针对性的选择。Sekine等<sup>[42]</sup>研究了一种驻极体模块、活性炭负载光触媒模块、活性二氧化锰模块复合空气净化器。驻极体除尘可消除空气中细颗粒物,同时减少光触媒堵

塞机率,延长光触媒使用寿命。活性炭负载光触媒两者结合,增加了净化效率和使用寿命。活性二氧化锰利用其强氧化性将从活性炭模块逃逸出的甲醛降解成无害物质。孙丽等<sup>[43]</sup>研发出一种集净化、消毒技术于一体的空气净化器,较好实现了高压静电场除尘杀菌、活性炭纤维吸附和光催化技术的集成。研究发现,在模拟舱内,固体污染物的净化效率为87%;15 min后二甲苯的质量浓度即可达标,净化效率为47%;30 min后微生物的净化率可达到99.1%;4 h后甲醛的净化效率可达到93%。结果表明,该复合式空气净化器净化消毒治理效果较好,既综合了各净化技术的优点,又互相弥补了缺点,对目前室内空气污染治理展现出重要的现实意义。

## 2 新型空气净化器的评价

为了规范室内空气净化产品市场,建立合理的净化器评价指标体系非常重要,有必要建立一套综合的室内空气质量净化效果评价标准。为此,以下对新型空气净化器的主要评价指标和评价方法进行归纳,以便对新型空气净化器进行全面评价。

### 2.1 新型空气净化器的主要评价指标

随着室内空气净化器的不断发展,空气净化器的主要评价指标也随之提高和完善。按照出现的先后,评价指标分为洁净空气量(clean air delivery rate, CADR)、有效净化效率、去除率和净化效能。

2002年,中国参照美国空气净化器标准(AHAMAC-1-2000)提出了CADR评价指标,其定义是指单位时间提供洁净空气的体积量。可用空气污染物总衰减常数与自然衰减常数之差与试验室容积的乘积来表示:

$$CADR = V(k_c - k_n)$$

式中,CADR为净空气量, $m^3/min$ ;V为试验室容积, $m^3$ ;  $k_c$ 为总衰减常数, $min^{-1}$ ;  $k_n$ 为自然衰减常数, $min^{-1}$ 。

CADR直接反映了空气净化器去除空气中一种或多种污染物的净化能力,是一项能够反映净化器净化能力的性能指标,也是评价室内空气净化器的核心指标,适用于现有的各种空气净化技术的净化器,据此可以判断不同空气净化器性能的优劣,但CADR并不能全面评价一台空气净化器的优劣<sup>[44]</sup>。

2002年,《GB/T 18801—2002空气净化器》<sup>[45]</sup>提出了有效净化效率这一评价指标。其含义是空气净化器去除某一种空气污染物的洁净空气量与空气净化器额定风量的比值。但是,空气净化器在额定风量下运行时的净化效率,不仅取决于过滤材料去除污染物的效果,还取决于净化器结构等因素。

2006年,中国参照日本工业标准(JIC 9615)提出了去除率这一评价指标<sup>[46]</sup>。去除率反映了空气净化器在一定密闭空间内去除污染物的实际效果,表示空气净化器连续运行一段时间后,室内空气中某污染物被去除的相对量。但由于没有考虑净化器实际使用时的气流组织形式,去除率并不能准确反映净化器的净化能力。

随后,中国于2008年提出了净化效能的评价指标。净化

效能即空气净化器单位功耗产生的洁净空气量。该指标是侧重于经济指标的单一指数,在考核污染物净化能力的基础上,结合了能耗考核的要求,体现了环保与节能的统一。

另外,很多国家制订了室内空气质量(IAQ)标准,但现有的IAQ标准多数以污染物质量浓度来衡量室内空气质量,质量浓度代表的意义不易理解,大众无法直观了解其对人体健康的影响。王超等<sup>[47]</sup>提出并建立了一种应用于评价室内空气VOCs污染的健康指数体系,以反映室内VOCs污染水平,并直观展示对人体健康的影响。通过此体系,居住者可以直观了解自己身处的室内环境的空气品质,并且对于实际工程中改善IAQ相关技术有一定指导意义。

### 2.2 新型空气净化器的评价方法

室内空气净化器净化的对象主要包括异味、气体污染物、固体颗粒物、细菌、病毒等。由于空气净化器实际运用的局限性和复杂性,目前对净化器尚无系统的评价方法。国内外现有的室内空气净化器的评价系统大致由采样系统、试验舱系统及检测系统组成。目前室内空气净化器净化性能的评价方法主要是单一的评价方法,即对气体污染物、固体颗粒物和微生物污染物分别进行单一评价。所以下面针对3种主要的室内污染物,综述目前流行的评价方法。

#### 2.2.1 气体污染物净化效果的评价方法

目前,中国气体污染物净化效果的评价方法大多参照现行空气净化器标准《GB/T 18801—2008空气净化器》<sup>[48]</sup>进行评价。测试方法是选用初始质量浓度较高的甲醛、苯、氨、总挥发性有机化合物(TVOCs)为目标污染物,在30  $m^3$ 试验舱中进行CADR密闭衰减试验。具体步骤是,采用2个可以控制温度、湿度的密闭试验舱,放入等量的气体污染源,以其中一个作为样品舱,另一个作为对比舱,在舱内气体污染物均匀后,测定2个舱内污染物初始质量浓度。将空气净化器放入样品舱中,经过一段时间后,分别测定样品舱和对比舱内的污染物质量浓度,分别计算气体污染物的 $k_c$ 和 $k_n$ ,最后以CADR进行评价。

针对国家空气净化器标准,虽然采用CADR评价法具有试验设备少、操作简单、测试时间短等优点。但此方法要求的气体污染物初始质量浓度很高,高质量浓度气态污染物会使反应型空气净化器不能正常运转,无法正确反映实际应用中的效果。并且测试中规定的污染物种类并不全面,不能代表室内空气污染普遍情况。检测结果中也未涉及净化器适用面积、臭氧排放浓度和副产物检测等问题,不利于评判空气净化器在实际环境的净化性能。因此,CADR评价法不能客观反映空气净化器的净化能力。为更好地评价空气净化器气体净化性能,国内外众多学者提出了不同的评价方法。

Howard-Reed等<sup>[49,50]</sup>提出了一个弥补CADR法缺陷的评价方法。试验分别采用了85和340  $m^3$ 的大型试验舱,试验舱环境与实际环境相似,并且配有多个气相色谱仪对VOCs质量浓度进行半连续检测。该试验利用质量平衡理论,预测了室内空气净化器在实际环境条件下的净化效果。结果表明,

该方法综合考虑实际环境中空气净化器的安装位置、气体污染源位置和隔离区域质量浓度对气体净化性能的影响,更好地反映空气净化器实际净化效果。另外,此方法相对减少了检测时间。若采用此评价方法,应用于6.3 m<sup>3</sup>试验舱的测量时间仅需要30~90 min。但是,此方法所制备的试验舱体积较大,成本较高,需进一步改善。

臭氧会导致许多健康问题,而室内空气净化器是臭氧的来源之一。Yu等<sup>[51]</sup>利用臭氧吸附、解吸和沉积速率常数,研究了6台室内空气净化器臭氧发生率与气体污染物净化效果的关系。结果表明,空气净化器臭氧发生率波动不定,大致会随着净化器使用寿命的增加而增加,不会影响气体污染物净化性能。该评价方法考虑了净化器臭氧排放质量浓度与使用寿命、气体净化效果的关系,为净化器评价系统提供了有价值的信息。然而,试验未明确给出净化器使用寿命影响臭氧排放的机理。因此,室内空气净化器臭氧排放问题仍需进一步深入研究。

目前,国内外净化器标准中在气体净化效果检测方法上有一定的技术局限性,不能实时监控不同净化器气体去除效率。为了克服此缺点, Kim等<sup>[52]</sup>提出了一种实时检测气体净化效果的CADR评价方法。该实验在4 m<sup>3</sup>的试验舱中进行(图7),利用傅里叶变换红外光谱仪对气体污染物进行实时监控,同时大大缩短了单程测试时间,该单程测试时间小于日本和韩国标准测试时间(30 min)。此评价方法可以快速有效评价室内空气净化器的气体净化性能,有助于空气净化器检测方法的改进。

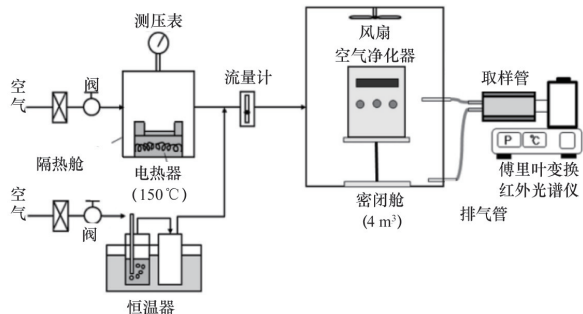
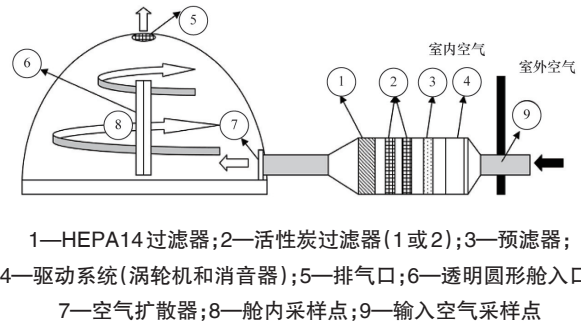


图7 在新方法下测试空气净化器性能装置

Fig. 7 Experimental set up for air cleaner performance tests under new and current test methods

Gallego等<sup>[53]</sup>从改善采样系统和试验舱系统提出气体污染物净化效果的评价方法。该实验气体污染物来源于一个真实的空气样本,试验舱采用聚氯乙烯材质,设计成可压缩的透明圆形舱(图8)。此评价方法综合考虑了实际环境中温度、相对湿度及污染程度对净化器净化性能的影响,检测了吸附式空气净化器的理论饱和时间,为评价吸附式空气净化器使用寿命这一指标提供了依据。同时也为空气净化器标准中采样系统、试验舱系统的改进提供了可参考方向。

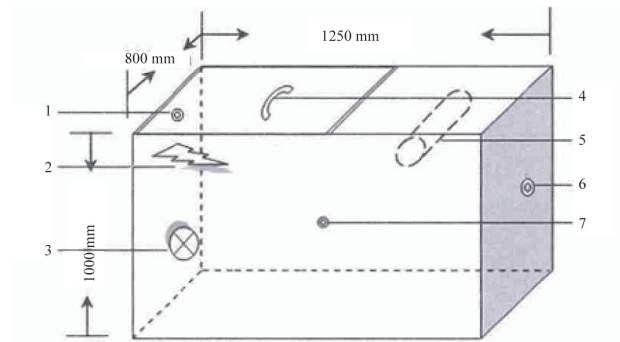


1—HEPA14过滤器;2—活性炭过滤器(1或2);3—预过滤器;  
4—驱动系统(涡轮机和消音器);5—排气口;6—透明圆形舱入口;  
7—空气扩散器;8—舱内采样点;9—输入空气采样点

图8 便携式充气透明圆形舱设计图

Fig. 8 Portable inflatable bubble design

黄芳等<sup>[54]</sup>建立一种全新的室内空气污染物净化效果的评价方法,从整体上改进了净化器评价方法。该试验自行设计的1 m<sup>3</sup>试验舱(图9),内有加热、对流、光照等辅助装置,操作简便,适用于甲醛、甲苯、氨、甲硫醇和TVOCs等不同指标的检测。试验中采用加热气化方式使污染物瞬间汽化,比自然挥发法操作简单稳定;采用高效液相色谱法测定甲醛,避免了原有分光光度法测定引起的干扰;采用气相色谱-质谱法测定甲苯、甲硫醇和TVOCs,比国家标准方法中分别测定结果更为准确。此评价方法已用于空气净化产品净化气体污染物的评价,数据可靠,且适用范围广。



1—注射孔;2—加热板;3—风扇;4—手柄;5—日光灯;6,7—采样孔

图9 试验舱示意

Fig. 9 Diagram of testing chamber

## 2.2.2 固体颗粒物净化效果的评价方法

中国现行空气净化器标准中规定,固体颗粒物净化效果的评价方法采用与气体污染物相同的CADR法,评价方法中以标准香烟烟雾作为固体污染物的尘源,采用0.3 μm以上颗粒物总数判定固体污染物的净化效果,并用激光尘埃粒子计数器进行检测。

PM<sub>2.5</sub>污染问题已成为目前社会关注的焦点,也是室内颗粒物污染主要来源之一。由此看来,标准中规定的只对0.3 μm以上颗粒物总数进行评价是个重大的技术不足。根据中国目前的室内空气污染情况,将PM<sub>2.5</sub>去除率作为空气净化器性能评价的重要指标是十分必要的<sup>[55]</sup>。另外,进一步研究空

气净化器使用寿命的测试方法,全面地评价空气净化器的固体颗粒物净化性能都是亟待解决的问题。

Grinshpun 等<sup>[56]</sup>考察了离子空气净化器(ionic air purifiers)对 0.3~3 μm 气溶胶颗粒的去除性能。该试验在 2.6 m<sup>3</sup> 的试验舱(图 10)中进行,并对呼吸区域中的气溶胶颗粒体积浓度进行实时检测。结果表明,离子空气净化器可以显著减少 0.3~3 μm 气溶胶颗粒体积浓度,气溶胶颗粒大小及性质是影响离子空气净化器净化性能的主要因素。该评价方法为离子空气净化器去除 PM<sub>2.5</sub> 的净化性能提供了一定的评价依据。但是,此方法只限于评价离子空气净化器固体颗粒物净化性能,对于不同类型净化器的评价,需要进一步研究。

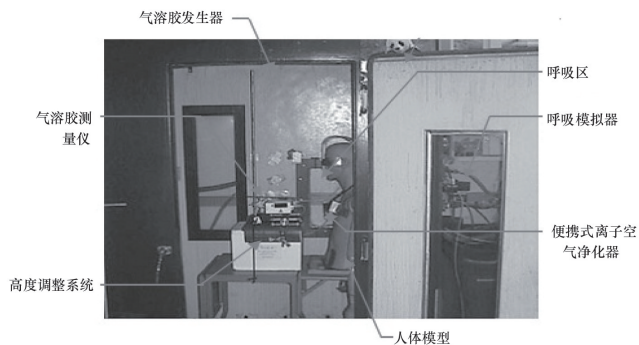


图 10 离子空气净化器性能检测装置

Fig. 10 Experimental set up for testing the efficiency of ionic air purifiers

Suitan 等<sup>[57]</sup>研究了不同空气净化器对超细颗粒(UFP)的去除性能。实验采用六喷嘴喷雾器和扫描移动粒度仪分别对 UFP 进行产生和检测,并对每个净化器的成本/性能指数(资金和操作费用/CADR)进行性能评价。研究表明,HEPA 和驻极体静电除尘式净化器对 UFP 去除效率最高。该评价方法可很好地评价不同室内空气净化器的 UFP 净化性能,且成本/性能这一评价指数也为改善净化器评价指标提供了借鉴。

为发展科学、快速的空气净化器寿命测试方法,李睦等<sup>[58]</sup>提出了一种小型试验舱快速老化试验去除颗粒物的 CADR 衰减测试方法。首先根据中国现行空气净化器标准在 30 m<sup>3</sup> 试验舱进行颗粒物的 CADR 测试;然后在 3 m<sup>3</sup> 试验舱进行快速老化试验,并模拟该净化器实际使用时的长时间运行;最后重新在 30 m<sup>3</sup> 试验舱中进行老化试验后的 CADR 测试。其采用的原理是快速老化试验中颗粒物投放总量等于空气净化器实际使用情况下处理的颗粒物总量。该方法可在短时间内等效空气净化器在实际使用情况下长时间运行后 CADR 的衰减情况。结果表明,此评价方法简单可行,具有较好的实际操作性,可为中国空气净化器标准的修订提供参考。

### 2.2.3 微生物污染物净化效果的评价方法

据了解,目前在国内外空气净化器标准中,只有中国《JG/T 294—2010 空气净化器污染物净化性能测定》<sup>[59]</sup>中规定了微生物污染物净化效果的评价方法。该评价方法以空气中的

自然菌为污染源,在环境试验舱中分别进行自然衰减试验和总衰减试验,采用 6 级筛孔空气撞击式采样器对细菌进行采样,采集后的细菌在营养琼脂培养基上经 35~37℃、48 h 培养,用显微镜计数样品菌落数。并计算微生物自然衰减率  $\eta$  和总衰减率  $\eta_t$ ,最后以净化效率  $E = \eta_t - \eta$  这一指标进行评价。

虽然此评价方法中试验设备简单,操作方便,但是存在一定的局限性,如检测时间长,不能快速有效地评价空气净化器净化微生物的性能等。因此,需要进一步对微生物净化效果进行研究,修订国家空气净化器标准,提出一个有效检测微生物污染物净化性能的评价方法。

从以上评价指标和评价方法可以看出:1) 现有评价指标很难全面提取空气净化器的准确信息,CADR 只代表了一个比较不同空气净化器的共同基准。需要建立一个涉及能量消耗、适用面积、副产物和使用寿命等因素的标识制度,为选择合适室内空气净化器提供一定的依据;2) 目前国内外没有一种全面评价方法,能同时检测及评价室内空气净化器去除所有污染物的性能。因此,建立一个简单、快速、准确、综合的评价方法是室内空气净化技术研究领域亟待解决的一个重要课题。

## 3 结论

室内空气净化器是一个新兴领域,具有广阔的发展前景。现有的室内空气净化器层出不穷,虽然对室内空气中的一些污染物有着良好的去除效果,但它们都有各自的局限性。集合多种空气净化技术的复合式空气净化器是今后重要的研究方向,将各种净化技术融合在一起,取长补短成为净化器的重要发展趋势。需要从空气净化效率、使用寿命、控制技术、复合能力及副产物排放质量浓度这 5 方面来完善室内空气净化器的评价标准和评价方法,以期全面评价室内空气净化器。

与此同时,可以根据目前中国室内空气污染情况,在国内外研究工作的基础上,研发便携式室内空气污染物检测仪器,并出台统一的、强制性空气净化器国家标准和一套完整的空气净化器评价方法,以利于净化器产品的健康发展,更好地提高室内空气品质。

## 参考文献(References)

- [1] Branco P T B S, Alvim-Ferraz M C M A, Martins F G, et al. Indoor air quality in urban nurseries at Porto city: Particulate matter assessment [J]. Atmospheric Environment, 2014, 84: 133-143.
- [2] Bjarke M, Antti J K, Tareq H, et al. A new clean air delivery rate test applied to five portable indoor air cleaners[J]. Aerosol Science and Technology, 2014, 48(4): 409-417.
- [3] Zhang Y, Mo J, Li Y, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 4329-4343.
- [4] 励建荣, 王立娜, 金毅, 等. 国内外空气净化消毒技术的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6N): 204-209.

- Li Jianrong, Wang Lina, Jin Yi, et al. The research progress on air purification disinfection technology at home and abroad[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(6N): 204–209.
- [5] Dela Cruz M, Christensen J H, Thomsen J D, et al. Can ornamental potted plants remove volatile organic compounds from indoor air—a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2014, 21(24): 13909–13928.
- [6] 陈晓森, 刘峥军, 郑浩, 等. 室内空气净化方法及研究进展[J]. *轻工科技*, 2014, 185(4): 62–63.  
Chen Xiaomiao, Liu Zhengjun, Zheng Hao, et al. The research progress of indoor air purification methods[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2014, 185(4): 62–63.
- [7] Hao J, Zhu T, Fan X. Indoor air pollution and its control in China[M]// *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin Heidelberg: Springer, 2014.
- [8] Yu B F, Hu Z B, Liu M, et al. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2009, 32: 3–20.
- [9] 王佳媛. 室内空气净化材料与技术应用研究进展[J]. *科学咨询(科技·管理)*, 2012(7): 58–59.  
Wang Jiayuan. The research progress on indoor air purification materials and technology application[J]. *Technology & Management*, 2012(7): 58–59.
- [10] 李俊宁, 王丽娜, 齐涛, 等. 介孔气体吸附剂[J]. *化学进展*, 2008, 20(6): 851–858.  
Li Junning, Wang Lina, Qi Tao, et al. Mesoporous gas adsorbents[J]. *Progress in Chemistry*, 2008, 20(6): 851–858.
- [11] Jo W K, Chun H H. Application of fibrous activated carbon filter in continuous-flow unit for removal of volatile organic compounds under simulated indoor conditions[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, 14: 347–354.
- [12] Shen J H, Wang Y S, Lin J P, et al. Improving the indoor air quality of respiratory type of medical facility by zeolite filtering[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2014, 64(1): 13–18.
- [13] Ding Z, Xie Y, Yan K, et al. Non-thermal plasma technique and its application in the field of environmental protection[J]. *Advances in Environmental Protection*, 2014, 4: 136–145.
- [14] 郑超, 徐羽贞, 黄逸凡, 等. 低温等离子体灭菌及生物医药技术研究进展[J]. *化工进展*, 2013, 32(9): 2185–2193.  
Zheng Chao, Xu Yuzhen, Huang Yifan, et al. State-of-the-art non-thermal plasma disinfection and medicine[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(9): 2185–2193.
- [15] Schmid S, Jecklin M C, Zenobi R. Degradation of volatile organic compounds in a non-thermal plasma air purifier[J]. *Chemosphere*, 2010, 79(2): 124–130.
- [16] Oda T. Non-thermal plasma processing for environmental protection: Decomposition of dilute VOCs in air[J]. *Journal of Electrostatics*, 2003, 57: 293–311.
- [17] 伶伟钢, 王维宽, 胡赞. 室内空气净化技术及其发展趋势[J]. *科技创新导报*, 2013, 17: 125–126.  
Ling Weigang, Wang Weikuan, Hu Yun. Technology and development of indoor air purification[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2013, 17: 125–126.
- [18] Zhao D Z, Li X S, Shi C, et al. Low-concentration formaldehyde removal from air using a cycled storage-discharge (CSD) plasma catalytic process[J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, 66(17): 3922–3929.
- [19] Ayoko G A, Wang H. Volatile organic compounds in indoor environments [M]// *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin Heidelberg: Springer, 2014.
- [20] Pei C C, Leung W W F. Solar photocatalytic oxidation of NO by electronsun TiO<sub>2</sub>/ZnO composite nanofiber mat for enhancing indoor air quality[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2014, 89(11): 1646–1652.
- [21] Farhanian D, Haghight F. Photocatalytic oxidation air cleaner: Identification and quantification of by-products[J]. *Building and Environment*, 2014, 72: 34–43.
- [22] 石芳芳, 邱利民, 于川, 等. 室内空气净化技术及产品综述[J]. *制冷学报*, 2014, 35(5): 14–18.  
Shi Fangfang, Qiu Limin, Yu Chuan, et al. Techniques and products for air purification[J]. *Journal of refrigeration*, 2014, 35(5): 14–18.
- [23] Lü J, Zhu L. Highly efficient indoor air purification using adsorption-enhanced-photocatalysis-based microporous TiO<sub>2</sub> at short residence time[J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(11): 1447–1454.
- [24] 何运兵, 纪红兵, 王乐夫. 室内甲醛催化氧化脱除的研究进展[J]. *化工进展*, 2007, 26(8): 1104–1109.  
He Yunbing, Ji Hongbing, Wang Lefu. Development of the removal of indoor formaldehyde with catalytic oxidation[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2007, 26(8): 1104–1109.
- [25] Lin L, Chai Y, Zhao B, et al. Photocatalytic oxidation for degradation of VOCs[J]. *Open Journal of Inorganic Chemistry*, 2013, 3(1): 14–25.
- [26] Han Z N, Chang W C, Wang X P, et al. Experimental study on visible-light induced photocatalytic oxidation of gaseous formaldehyde by polyester fiber supported photocatalysts[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 218: 9–18.
- [27] Carrillo A M, Carriazo J G. Cu and Co oxides supported on halloysite for the total oxidation of toluene[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 164: 443–452.
- [28] Wahid S, Tatarchuk B J. Catalytic material with enhanced contacting efficiency for volatile organic compound removal at ultrashort contact time[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(44): 15494–15503.
- [29] Lestinsky P, Brummer V, Jecha D, et al. Design of an catalytic oxidation unit for elimination of volatile organic compound and carbon monoxide[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(2): 732–737.
- [30] Chen C, Wu Q, Chen F, et al. Aluminium-rich Beta zeolite-supported platinum nanoparticles for the low-temperature catalytic removal of toluene[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015(3): 5556–5562.
- [31] Zhang C, Liu F, Zhai Y, et al. Alkali-metal-promoted Pt/TiO<sub>2</sub> opens a more efficient pathway to formaldehyde oxidation at ambient temperatures[J]. *Angewandte Chemie*, 2012, 51(38): 9628–9632.
- [32] 杨全, 张浩, 卜龙利. 复合载体负载型催化剂制备及其微波辅助催化氧化甲苯性能试验[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2014, 46(1): 131–136.  
Yang Quan, Zhang Hao, Bu Longli. The preparation of composite supported catalyst and the toluene performance test with microwave assisted catalytic oxidation[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition*, 2014, 46(1): 131–136.
- [33] 张长斌, 贺泓, 王莲, 等. 负载型贵金属催化剂用于室温催化氧化甲醛和室内空气净化[J]. *科学通报*, 2009, 54(3): 278–286.  
Zhang Changbin, He Hong, Wang Lian, et al. Supported noble metal catalysts for the removal of formaldehyde and indoor air purification

- with catalytic oxidation at room temperature[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(3): 278-286.
- [34] Yu X, He J, Wang D, et al. Au-Pt bimetallic nanoparticles supported on nest-like MnO<sub>2</sub>: Synthesis and application in HCHO decomposition [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14(11): 1260.
- [35] Wang L, Sakurai M, Kameyama H. Study of catalytic decomposition of formaldehyde on Pt/TiO<sub>2</sub> alumite catalyst at ambient temperature[J]. Journal of hazardous materials, 2009, 167(1-3): 399-405.
- [36] Huang H, Ye D. Combination of photocatalysis downstream the non-thermal plasma reactor for oxidation of gas-phase toluene[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171(1-3): 535-541.
- [37] 林民政. 室内空气污染治理研究进展[J]. 海峡科学, 2014, 91(7): 46-48.  
Lin Minzheng. The research progress on Indoor air pollution control [J]. Straits Science, 2014, 91(7): 46-48.
- [38] Sivachandiran L, Thevenet F, Gravejat P, et al. Isopropanol saturated TiO<sub>2</sub> surface regeneration by non-thermal plasma: Influence of air relative humidity[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 214: 17-26.
- [39] Maciucă A, Batiot-Dupeyrat C, Tatibouët J M. Synergetic effect by coupling photocatalysis with plasma for low VOCs concentration removal from air[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2012, 125: 432-438.
- [40] Ochiai T, Hayashi Y, Ito M, et al. An effective method for a separation of smoking area by using novel photocatalysis-plasma synergistic air-cleaner[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 209: 313-317.
- [41] Raso R A, Stoessel P R, Stark W J. Physical mixtures of CeO<sub>2</sub> and zeolites as regenerable indoor air purifiers: Adsorption and temperature dependent oxidation of VOC[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2014(2): 14089-14098.
- [42] Sekine Y, Fukuda M, Takao Y, et al. Simultaneous removal of formaldehyde and benzene in indoor air with a combination of sorption- and decomposition- type air filters[J]. Environmental Technology, 2011, 32(16): 1983-1989.
- [43] 孙丽, 王维宽, 胡贇. 室内空气净化关键技术研究[J]. 环境保护与循环经济, 2013(11): 44-46.  
Sun Li, Wang Weikuan, Hu Yun. The key techniques of indoor air purification[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2013 (11): 44-46.
- [44] 胡晓微, 张于峰, 谢朝国, 等. 室内空气净化器性能评价指标的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 64-68.  
Hu Xiaowei, Zhang Yufeng, Xie Chaoguo, et al. Experimental study of the evaluating indicators for the room-conditioning air cleaners[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 64-68.
- [45] 中国家用电器研究所, 中国预防医学科学院环境卫生监测所, 北京华夏环境工程公司, 等. GB/T 18801—2002空气净化器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.  
China's Household Electrical Appliances Research Institute, Environmental Health Monitoring by Chinese Academy of Preventive Medicine, Beijing Huaxia Environmental Engineering Company, et al. GB/T 18801-2002 air cleaner[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.
- [46] 张妍, 李振海. 室内空气净化器性能指标的探讨[J]. 环境与健康杂志, 2007, 24(6): 453-455.  
Zhang Yan, Li Zhenhai. Study of the performance indicators for the indoor air cleaners[J]. Journal of Environment and Health, 2007, 24 (6): 453-455.
- [47] 王超, 赵彬, 杨旭东. 一种评价挥发性有机物污染水平的室内空气质量健康指数[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(6): 2099-2104.  
Wang Chao, Zhao Bin, Yang Xudong. Indoor air quality health index based on evaluation of volatile organic compounds pollution[J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition 2014, 45(6): 2099-2104.
- [48] 中国家用电器研究院, 北京亚都科技股份有限公司, 国家家用电器质量监督检验中心, 等. GB/T 18801—2008空气净化器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
China's Household Electrical Appliances Research Institute, Beijing Yadu Technology Co., Ltd., National Quality Supervision and Inspection Center Home Appliances, et al. GB/T 18801-2008 air Cleaner[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [49] Howard-Reed C, Nabinger S J, Emmerich S J. Characterizing gaseous air cleaner performance in the field[J]. Building and Environment, 2008, 43: 368-377.
- [50] Howard-Reed C, Henzel V, Nabinger S J, et al. Development of a field test method to evaluate gaseous air cleaner performance in a multizone building[J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2008, 58(7): 919-927.
- [51] Yu K P, Lee G W M, Hsieh C P, et al. Evaluation of ozone generation and indoor organic compounds removal by air cleaners based on chamber tests[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(1): 35-42.
- [52] Kim H J, Han B, Kim Y J, et al. Efficient test method for evaluating gas removal performance of room air cleaners using FTIR measurement and CADR calculation[J]. Building and Environment, 2012, 47: 385-393.
- [53] Gallego E, Roca F J, Perales J F, et al. Experimental evaluation of VOC removal efficiency of a coconut shell activated carbon filter for indoor air quality enhancement[J]. Building and Environment, 2013, 67: 14-25.
- [54] 黄芳, 朱志鑫, 吴惠勤, 等. 空气净化产品降解空气污染物效能的测定方法[J]. 理化检验(化学分册), 2014, 50(3): 288-293.  
Huang Fang, Zhu Zhixin, Wu Huiqin, et al. Method for determination of efficiency of degradation of air pollutants by air purifiers[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2014, 50(3): 288-293.
- [55] 李睦, 卜钟鸣, 莫金汉, 等. 我国空气净化器标准存在的问题及相关思考[J]. 暖通空调, 2013, 43(12): 59-63.  
Li Mu, Bu Zhongming, Mo Jinhan, et al. Problems and thoughts about Chinese standards for air cleaners[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2013, 43(12): 59-63.
- [56] Grinspun S A, Mainelis G, Trunov M, et al. Evaluation of ionic air purifiers for reducing aerosol exposure in confined indoor spaces[J]. Indoor Air, 2005, 15(4): 235-245.
- [57] Sultan Z M, Nilsson G J, Magee R J. Removal of ultrafine particles in indoor air: Performance of various portable air cleaner technologies [J]. HVAC&R Research, 2011, 17(4): 513-525.
- [58] 李睦, 张晓, 朱焰, 等. 空气净化器去除颗粒物的洁净空气量衰减评价方法[J]. 绿色建筑, 2014(1): 21-23.  
Li Mu, Zhang Xiao, Zhu Yan, et al. Clean air attenuation evaluation method on PM eliminating capability of air cleaner[J]. Green Building, 2014(1): 21-23.
- [59] 清华大学, 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 远大空调有限公司, 等. JG/T 294—2010空气净化器污染物净化性能测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
Tsinghua University, Shanghai Building Scientific Research Institute (Group) Co., Ltd., Broad Air Conditioner Co., Ltd, et al. JG/T 294-2010 test of pollutant cleaning performance of air cleaner[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.

(责任编辑 吴晓丽)