

城市典型地下空间的空气污染特征及其净化对策*

清华大学 韩宗伟[☆] 王 嘉 邵晓亮
中国人民解放军理工大学 周森林 韩 旭
清华大学 石文星[△]

摘要 以现场测试数据和对我国城市地下空间空气质量的相关文献分析为基础,总结了地下商场、地铁车站、地下车库 3 类典型地下空间内部的空气污染状况,并以图表的形式给出了目前我国典型地下空间中的 CO₂, CO, 可吸入颗粒物 PM₁₀, 细菌, 甲醛, 氡等特征污染物的浓度分布数据,并分析其成因。根据目前通风、常用空气净化技术现状以及各类地下空间的污染特征,分析指出去除地下商场和地铁车站内部污染物宜采用控制污染源、通风稀释和复合净化有机结合的技术路线,并指出研发方便、高效的复合净化技术是今后解决城市地下空间污染物净化问题的重要方向。

关键词 城市地下空间 空气质量 污染物 净化

Characteristics and eliminating strategies of contaminants in urban underground spaces

By Han Zongwei[★], Wang Jia, Shao Xiaoliang, Zhou Senlin, Han Xu and Shi Wenxing

Abstract Based on the field test data and literature analyses of indoor air quality in urban underground space of China, summaries the air pollution character in three types of typical urban underground space, i. e. the underground store, underground railway station and underground garage. Provides the concentration distribution charts of the typical air pollutants, including CO₂, CO, inhalable particulate PM₁₀, bacteria, formaldehyde and radon, and analyses their sources. In view of the current ventilation and air cleaning technology and pollution characteristics, points out the technical route of pollutants removal should be properly combined pollution source control, dilution ventilation and complex cleaning for underground stores and underground railway stations. Indicates that development of convenient and efficient complex cleaning techniques is an important trend for eliminating pollutants in urban underground spaces.

Keywords urban underground space, indoor air quality, contaminant, cleaning

[★] Tsinghua University, Beijing, China

^①

0 引言

随着我国经济与建设的发展,城市化进程的加快,土地需求增长和城市可用地有限性之间的矛盾越来越明显。多年的实践表明,开发地下空间是扩大城市容量,解决城市人口、环境、资源矛盾的重要举措之一^[1]。目前在全国各地已建成许多公共地下空间,取得了显著的社会与经济效益。

开发和利用地下空间,必须根据其使用目的创

造出不同(指标)要求的安全、卫生、舒适环境,其中,保障空气质量是其必要条件。从空气质量方面看,城市地下空间具有如下特点:1) 建筑结构相对封闭,需提供有组织新风;2) 内部污染源多,空气质量差;3) 多处于繁华地区,室外空气质量差。地下空

^{①☆} 韩宗伟,男,1980 年 11 月生,工学博士,博士后
[△] 100084 北京市海淀区清华大学旧土木工程馆
(010) 62796114

E-mail: wxshi@tsinghua. edu. cn

收稿日期:2009-08-25

修回日期:2009-09-02

* 国家科技支撑计划重点项目资助(编号:2006BAJ27B03)

间的现有空调系统在设计过程中偏重热湿处理,忽视了室内空气质量,许多工程中应用的空气净化设备仅为粗效过滤器,这些因素导致了地下空间内空气质量的恶化,加之人们在心理上对地下环境的负面印象,直接影响人们对地下空间内部环境的评价。长时间处于地下的人群易产生闷热、压抑、烦躁等不良感觉,并且某些疾病发病率也高于地上对照组。因此,在设计建造地下建筑时,不仅要保证安全性与经济性,而且要重视其内部空气质量的保障问题。

建筑内部空气环境主要包括热舒适性和空气质量两个方面,本文将针对空气质量进行调研,以明确典型城市地下空间的空气质量现状,并针对性地分析提出去除主要污染物的技术路线,以便开发出相应技术与产品,推进地下空间的有效利用。

1 研究内容与方法

1.1 研究内容

1) 以城市地下空间中的地下商场、地铁车站、地下车库三类典型地下空间为对象,以空气质量的相关文献和现场测试结果为基础,根据测试数据和相关标准总结、归纳地下空间污染物分布特征及其污染成因;

2) 根据目前地下空间的污染成因与净化技术发展现状,提出提高空气质量控制的技术路线以及尚需解决的关键问题。

1.2 调研数据的总结分析

1) 选定评价标准

根据地下空间的用途分别采用不同的评价标准。

① 地下商场空气质量的直接相关标准是《人防工程平时使用环境卫生标准》(GB/T 17216—1998)^[2],该标准指出,人防工程中除标准值以外的卫生要求应符合《商场(店)、书店卫生标准》(GB 9670—1996)^[3]等标准规定,因此应取上述两个标准中的污染物浓度限值的较小值作为地下商场空气质量标准。

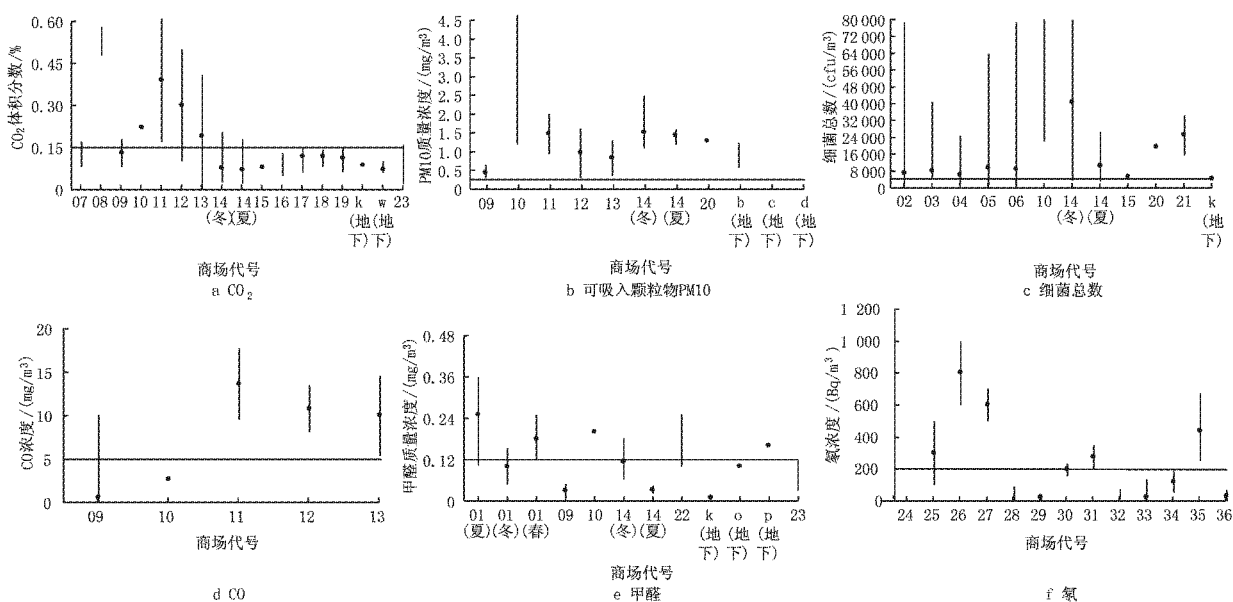
② 地铁车站的空气质量标准选定为《公共交通等候室卫生标准》(GB 9672—1996)^[4]。

③ 对于地下车库污染物浓度限值而言,目前我国尚没有相关标准,考虑到车库中长时间停留的多为工作人员,因此引用《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2—2002)^[5]中的相关指标作为地下车库空气质量的评价基准。

④ 评价本文所述三类典型地下空间空气质量时,同时参照《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)^[6]及《地下建筑氡及其子体控制标准》(GB 16356—1996)^[7]。

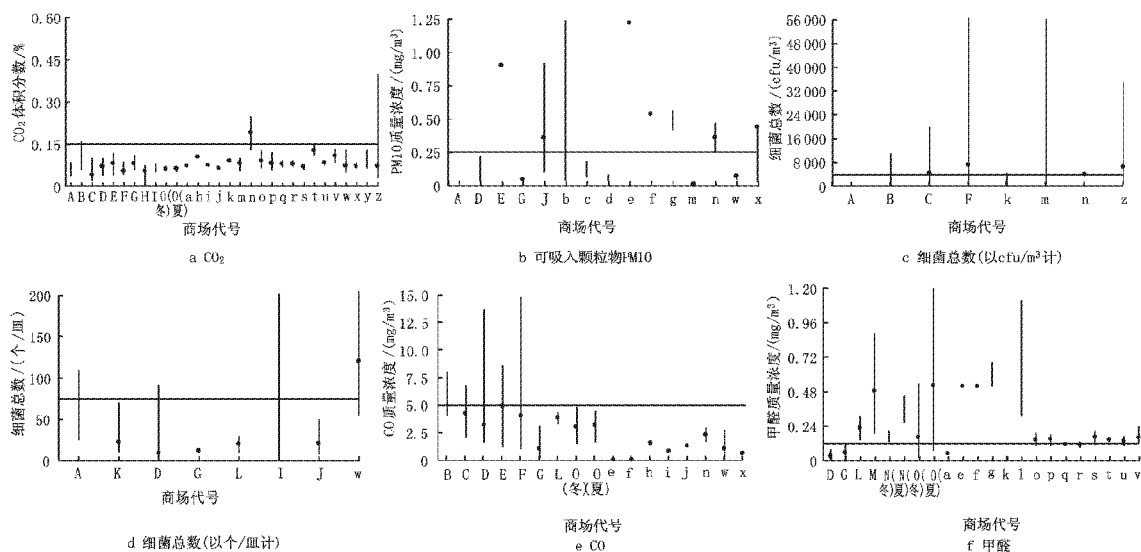
2) 文献调研和实测调研

从相关文献和笔者测试结果中提取数据,并以图表形式给出统计结果。由于各文献中的测点范围以及结果整理形式不同,因此需要采用一定的原则进行数据选取与规范整理,结果参见图 1~3。图中数据点的选取原则与表示方法如下:



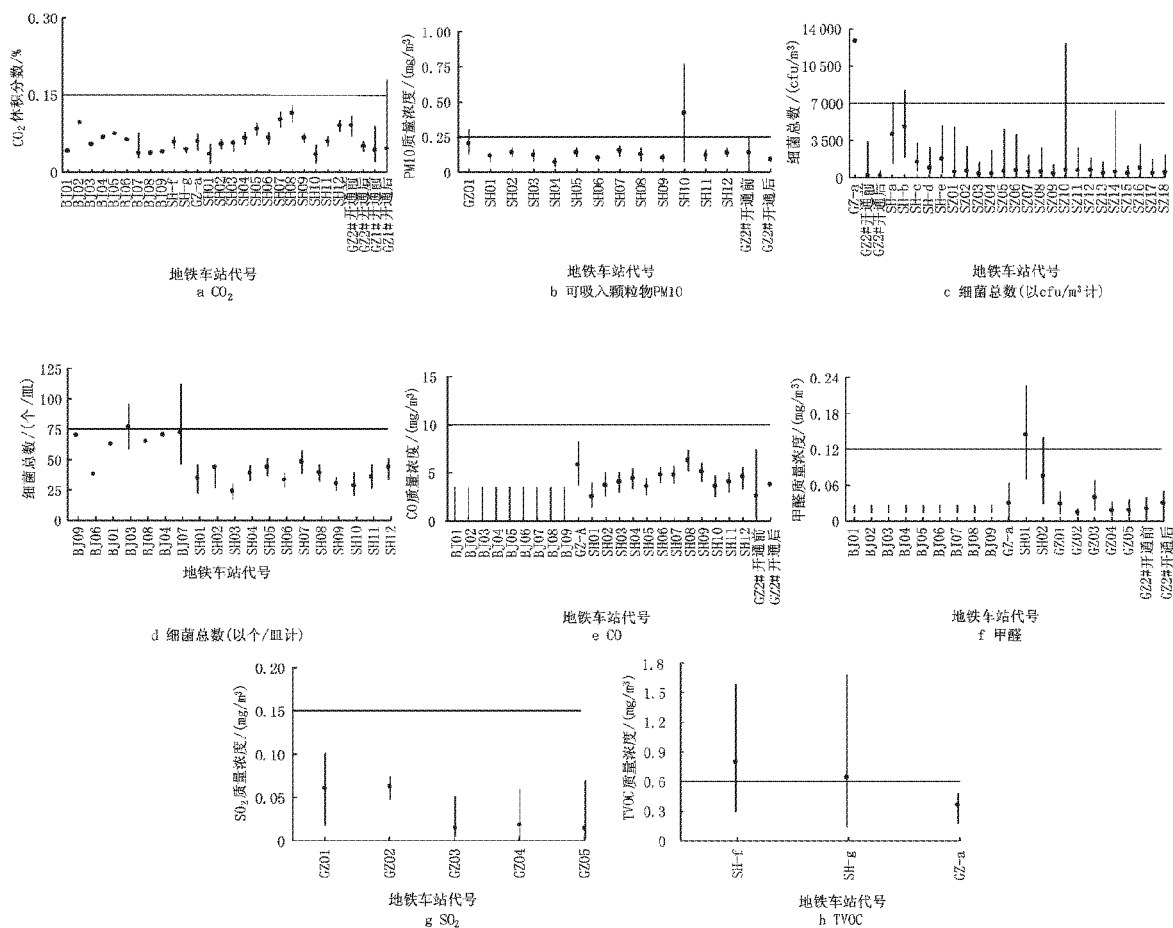
注:横坐标中数字代表单座地下商场编号,小写字母代表单座地上商场(的地下层)编号。

图 1 地下商场主要污染物浓度分布现状



注:横坐标大写字母为商场群编号,小写字母为单座商场编号。

图 2 地上商场主要污染物浓度分布现状



注:1) 横坐标中,GZ1#开通前(后),GZ2#开通前(后)为广州地铁 1,2 号线的全线站点的综合数据,此外的地铁站为城市拼音首字母+小写字母或数字编号;

2) 图 g 中 SO_2 的浓度限值采用《环境空气质量标准》(GB 3095—1996)中规定的二级标准日均浓度限值,图 h 中 TVOC 的浓度限值采用《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)中的 8 h 平均浓度限值。

图 3 地铁车站主要污染物浓度分布现状

① 同一场所短期内多时刻、多位置测试数据,取所有测量浓度的上、下限值作为该场所污染物的浓度范围;同一场所在长时段间隔(如不同季节、开业前后)进行数次测试时,所测数据分别统计。

② 文献中污染物浓度有多种统计形式,如仅有浓度范围或平均值、浓度范围+平均值、平均值±标准差等。本文在图 1~3 中,仅有浓度范围的用竖线(↓)表示,仅有平均值的用圆点(•)表示;采用浓度范围+平均值、平均值±标准差的均用竖线+圆点(↓•)表示,其中竖线表示浓度范围或“平均值-标准差”至“平均值+标准差”范围,圆点表示其平均值。

③ 在图中以水平线表示相关评价标准的浓度限值。

通过对图中数据进行分析,可以得出各类地下空间的污染现状与特征;通过分析污染物来源与成因,结合当前净化技术的发展现状,可以提出适用于各类地下空间的空气净化技术路线。

2 地下空间的空气污染特征

2.1 地下商场

1) 污染物分布现状

笔者调研了地下商场测试文献 22 篇^[8-29],跨越年限为 1988—2006 年,包含上海、哈尔滨、石家庄、长沙、重庆、大连等地区的地下商场的测试结果。作为对比,同时调研了地上商场测试文献 27 篇^[30-56](当地上商场的测试数据中含有地下层时,则将地下层纳入地下商场进行统计)。选取 CO₂, CO, 可吸入颗粒物 PM₁₀, 细菌, 甲醛, 氡作为其特征污染物(常测),按上文所述方法提取数据绘制统计图。图 1, 2 分别为地下商场和地上商场的统计结果。

2) 污染物分布特征与成因

对比图 1 与图 2 的数据可以看出,地下商场的空气质量明显差于地上商场。其污染物分布具有如下特征。

① CO₂

地上商场的测试结果大多数符合标准,而地下商场约有一半存在超标现象,个别浓度达到标准限值 4 倍以上。分时段测试结果表明,CO₂ 体积分数与人流呈相关性变化,说明其主要产生源是人群^[8,21]。

② 可吸入颗粒物 PM₁₀

地上、地下商场均普遍超标,某些地上商场的

测试结果超标 1~4 倍,而某些地下商场超标 3~10 倍以上。测试结果表明,颗粒物浓度与人流量和室外含尘量相关^[13,21],说明其主要是由人员活动的扬尘及室外空气引入。当气流组织不好、局部风速过大时,会导致室内空气中的悬浮物增多(已沉降的再度悬浮,已悬浮的不易沉降)^[57]。

③ 细菌总数

地上商场位于其限值附近,而地下商场则普遍严重超标,某些建筑的超标率达到 10 倍以上,最高达到 26×10^4 cfu/m³。细菌等微生物通常附着在颗粒物上,因此会和颗粒物浓度呈现相关性。空调设备在加湿、除湿等处理过程中,本身也易导致微生物的繁殖,并且在缺少阳光、空气潮湿的地下建筑中,则更会加剧微生物污染^[58]。

④ CO

部分地下、地上商场存在超标现象,但地上商场的浓度均值大多达标。地下商场内部一般没有 CO 产生源,经分析多是由地面上的汽车废气经空调系统送入造成的^[12]。

⑤ 总挥发性有机物(TVOC)

甲醛是其主要代表,测试结果表明,部分地上与地下商场甲醛浓度均超标,这与污染源(即装修程度和经营商品)密切相关。如 M, N, O 均为家具商场,其甲醛浓度远高于标准限值^[39,55-56]。文献^[13,21]给出的分时段测试结果表明,以甲醛为代表的 TVOC 主要来源于装修材料和商品,其室内浓度也受已散发时间和空气温湿度影响。

⑥ 氡及其子体

氡及其子体浓度超标的地下商场占有较大的比例,由于氡主要来源于建筑周围的岩石、土壤、地下水及工程建材,因此,地上建筑内的氡及其子体浓度远低于地下建筑。据国内有关资料报导,一般地上建筑的室内氡平均浓度为 28 Bq/m³,氡子体平均浓度为 14 Bq/m³^[59]。在地下建筑内,氡的浓度和建筑类型、所处地区、周围岩石和地下水情况、建筑的使用和通风情况等都有显著的关系^[60]。

从以上的统计分析可以看出,CO₂, CO, 甲醛, 可吸入颗粒物 PM₁₀, 微生物等均为地下商场的主要污染物(故可作为需要去除的特征污染物)。相比之下,由于自然通风效果相对较好,且新风中汽车尾气等污染物的影响相对较小,大部分地上商场 CO₂, CO, 微生物符合标准,个别存在超标现象,甲

醛和可吸入颗粒物 PM₁₀ 的情况与地下商场基本相同。目前关于其他污染物(如 SO₂, NO_x, 氨, TVOC)的测试文献较少,但也应引起重视。

地下商场作为公共建筑,其内、外均存在多种污染源,同时很难采用自然通风来改善其内部环境,故大多数情况下只能依靠机械通风。需要说明的是,由于上述文献调查的时间跨度较大(1988—2006 年),而不同时期我国地下建筑的设计标准以及污染物控制指标不尽相同,这也是造成当前地下建筑污染物浓度超标的一个重要原因。从目前的工程设计来看,多用一次回风定风量加独立排风系统,以新风粗效或中效过滤器作为其净化设备。由此看来,仅仅加装过滤器的净化措施是不能很好地满足内部空气质量要求的。

2.2 地铁站

笔者调研了地铁站测试文献 11 篇^[61-71],年限范围为 1999—2008 年,包括了上海、广州、深圳等城市的地铁站测试数据,结合中国建筑科学研究院对北京市几座地铁站的实测数据^[72],总结出如图 3 所示的常测污染物的浓度分布现状。目前关于地铁站内氡气浓度的调查文献很少,故在图 3 中没有给出相关的数据。

从图 3 可以看出,地铁站的空气卫生状况相对较好,各类污染物的大多数测试结果符合卫生标准要求。这与地铁大多建成年限短、通风系统设备较完善,且列车运行造成的活塞风相关,使得内部通风量大满足要求。

地铁站中各类污染物的来源与地下商场相似,如 CO₂ 主要来源于人员呼吸,CO, SO₂ 等主要由室外引入等^[64-65,70]。细菌总数测试表明,客流量大的地下车站细菌数量明显高于客流量相似的地面车站,也明显高于客流量较低的地下车站,证实了卫生状况和通风量的相关性^[66]。地铁站各种可测出污染物的来源如表 1 所示。

表 1 地铁站的污染物种类与来源

污染物种类	污染物来源
CO ₂	人员呼吸
CO	室外引入
可吸入颗粒物 PM ₁₀	人员活动扬尘,室外引入
甲醛等 TVOC	建筑装饰材料
氡	主要来自于岩石、土壤、地下水,部分来自于建材
微生物	多附着于颗粒物上,与通风量相关

2.3 地下车库

地下车库的污染特征与地下商场、地铁站的区别较大,这是由于污染源不同所致。地下车库的污染源主要为汽车尾气,含有 CO, NO_x, SO₂, 烃类,烟尘微粒,TVOC 等有害成分。目前对地下车库的测试研究中通常以 CO 为标志监测物,认为当 CO 浓度满足标准时,其他污染物浓度也会满足标准。我国在《工作场所有害因素职业接触限值》(GBZ 2—2002)中对 CO 的允许浓度要求为:时间加权(8 h)平均允许质量浓度为 20 mg/m³;短时间(15 min)接触质量浓度为 30 mg/m³。

关于地下车库空气质量的测试文献较少,且测试内容与方法也不尽相同。表 2 给出了国外封闭式车库和国内车库相关 CO 测试的文献统计结果,可以看出,国外车库中的 CO 浓度与通风量相关,换气次数较大的车库中,一般都能使 CO 质量浓度降到 30 mg/m³ 以下^[73];而从近年来国内文献的测试结果可以看出,部分地下车库的污染相对较为严重,有些 CO 测试点的体积分数达到 $160 \times 10^{-6} \sim 220 \times 10^{-6}$ ^[74-77]。

此外,文献^[78]对地下停车场内的氡浓度作了调查,结果表明停车场内全年氡浓度的变化范围为 19.9~148 Bq/m³,小于《地下建筑氡及其子体控制标准》(GB 16356—1996)^[7]中的上限值 200 Bq/m³。

地下车库不易利用自然通风,一般需要配备机械通风系统来输送足够风量,从而使其内部污染物浓度控制在合理的范围内。但通常情况下,地下车库出于节省资金的考虑,都存在排风量严重不足的现象^[79]。

3 三类地下空间的空气净化对策

3.1 地下空间空气净化的技术路线

目前,常用室内污染物的净化手段主要有污染源控制、通风稀释和复合净化 3 种^[80]。其中污染源控制是最根本的手段,但是由前述调查分析结果表明,地下空间的污染物种类较多,其污染源亦是多种多样,因此,单独通过该手段对室内环境进行净化处理是难以实现的。目前,以该方式去除污染物最常用的方法为定期对风管以及过滤器进行清洗,以清除其内部因系统长期运行造成的积灰和细菌污染源。此外,通过堵塞缝隙、在墙壁和地面涂防氡涂料亦是通过对污染源的方式降低室内氡浓度。

表 2 一些地下车库的 CO 浓度测试结果

测试车库		换气次数/h ⁻¹	CO 体积分数/10 ⁻⁶
美国 ^[73]	Hartford 停车场 A	5.2	夏季 37, 冬季 85(1 h 平均)
	Hartford 停车场 B	7.8	夏季 15, 冬季 45(1 h 平均)
	Denver 停车场 A	15.8	22(1 h 平均)
	Denver 停车场 B	16.7	25(1 h 平均)
	Los Angeles 停车场	4.2	22(1 h 平均)
芬兰 ^[73]	地下停车场 A	2.3	28(2 h 平均), 67(最大值)
	地下停车场 B	2.3	27(2 h 平均), 90(最大值)
	地下停车场 C	3.5	32(2 h 平均), 78(最大值)
日本 ^[73]	停车场 A	9.8	7.6(平均值), 108(最大值)
	停车场 B	17.2	4.9(平均值), 22(最大值)
	停车场 C	13.2	7.0(平均值), 33(最大值)
	停车场 D	6.4	1.3(平均值), 17(最大值)
中国	香港 ^[73] 地下 2 层停车场	未说明	360(5 min 间隔)
	地下 1 层停车场	无通风系统	318(5 min 间隔)
	北京 ^[74] 地下 2 层停车场	未说明	4.1(通风后平均值), 12.2(未通风平均值)
	上海 ^[75] 地下停车场 A	未说明	11.1(平均值), 80.3(最大值)
	地下停车场 B	未说明	9.5(平均值), 40.6(最大值)
	广州 ^[76] 40 个地下车库(地下 1 层~地下 3 层)	23 座有通风系统	190(平均值)±29(标准差)
	长春 ^[77] 地下停车场	通风系统未运行	冬: 45(最大值), 27.9(8 h 平均); 夏: 63.9(最大值), 46.1(8 h 平均)
	沈阳 ^[77] 地下停车场	通风系统未运行	冬: 50(最大值), 32.6(9 h 平均) 夏: 34.6(最大值), 24.3(8 h 平均)

注: 1 mg/m³ CO 折合成体积分数为 1.25×10⁻⁶。

通风稀释是降低室内污染物浓度的有效途径, 目前供暖空调系统设计中往往采用最小新风量, 由前述调查结果可知, 在现有的换气次数和新风比下, 靠通风稀释来降低室内污染物浓度的效果并不明显。但若仅为了稀释室内污染物单纯地增加新风量会导致供暖空调系统的能耗增加, 经济性变差。同时, 当室外也存在某种污染源时, 增加新风量反而会加剧该污染物对室内的污染。

复合净化是指在不改变当前空调系统形式及主要运行参数的条件下, 在空调箱中设置复合净化单元(段), 或者在污染物空间中单独设置复合净化器。在复合净化单元(器)中, 根据当前各类污染物的处理技术, 按照一定的顺序设置具有不同功能的处理段, 分别实现对空间中各类污染物的单独或联合处理, 将其浓度控制在标准要求的限值范围内。根据

上述分析可知, 采用单一的净化手段难以实现地下空间污染物的有效净化。通常情况下, 复合净化与污染源控制和通风稀释手段联合是实现各种污染物净化的最佳选择, 因此也成为目前的研发热点。

按照处理污染物种类不同, 典型地下空间内污染物主要分为三大类^[81]: 1) 可吸入颗粒污染物 PM₁₀ 及无机有害小分子; 2) 总挥发性有机化合物(TVOC); 3) 悬浮微生物, 包括细菌、真菌和病毒。目前针对以上几种污染物, 有诸多净化技术, 但这些技术主要针对某种特定污染物的净化效果较好, 因此, 需根据不同净化技术的特点, 进行有机组合以达到最佳的净化效果。

目前, 在舒适性空调领域, 有纤维过滤、静电除尘、活性炭吸附、等离子、负离子、光催化等^[82-83]。各种净化方法的主要技术特点如表 3 所示。

表 3 空气污染物常用净化技术及其特点

	可净化污染物种类	优 点	缺 点
纤维过滤 ^[84-86]	颗粒污染物、微生物、气	价格低廉、安装方便	阻力与净化效率相关, 中、高效过滤器阻力相对较大
静电除尘 ^[87-89]	颗粒污染物、微生物	除尘效率高、除尘粒径范围广、压力损失小	投资高、集尘后放电效率下降、电场易击穿等
紫外线杀菌 ^[90-93]	微生物	杀菌效率高、安全方便、不残留毒性、不污染环境、阻力小	动态杀菌效果相对较差
活性炭吸附 ^[94-95]	除生物性污染物的所有污染物	来源广泛、污染物净化范围较大、不易造成二次污染	存在饱和和再生问题、阻力相对较大、无机物处理效果不好
等离子 ^[83, 96]	室内所有污染物	污染物净化范围较大	往往不能彻底降解污染物、产生其他副产物
负离子 ^[83, 97-99]	颗粒污染物、微生物	能加速新陈代谢、强化细胞机能、对于一些疾病有治疗功效	会产生大量臭氧、导致二次污染、沉积的尘埃对墙壁造成污染
光催化 ^[99-101]	TVOC、微生物及其他无机气态污染物	净化范围广、反应条件温和、不存在吸附饱和现象、寿命长	相对于活性炭吸附技术而言, 净化速率较慢, 反应不完全易造成二次污染

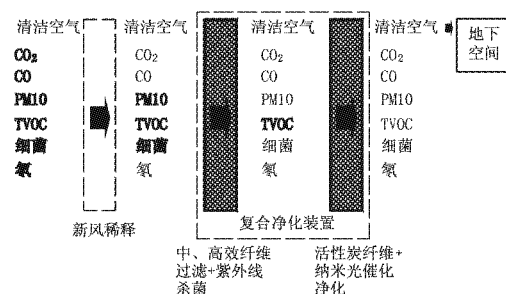
由表 3 可以看出,每种净化技术都有一定的净化范围及净化特点。所谓复合净化的净化能力及特点并不是单个净化技术的简单叠加,而是通过不同净化技术的有机组合实现优势互补。最大限度地发挥每种净化技术的优势的同时,还能相互弥补各自的不足。例如,目前许多学者研究将活性炭吸附与光催化技术相结合,制成活性炭-纳米 TiO_2 复合光催化净化空气^[102-106],该技术不仅具有活性炭吸附和光催化技术的优点,同时活性炭吸附作用大大提高了光催化净化效率,减少了二次污染物的产生;光催化还能使活性炭实现原位再生,该技术将在复合净化技术中得到发展。

3.2 典型地下空间净化策略探讨

不同地下空间空气净化策略需根据使用条件(气象条件、人员流动情况、能源类别、使用时间特征等)、空间现有空调系统形式、污染源特征与现有空气净化技术特点进行综合确定。我国地下商场和地铁车站空调系统一般采用全空气系统,且主要污染物种类与来源比较一致,因此,二者可以采用相同的净化策略。即在控制污染源的前提下,采用通风稀释和复合净化方法联合处理。

复合净化技术若要大量应用于工程实际,尚需达到以下几个方面的要求:1) 净化效率高,能够达到各种污染物的净化要求;2) 设备阻力小,对系统的风量及运行费用影响较小;3) 成本低、运行维护方便、长期运行安全可靠;4) 不产生二次污染,可以在有人的情况下进行净化处理。

为了达到上述要求,需根据现有净化技术的特点进行合理组合,即根据污染物的处理顺序和技术手段组合成不同类型的复合净化流程,图 4 即为其比较合理的一种流程。



注:深色字体的内容为能够穿透的物质,浅色字体的内容表示已被除去物质

图 4 地下空间空气污染物的复合净化流程

图 4 所示的净化流程通过三步来实现:1) 由

清洁的新风稀释空气中的 CO_2 , CO 及氨等污染物。2) 通过中、高效纤维过滤器过滤掉 PM_{10} , 同时进行紫外线杀菌处理,若通过新风稀释未能将氨浓度降到标准要求,高效纤维过滤器可进一步对其过滤,使其达标;目前已研发出阻力较小的中高效纤维过滤产品^[107],为复合净化装置的研发提供了可行性。3) 采用活性炭纤维复合光催化技术去除空气中的 TVOC,并进一步对空气进行杀菌处理。

根据室内外污染源特征的不同,复合净化装置可以设置在全空气系统的新风段、回风段和送风段,还可根据要求在不同段同时设置。若仅在送风段设置复合净化装置,则要求其净化效率较高,增加了净化装置的处理难度;若在不同段同时设置复合净化装置则可以降低每段的处理难度,但增加了系统的复杂程度,运行维护难度增加,同时还增加初投资。因此,在设置复合净化装置时,需从技术经济性角度进行综合取舍。

在空调系统中,复合净化段的净化效果不仅与其净化效率有关,同时还与换气次数有关,增加换气次数可以降低对复合净化段净化效率的要求。为此需根据换气次数和净化段阻力对系统初投资和运行费用的影响进行综合确定。当换气次数一定时,复合净化段的净化能力存在上限,当污染源的散发速率大于净化段的净化能力时,则需借助空气净化器对污染源进行局部净化^[108],以降低污染源浓度。由于空气净化器处理的风量有限,对于广阔的地下空间来说,净化方式应以集中净化为主,只是在特殊情况下,净化器才能作为一种辅助净化手段。

采用全面通风排除空气污染物是地下停车库最为简便易行的方法。由于地下车库中人员较少,停留时间较短,全面通风势必造成较大的能耗,故通风机停运是导致目前地下车库换气量不足、室内空气质量较差的主要原因。为降低通风能耗,可适当减小通风量,但对于长期停留在地下车库内的工作人员,其工作区域宜采用复合净化等技术手段进行局部净化,这样既可以减少运行能耗,又提高了工作区域的空气质量。

4 结论

本文以城市地下空间空气质量相关文献和测试数据为基础,对地下商场、地铁车站、地下车库三类典型地下空间内部空气污染特征进行归纳总结。

结果表明,地下商场的空气质量较差,各种污染物普遍超标,个别污染物超标严重;地铁车站的空气质量相对较好;地下车库的空气质量与通风量相关,若通风不足会造成汽车尾气的严重积聚。

复合净化技术是解决地下空间污染物净化问题不可缺少的重要手段。根据目前净化技术的研究现状与各类地下空间的污染特征,提出了相应的净化技术路线,即对于地下商场和地铁站宜采用控制污染源、通风稀释和复合净化有机结合的方式;对于地下车库,全面通风是主要技术手段,其人员工作区域宜采用基于复合净化技术的局部净化方式。由调查可知,地上商场和地下商场的污染物特征相似,空调系统形式也相同,因此,本文提出的地下空间的净化策略对某些地上建筑同样适用。

从技术经济性角度提出了地下空间净化装置设计的总体原则,并根据该原则探讨了不同性质地下空间的净化策略,希望能够为今后各类地下空间的通风、空调与净化系统的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 张庆贺. 地下工程[M]. 上海:同济大学出版社,2004
- [2] 国家人民防空办公室,中华人民共和国卫生部. GB/T 17216—1998 人防工程平时使用环境卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,1998
- [3] 国家技术监督局. GB 9670—1996 商场(店)、书店卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996
- [4] 国家技术监督局. GB 9672—1996 公共交通等候室卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996
- [5] 中华人民共和国卫生部. GBZ 2—2002 工作场所有害因素职业接触限值[S]. 北京:法律出版社,2002
- [6] 国家质量监督检验检疫总局,卫生部,国家环境保护总局. GB/T 18883—2002 室内空气质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002
- [7] 国家技术监督局,中华人民共和国卫生部. GB 16356—1996 地下建筑氡及其子体控制标准[S]. 北京:中国标准出版社,1996
- [8] 杨晓燕,翁俊. 城市地下空间 CO₂ 浓度的测试研究[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(2):199-203
- [9] 田涛,庄智,吴飞,等. 大连市某地下商场室内空气品质调查分析[J]. 洁净与空调技术,2004(2):57-61
- [10] 庞永洵,蔡涛,管琳,等. 地下环境与人体神经行为功能的研究[J]. 中国公共卫生,1996,12(8):366-367
- [11] 王丹宁,姚杨,姜东. 地下商场空气品质调查分析[J]. 建筑热能通风空调,2002,21(3):33-35
- [12] 王贤珍,范春,史力田. 某市地下商场空气污染现状的分析[J]. 环境与健康杂志,1992,9(2):64-66
- [13] 陈崇义,谷双魁,高优真,等. 石家庄市地下商场环境质量评价[J]. 河北医科大学学报,1996,17(3):148-152
- [14] 罗大华,喻延凯,唐明德,等. 长沙市地下公共场所室内空气 CO₂ 等 7 项卫生标准的探讨[J]. 中国卫生工程学,1997(2):52-54
- [15] 李文菁,杨昌智,吴晓燕,等. 长沙市商场热湿环境及空气中 CO₂ 浓度实测分析[C]//第 13 届全国暖通空调技术信息网大会文集,2005:172-174
- [16] 吴祥生,刘兆勇,肖涌,等. 重庆市地下商场 CO₂ 浓度测试与分析[C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术年会论文集,2002:284-287
- [17] 张进. 西安某地下商场空气质量及营业员健康调查[J]. 解放军预防医学杂志,1989,7(3):298-299
- [18] 李世红. 乌市红旗路地下街空气中细菌总数初步调查[J]. 干旱环境监测,1991,5(1):60-61
- [19] 于敬礼,孙丽明,赵同福. 本溪地下商场空气中甲醛含量监测报告[J]. 卫生研究,1995,24(4):35
- [20] 耿世彬,程宝义,郭海林. 地下工程空气环境质量调查[C]//全国暖通空调制冷 2000 年学术年会论文集,2000:212-216
- [21] 刘浩. 哈尔滨市某地下商场室内空气品质实验研究与评价[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006
- [22] 张友九,俞荣生,殷文红,等. 苏州市部分地下商场氡及其子体水平的测定[J]. 中国辐射卫生,1997,6(3):158
- [23] 官庆超,杨娟娟,张连平,等. 山东省地下建筑物内氡浓度调查及剂量估算[J]. 中国辐射卫生,1998,7(2):113-114
- [24] 杨娟娟,官庆超,张连平,等. 地下商场氡浓度影响因素的探讨[J]. 中华放射医学与防护杂志,2000,20(2):130-131
- [25] 赵同福,李淑堃,刘长宏,等. 本溪某地下商场内氡及其子体的浓度[J]. 工业卫生与职业病,1994,20(6):369-370
- [26] 戴鸿贵,郑正,余刚,等. 地下工程中的氡异常及其治理对策[J]. 南京大学学报:自然科学版,1999,35(2):222-229
- [27] 李晓燕,王燕,郑宝山. 我国东南四省人防工程内氡的调查[J]. 地球与环境,2004,32(3/4):67-71
- [28] 王燕,李晓燕,郑宝山,等. 我国六省人防工程氧浓度调查及影响因素初探[J]. 地球与环境,2004,32(3/4):63-66
- [29] 李晓燕,郑宝山,王燕,等. 我国部分城市地下工程空气中的氡水平[J]. 辐射防护,2007,27(6):368-374
- [30] 舒国通,陈建国. 22 家商场(超市)集中空调通风系统卫生状况调查[J]. 中国卫生监督杂志,2007,14(2):

87-89

- [31] 吴红宇,樊勤,孙建英. 1994~1995 年南京市部分商场空气卫生质量分析[J]. 江苏预防医学,1998(2): 40-41
- [32] 李香兰,杨超美,王旭,等. 包头市商场空气质量调查分析[J]. 包头医学院学报,1995,11(2):27-28
- [33] 黄建林. 长沙市 11 家大型商场(超市)空气质量调查[J]. 预防医学情报杂志,2006,22(2):225-226
- [34] 阎晓梅,吴雪雁. 大连市大型商场空气卫生质量调查[J]. 环境与健康杂志,2002,19(1):73-74
- [35] 曾秀林. 公共场所空气细菌污染状况及其影响因素调查[J]. 环境与健康杂志,1995,12(6):278
- [36] 王利辉,孙政,王红星. 青岛市城阳区商场超市空气卫生质量调查[J]. 职业与健康,2007,23(18):1639-1640
- [37] 陶晓燕. 深圳市公共场所室内空气 CO₂ 浓度监测及其探讨[J]. 河南预防医学杂志,1994,5(1):30-31
- [38] 武斌,刘玮,车志红. 太原市十家商场空调通风系统卫生状况的调查与分析[J]. 临床医药实践杂志,2007,16(12):1258-1259
- [39] 于慧芳,李心意,吕静,等. 家具城室内空气污染现状调查[J]. 环境与健康杂志,2000,17(4):224-226
- [40] 江燕涛,杨昌智. 大型商业中心空气质量和环境质量的主观调查[J]. 暖通空调,2005,35(12):106-109
- [41] 周宪君,赵岩,王嘉淇,等. 佳木斯市三大商场内空气质量评价[J]. 黑龙江医药科学,2006,29(4):70
- [42] 黄志甲,沈洁. 马鞍山市大型商场室内空气质量研究[J]. 暖通空调,2006,36(5):101-104
- [43] 黄明立,张志勇,覃倩萍. 某商场空气质量现状的调查[J]. 广西预防医学,1996,2(6):343-345
- [44] 杜向阳. 商场空气质量及噪声对从业人员健康影响的调查[J]. 实用预防医学,2000,7(3):214
- [45] 文远高,张丛丽,陈俭. 商场室内空气质量测试与分析[J]. 环境科学与技术,2006,29(11):48-51
- [46] 潘毅群,白玮,龙惟定,等. 上海某大商场空气品质调查[J]. 暖通空调,2000,30(3):18-20
- [47] 黎洪. 深圳市大型商场空气品质的测试与分析[J]. 洁净与空调技术,2006(1):56-59
- [48] 肖湧,吴祥生,熊学艺. 重庆地区商场 CO₂ 浓度测试[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2002,25(8):21-24
- [49] 洪玲,王玉茹. 信阳市综合性商场空气卫生学质量监测分析[J]. 中国公共卫生管理,2000,16(6):469-470
- [50] 乔建超,石福增,李霞,等. 济南市大型商场可吸入尘、细菌污染状况调查[J]. 预防医学文献信息,1999,5(3):300
- [51] 刘章现,罗领先,史丽娟. 大中型商场 PM₁₀、PM_{2.5} 污染水平与来源分析[J]. 中国环境监测,2007,23(1):

66-70

- [52] 裴清清,周志平,刘汉湘. 广州市大型商场室内环境状况调查[J]. 暖通空调,2006,36(5):112-115
- [53] 方敏,郭爱玲,郑华英,等. 2004 年武汉市公共场所室内空气微生物检测结果分析[J]. 武汉大学学报:理学版,2005,51(S2):263-265
- [54] 张素敏. 商场空气污染对从业人员健康的影响[J]. 实用预防医学,2002,9(3):245-246
- [55] 张永福,刘波,曹洪明. 室内空气甲醛污染度对人体健康影响的调查分析[J]. 黑龙江医药科学,1999,22(4):20
- [56] 赵双. 衡水市区家具商场空气中甲醛污染的调查[J]. 环境与健康杂志,2008,25(5):449
- [57] 刘英义,马吉民,吕跃林. 地下商场内部空气品质探析[J]. 建筑热能通风空调,2001,20(2):34-36
- [58] 孟广田,杨纯华. 地下空间病态建筑综合症调查及其诊治[J]. 暖通空调,2001,31(5):53
- [59] 耿世彬,连慧亮. 氡与室内空气环境[J]. 建筑热能通风空调,2001,20(6):49-51
- [60] 袁代光,宫丽虹,田致谦,等. 地下工程通风防氡及其计算方法[C]//全国暖通空调制冷 2004 年学术文集,2004:76-81
- [61] 邓勇庆,印木泉,张胜年. 地铁车站站台挥发性有机化合物污染调查[J]. 劳动医学,2001,18(4):219-221
- [62] 郭重山,杨铁骥,钟巍,等. 地铁站车务人员上呼吸系统疾病的环境因素调查[J]. 环境与健康杂志,2007,24(1):37-39
- [63] 莫伟文,王培杰,甘和平,等. 地下铁道车站内空气质量卫生学调查[J]. 上海预防医学杂志,2004,16(5):230-232
- [64] 陈玉婷,钟巍,马林,等. 广州地铁二号线运营前后车站空气质量状况分析[J]. 华南预防医学,2005,31(3):62-63
- [65] 黄蓓,江林丽,祝荣坚,等. 广州市地铁一号线运营前后各站 CO 和 CO₂ 浓度变化与分析[J]. 环境与健康杂志,2003,20(1):48-49
- [66] 唐漪灵,朱献忠,严惠琴,等. 上海地铁站空气微生物污染情况调查[J]. 中国卫生检验杂志,1999,9(4):292-294
- [67] 叶宝英,秦彦珉,张然,等. 深圳市地铁空气微生物检测结果分析[J]. 职业与健康,2005,21(12):2018-2019
- [68] 潘心红,孙兰,卢玉棋. 广州地铁空气中有害化学物质的监测分析[J]. 中国职业医学,2001,28(4):59-60
- [69] 刘昶,钱华,李德. 上海地铁车站空气中 CO₂ 浓度调查[J]. 上海环境科学,1999,18(7):306-308

- [70] 冯文如,钟巍,江思力,等. 广州地铁室内空气质量影响因素的探讨[J]. 热带医学杂志,2005,5(2):214-216
- [71] 王秀英,李思果,余淑苑,等. 深圳市地铁生物性病原污染基线调查[J]. 中国热带医学,2006,6(6):1066-1067
- [72] 曹勇. 地下空间热环境和空气品质测试报告[R]. 中国建筑科学研究院,2008
- [73] Chow W K. On ventilation design for underground car parks [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1995, 10(2): 225-245
- [74] 田利伟,张国强,刘建龙,等. 北京市某地下车库空气品质调查[J]. 建筑热能通风空调,2006,25(1):84-87
- [75] 陈国平,蒋颂辉. 地下车库汽车废气污染状况调查[J]. 上海环境科学,1999,18(8):374-375
- [76] 古剑清. 地下汽车库空气质量的调查与预防性卫生监督探讨[J]. 华南预防医学,2002,28(6):46-48
- [77] 葛风华,刘巽俊,刘晔,等. 地下停车库的空气污染与自然通风[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(3):696-700
- [78] 李晓燕,郑宝山,王燕,等. 我国不同类型地下工程中的氡水平[J]. 地球与环境,2006,34(4):61-65
- [79] 《福建质量信息》编辑部. 地下车库空气污染惊人[J]. 福建质量信息,2001(5):14
- [80] 张寅平,张立志,刘晓华,等. 建筑环境传质学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006
- [81] 王元元,张立志. 空气净化技术的研究与进展[J]. 暖通空调,2006,36(12):24-27,39
- [82] Yu B F, Hu Z B, Liu M. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(1): 3-20
- [83] 涂舫. 公共建筑集中空调通风系统污染控制方法的研究[D]. 上海:同济大学,2006
- [84] 刘道清. 空气过滤技术综述[J]. 环境科学与管理,2007,32(5):109-113
- [85] 涂光备. 纤维型空气滤料过滤效率的理论曲线及其分析[J]. 暖通空调,1983,13(4):25-30
- [86] 涂光备,张少凡. 纤维型滤料滤菌、滤尘效率关系的实验研究[J]. 洁净与空调技术,1994(3):13-15
- [87] 涂舫,刘燕敏,刘锦,等. 商场空调通风污染控制方法的分析[J]. 洁净与空调技术,2006(1):60-62
- [88] 刘德立,王志刚. 静电技术在空气净化中的应用[J]. 家用电器消费,2002(3):15
- [89] 程灯塔,刘刚. 静电净化装置在医院洁净空调系统中的应用[J]. 建筑热能通风空调,2005,24(1):87-91
- [90] 张博,王明连,耿彦生,等. 我国空气净化消毒方法研究进展[J]. 环境与健康杂志,2007,24(9):745-747
- [91] 李建兴,涂光备,涂岱昕. 室内微生物污染的三种工程控制方法[J]. 暖通空调,2004,34(12):29-33
- [92] 连轶军,李新武,赵斌秀,等. 空调系统中不同空气消毒方法消毒效果观察[J]. 中国消毒学杂志,2006,23(4):299-301
- [93] 方建龙,吴亚西,李新武. 不同消毒技术空气消毒效果及其影响因素研究进展[J]. 中国消毒学杂志,2007,24(4):368-370
- [94] 尹维东. 室内空气污染物的净化[J]. 环境污染治理技术与设备,2002,3(2):53-55
- [95] 立本英机,安部郁夫. 活性炭的应用技术[M]. 高尚愚,译. 南京:东南大学出版社,2002
- [96] 刘锦,刘燕敏,孙伟,等. 几种新型空气过滤器净化效果分析[J]. 洁净与空调技术,2007(1):40-42
- [97] 黄春松,黄翔,吴志湘. 空气负离子产生的机理研究[C]//第五届功能性纺织品及纳米技术研讨会,2005,373-379
- [98] 吴志湘,黄翔,黄春松,等. 空气负离子浓度的实验研究[J]. 西安工程科技学院学报,2007,21(6):803-806
- [99] 蔡杰,亢燕铭,刘俊杰. 空调与净化中一些概念的辨析[J]. 暖通空调,2003,33(6):34-39
- [100] 高立新,陆亚俊. 基于光催化技术的新型空气过滤器[J]. 建筑热能通风空调,2003,22(2):40-41
- [101] 王锡琴,霍海娥. 光催化技术室内空气净化器的研究[J]. 制冷与空调(四川),2006(4):50-52
- [102] 古政荣,陈爱平,戴智铭,等. 活性炭-纳米二氧化钛复合光催化空气净化网的研制[J]. 华东理工大学学报,2000,26(4):367-371
- [103] 高立新,陆亚俊. 室内空气净化器的现状及改进措施[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(2):199-201
- [104] Ao C H, Lee S C. Indoor air purification by photocatalyst TiO_2 immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(1):103-109
- [105] 古政荣,陈爱平,戴智铭,等. 空气净化网上光催化剂和活性炭相互增强净化能力的作用机理[J]. 林产化学与工业,2000,20(1):6-10
- [106] 赵丽宁,黄翔,杨建忠,等. 纳米光催化活性炭纤维净化空气初探[J]. 建筑热能通风空调,2005,24(4):35-37
- [107] 张益昭,曹国庆,梁磊,等. 超低阻高中效过滤器在健康快车通风空调系统改造中的应用[J]. 暖通空调,2009,39(4):65-67,98
- [108] 徐文华. 舒适性空调空气过滤器效率计算方法[J]. 暖通空调,2001,31(3):42-47