

中国近年 PM_{2.5} 污染研究进展 *

邹佳乐¹ 林尧林^{1*} 杨 薇²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 维多利亚大学工程与科学学院, 维多利亚 墨尔本 8001)

摘要 近年来雾霾天气在中国大面积频发, PM_{2.5} 已经成为中国大气颗粒物污染的首要污染物。对中国近年来 PM_{2.5} 的研究进展进行总结, 分析了城市大气及室内环境中 PM_{2.5} 的来源, 阐述了 PM_{2.5} 对大气能见度、人体健康及人们行为方式的影响, 介绍了室内外关于 PM_{2.5} 的相关性指标以及 PM_{2.5} 控制的最新技术等, 最后对相关研究前景进行分析并提出建议。

关键词 PM_{2.5} 影响 室内外 控制

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.03.021

Advances on PM_{2.5} pollution research in China in recent years ZOU Jiale¹, LIN Yaolin^{1*}, YANG Wei². (1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070; 2. College of Engineering and Science, Victoria University, Melbourne Victoria 8001)

Abstract: With the frequent occurrence of haze weather in large area across China, PM_{2.5} has become the main pollutant of air particulates in China. It was summarized the advances on PM_{2.5} study in China in recent years from the following aspects: the sources of PM_{2.5} in urban atmosphere and indoor environment, the influence of PM_{2.5} on atmospheric visibility, human health and the way of people behavior, the correlation of indoor and outdoor PM_{2.5} concentration, and the latest control technology of PM_{2.5}. Finally, the new insights on future researches of PM_{2.5} were explored and some proposals were put forward for the scholars in this area.

Keywords: PM_{2.5}; influence; indoor and outdoor; control

近年来, 以 PM₁₀、PM_{2.5} 为核心污染物的复合型雾霾天气在我国长时间、大范围爆发, 并表现出显著的区域性特征^[1]。我国对 338 个地级以上城市的空气质量监测结果显示: 2015 年, PM_{2.5} 年均质量浓度为 11~125 μg/m³, 平均值为 50 μg/m³, 在重度及以上污染的天数中, 以 PM_{2.5} 为首要污染物的天数占 66.8%; 2016 年, PM_{2.5} 年均质量浓度为 12~158 μg/m³, 平均值为 47 μg/m³, 在重度及以上污染的天数中, 以 PM_{2.5} 为首要污染物的天数占 80.3%, 可见 PM_{2.5} 已经成为我国大气污染的首要污染物^[2-3]。

本研究对我国近年来的 PM_{2.5} 研究进展进行总结, 分析了城市大气及室内环境中 PM_{2.5} 的来源, 阐述了 PM_{2.5} 对大气能见度、人体健康及人们行为方式的影响, 介绍了室内外关于 PM_{2.5} 的相关性指标以及 PM_{2.5} 控制的最新技术等, 最后对相关研究前景进行分析并提出建议。

1 PM_{2.5} 的来源

1.1 城市大气中的 PM_{2.5} 来源

目前, 用来解析大气颗粒物来源的方法主要有

排放源清单、源模型(扩散模型)和受体模型 3 种, 其中受体模型是我国 PM_{2.5} 源解析研究中最常用的手段^[4]。受体模型主要包括化学质量平衡模型法(CMB)、正定矩阵因子分解法(PMF)和因子分析法(FA)等。国内许多学者采用不同的方法对 PM_{2.5} 进行源解析工作(见表 1), 可以发现大部分研究的采样时间都是阶段性的, 虽然有的研究采样时间跨度很长, 但只是在各季节典型月进行采样, 由此得到的结论带有一定偶然性和不确定性, 但其结果在一定程度上还是能反映各地区 PM_{2.5} 的贡献源类。此外, 不同研究得到的 PM_{2.5} 来源及贡献率相差较大, 原因在于各研究的采样时间、贡献源分类、地区、气候、能源结构、大气环境等不尽相同。因此, 有必要进一步对其来源进行长期持续的分析, 以保证测量数据的可靠性。

1.2 室内环境中的 PM_{2.5} 来源

1.2.1 室外源

室内与室外的 PM_{2.5} 浓度存在密切的相关性, 一般认为室外 PM_{2.5} 是室内 PM_{2.5} 污染的主要来源^[13]。

第一作者: 邹佳乐, 女, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为大气环境及建筑环境污染。* 通讯作者。

* 湖北省自然科学基金资助项目(No.2017CFB602)。

表1 PM_{2.5}源解析模型及解析结果
Table 1 Modeling methods and analysis on sources of PM_{2.5}

模型方法	研究地点	采样时间	PM _{2.5} 的主要来源 ¹⁾	参考文献
CMB	宁波市	2010年3月15—24日、 6月1—9日、12月10—19日	城市扬尘(20.42%)、煤烟尘(14.37%)、机动车尾气尘(15.15%)	[5]
	天津市	2010年5月13—20日、 10月20—27日、12月19—26日	开放源(城市扬尘、土壤尘和建筑水泥尘,40.0%)、二次粒子(28.0%)、煤烟尘(19.6%)和机动车尾气尘(15.9%)	[6]
	重庆市	2012年2月6—28日、8月6—28日、 10月19—27日、12月7—29日	二次粒子(30.1%)、移动源(27.9%)	[7]
PMF	武汉市	2011年6月27日至7月17日	燃煤源(18%)、路面扬尘(27%)、工业源(7%)、交通源(29%)、残油燃烧(19%)	[8]
	成都市	2009年4月29日至5月17日、 7月6日至8月6日、 10月26日至11月26日、 2010年1月1—31日	土壤尘及扬尘(14.3%)、生物质燃烧(28.0%)、机动车源(24.0%)和二次硝酸盐/硫酸盐(31.3%)	[9]
	深圳市	2009年1—12月	二次硫酸盐(30.0%)、机动车排放(26.9%)、生物质燃烧(9.8%)和二次硝酸盐(9.3%)	[10]
	华北地区	2014年1月3日至2月11日	煤燃烧(29.6%)、生物质燃烧(19.3%)、车辆排放(15.9%)	[11]
FA	北京市	2013年1月16日至2月28日	工业粉尘与人为活动污染源(40.3%)、生物质燃烧和建筑尘污染源(27.0%)、土壤及风沙扬尘源(9.1%)、化石燃料污染源(4.9%)、电子废弃物污染源(4.8%)和区域性迁移污染源(4.6%)	[12]

注:1)括号中的数据为贡献率。

WANG等^[14]发现,在气密性正常、没有任何空调过滤系统的房间里,室内与室外PM_{2.5}质量浓度比(I/O比)高达0.867,室内的PM_{2.5}浓度与室外PM_{2.5}浓度具有显著相关性,若室外PM_{2.5}污染严重时,相关性会更加明显。JI等^[15]指出,当窗户关闭时,室内PM_{2.5}有54%(质量分数,下同)~63%来源室外,当窗户打开时,该比例高达92%。HAN等^[16]认为,室内PM_{2.5}浓度与室外PM_{2.5}浓度显著相关,但有1~2 h的延迟,其具体差异可以通过环境气象特征,如温度、湿度、风向等来解释。因此,有必要对相关性及延迟性进行详细研究从而进一步明确室内外PM_{2.5}浓度的关系。

1.2.2 室内源

PM_{2.5}的室内源种类较多,主要来自燃料燃烧、人员活动、设备使用、清扫、烹饪等。室内燃料(如煤、天然气、蚊香等)的燃烧会导致室内PM_{2.5}的剧增。LI等^[17]发现,使用煤炭做饭时,室内PM_{2.5}浓度偏高,若将煤炭更换为燃气或电力,可使厨房PM_{2.5}减少40%~70%。ZHOU等^[18]指出,人类活动如行走、穿衣和清扫等,可使室内PM_{2.5}增加33%。孙欢等^[19]发现,打印机对室内PM_{2.5}浓度有一定贡献,且不同性能打印机的PM_{2.5}释放量有较大差异。

2 PM_{2.5}的影响

2.1 PM_{2.5}对大气能见度的影响

近年来我国大气能见度急剧恶化,有学者认为

这与大气中PM_{2.5}浓度的升高密切相关^[20]。个别气象参数如相对湿度^[21]对PM_{2.5}与大气能见度的关系有明显影响。郝巨飞等^[22]指出,PM_{2.5}质量浓度与大气能见度在相对湿度≤19%时呈对数关系;相对湿度介于20%~29%时呈指数关系;相对湿度≥30%时呈乘幂关系。然而,WANG等^[23]却提出了不同看法,他们认为PM_{2.5}质量浓度与大气能见度不相关,PM_{2.5}能够影响大气能见度是由于不同季节PM_{2.5}的化学成分和气象参数的不同导致。未来应对PM_{2.5}浓度、气象要素进行长期观测研究,进一步揭示PM_{2.5}浓度及其他气象因素对大气能见度的影响。

2.2 PM_{2.5}对人体健康的影响

国外有大量流行病学研究证明,PM_{2.5}对人体健康有明显副作用^[24]。我国关于PM_{2.5}与人体健康关系的研究也充分证明这一点,PM_{2.5}能提高肺心病^[25]、呼吸疾病^[26]、心血管病^[27]、癌症^[28]等疾病的发病率,甚至增加死亡风险^[29]。还有学者针对特定人群进行研究,如李成橙等^[30]研究了孕妇妊娠期PM_{2.5}暴露与新生儿体重的关系。陈姣娥等^[31]通过比较过敏与非过敏儿童暴露于室内PM_{2.5}环境中细胞的毒性结果显示,儿童的过敏症与室内PM_{2.5}组分及含量有潜在关联。涂宏^[32]指出,南昌市城区的PM_{2.5}对儿科呼吸系统疾病门诊量的增加有关,其最大累积滞后效应天数是5 d,大气PM_{2.5}每升高10 μg/m³,呼吸系统疾病门诊量就增加0.43%。此

外, $PM_{2.5}$ 还能影响人们的心理健康,长期处于阴霾的天气易使人情绪低沉,严重情况下还可能诱发抑郁症,但我国目前尚未有 $PM_{2.5}$ 对人们心理健康影响的相关研究。现代文明的发展使心理疾病逐渐增多并恶化,针对 $PM_{2.5}$ 对人们心理健康影响问题的研究已箭在弦上。

2.3 $PM_{2.5}$ 对人们行为方式的影响

$PM_{2.5}$ 被认为是造成雾霾天气的主要因素,其在损害人们身体健康的同时,也影响了人们生活的方方面面。首先,应对多发的雾霾天气,顾金土等^[33]发现,在雾霾天气下居民出行多会使用口罩,并根据外部空气状况调整自身的户外活动情况或更换交通工具。居民会改变其开窗行为,如开窗时间、开窗大小等阻止 $PM_{2.5}$ 进入室内^[34]。其次,雾霾天气下,部分景区的风景效果受到破坏,影响游客的出游决策^[35]。

3 室内外 $PM_{2.5}$ 的相关性

室外 $PM_{2.5}$ 能通过 3 种机制进入室内,包括自然通风、机械通风和渗透通风,有效评价室内受室外 $PM_{2.5}$ 污染的程度十分重要,目前有许多学者致力于研究室内外 $PM_{2.5}$ 污染研究^[36]8-13,并将 I/O 比、渗透系数作为评价室内受室外 $PM_{2.5}$ 污染的重要参数。

3.1 I/O 比

有关 I/O 比的研究大多基于现场数据实测,并主要在自然通风和渗透通风条件下进行。从表 2 可见,不同研究中得到的 I/O 比差别很大,这与实测地点室外污染水平、室外气象条件、室内污染源、建筑围护结构自身条件以及换气次数等因素有关。王清勤等^[36]10 指出,室内 $PM_{2.5}$ 浓度受室外 $PM_{2.5}$ 浓度的影响程度与外窗气密性有关,相同室外 $PM_{2.5}$ 浓度

条件下,气密性好的外窗对室外 $PM_{2.5}$ 的阻隔作用较强。后续研究可尝试建立详细物理模型,对不同影响因素的差异性做进一步分析。

3.2 渗透系数

李国柱^[41]对人们在雾霾天气下开窗行为进行调查,发现当室外出现明显雾霾时,近 60% 的受访者选择关闭窗户,以防止室外 $PM_{2.5}$ 进入室内环境。在关闭门窗的情况下, $PM_{2.5}$ 经由围护结构缝隙渗透是进入室内的主要途径。国外许多学者通过实验实测获取 $PM_{2.5}$ 的渗透系数。THATCHER 等^[42]发现,渗透系数随 $PM_{2.5}$ 粒径的减小而增大。我国也有学者对渗透系数做了相关研究,这些研究主要集中于探讨影响颗粒物渗透系数的一些影响因素,如缝隙高度^[43]、缝隙内表面粗糙度^[44]、室内外压差^[45]、裂缝几何形状^[46]、换气次数^[47]等。由于技术设备和测试条件限制,目前我国仅有少量的研究单独针对 $PM_{2.5}$ 的渗透系数。李国柱等^[48]在前人研究的基础上,考察了多因素下 $PM_{2.5}$ 的外窗渗透系数。

4 室内 $PM_{2.5}$ 的控制

4.1 空调过滤器的组合建议

在室外 $PM_{2.5}$ 污染短期内难以得到根治的情况下,应尽量控制室内空气中 $PM_{2.5}$ 浓度水平,减少由于室内 $PM_{2.5}$ 污染对人体健康造成损伤。曹国庆等^[49]建立了室内 $PM_{2.5}$ 污染控制通风模型,通过实例计算给出了集中空调系统空气过滤等级建议。涂有等^[50]在相同的实验条件下得到不同材质、不同过滤效率的多台空气过滤器的计数径过滤效率和 $PM_{2.5}$ 计重过滤效率数据,并以此为基础,分析两种过滤效率之间的关系,为空调通风系统针对室

表 2 不同通风条件下的 I/O 比
Table 2 I/O ratios under different ventilation mode

通风类型	取样时间	建筑功能	I/O 比影响因素	部分主要结论	参考文献
自然通风	2013 年 12 月 1 日至 2014 年 2 月 28 日	住宅	室外 $PM_{2.5}$ 质量浓度	室外 $PM_{2.5}$ 分别为 0~33、34~65、66~129、 ≥ 130 $\mu g/m^3$ 时, I/O 比分别为 1.75、1.05、0.76、0.63	[37]
	2015 年 4—12 月	学校	室外 $PM_{2.5}$ 质量浓度、换气次数、室外风速、室外温度	时均 I/O 比为 0.69, 变化范围为 0.10~5.46, I/O 比随室外 $PM_{2.5}$ 质量浓度升高呈下降趋势	[38]
	2014 年 3 月 13—15 日 (9:00—18:00)	实验综合楼	换气次数	I/O 比在 0.90~1.2	[39]
渗透通风	2013 年 9 月至 2014 年 8 月	办公楼	室外干球温度、相对湿度、风速	换气频率平均值分别为 0.10(静稳天气)、0.22(2 级风力)、0.39(4 级风力) h^{-1} 时, 其对应 I/O 比分别为 0.43、0.56、0.62	[40]
	2014 年冬季	住宅	室内污染源	当室内 $PM_{2.5}$ 浓度达到峰值时, I/O 比为 0.67~0.89	[18]

内 $PM_{2.5}$ 计重浓度的空气过滤器选型提供初步依据。这些学者的研究成果只能用于中央空调建筑的新风系统中,而目前中国的住宅式建筑大多采用分体式空调器系统,没有配备新风系统,此时面对室外 $PM_{2.5}$ 污染仅采取简单的紧闭门窗措施并不能减缓其对室内的污染,国内针对此方面的研究仍是空白,亟需未来解决。

4.2 新型过滤材料的开发

部分学者致力于新型过滤材料的开发以减缓室内 $PM_{2.5}$ 污染。ZHAO 等^[51]通过电纺聚偏氟乙烯纤维(PVDF)掺杂负离子粉(NIPs)制备高效低阻的空气净化材料,在雾霾天气下其对 $PM_{2.5}$ 的净化效率高达 99.9%。ZHANG 等^[52]利用聚酰亚胺纳米纤维的高热稳定性发明了高效聚酰亚胺纳米纤维空气过滤器,在高温下对汽车尾气中 $PM_{2.5}$ 的去除率达到 99.5%。这些过滤材料具有较高 $PM_{2.5}$ 捕获能力,若将其广泛运用于空调过滤系统中,其对室内 $PM_{2.5}$ 污染情况会大幅度缓解。然而,基于我国目前的基本国情,上述材料制作的初投资较高,在我国大范围推广并不现实,后期研究者应找到折中方法,既能满足净化 $PM_{2.5}$ 需求且有条件进行大范围推广。

4.3 除 $PM_{2.5}$ 的家用空调及空气净化器

4.3.1 家用空调

随着生活水平的提高,人们对改善空气质量的要求日渐提高,这为家用空调产品的创新升级提供动力,国内空调市场涌入了一批能去除 $PM_{2.5}$ 的空调,其代表性技术有可水洗净化模版+电力场吸附集尘、可视化捕捉、电荷吸附电场集尘等。与一般空调相比,有去除 $PM_{2.5}$ 功能空调的价格会高出 30% 以上。同时,由于高效过滤器的使用,使得空调风道阻力增大,风机能耗增大。曾江月等^[53]对采用粗、中两级过滤器的空调系统进行模拟,其风机能耗较采用一级粗效过滤器时增加了 35.06%、51.3%。此外,随着过滤器的使用其清洁度随之变差这也会使风机能耗增大,其最高可以使风机能耗增高 30%^[54],但我国目前在这方面鲜有研究,这是未来一个值得研究的方向。

4.3.2 空气净化器

空气净化器也是目前人们去除室内 $PM_{2.5}$ 常用的产品,其独立于空调系统,不具有调节温湿度的功能。长时间的雾霾天气促进了空气净化器产品的发展,其行业品牌从 2013 年的 151 个上升至 2014 年的 556 个^[55]。《空气净化器》(GB/T 18801—2015)明确了影响空气净化器净化效果的 4 项核心指标为

洁净空气量(CADR)、累计净化量(CCM)、能效等级及噪音标准,对市场上的空气净化器进行规范。空气净化器按使用类别可分为家用型、车载型、桌面型和新风机 4 种。其中,新风机及家用型空气净化器功率较高。空气净化器采用的技术与除霾空调相似,有高效过滤网过滤、静电集尘、负离子除尘技术等。各种技术各有其优缺点,如实际运行中的风速远高于高效过滤器合适工作速度,静电除尘及负离子除尘技术去除甲醛、苯系物、总挥发性有机碳(TVOC)等化学污染效果不佳,静电除尘容易产生臭氧等。因此,使用时必须仔细选择。目前,我国对于空气净化器的研究主要集中在设备的开发方面,此外还有少量学者对空气净化器在室内的净化作用进行了研究。殷路^[56]表示,对于来自室内的污染物,送风速度是影响室内净化效果的主要因素,而对于来自室外的污染物净化器对室内空气的最终净化效果主要由其本身的净化效率、循环风量以及进入室内的污染物总量有关。

5 结 语

近年来,我国制定了有关 $PM_{2.5}$ 的空气质量标准并在全中国范围内逐步建立 $PM_{2.5}$ 观测站,因此国内对 $PM_{2.5}$ 的研究呈指数增长,且与越来越多的学科交叉。然而相比发达国家,我国对 $PM_{2.5}$ 的研究仍处于起步阶段,未来还需在以下方面进行深入研究:(1) $PM_{2.5}$ 源解析是当前研究工作的一个热点,目前研究采用的方法存在数据采集不持续或持续时间不够长的缺点,使得研究结果带有偶然性成分,甚至同一地方的研究结果差别较大。可通过全国性 $PM_{2.5}$ 观测站的建立及观测数据库的完善解决上述问题,更全面揭示室外 $PM_{2.5}$ 的来源问题。(2) $PM_{2.5}$ 对人体健康的影响方面研究非常丰富,但在 $PM_{2.5}$ 对心理健康方面的研究严重匮乏,需要进一步加强。(3)在室内外污染相关性的研究大多基于具体某个建筑,即特定的物理条件和气象条件,因此无法在更普遍的情况下使用。建议建立相应的计算流体力学(CFD)模型、区域模型及多区模型做进一步研究以揭示不同研究结果的差异性。(4)室内空气 $PM_{2.5}$ 监测方面的研究略显不足,这可能与我国目前还没有明确室内 $PM_{2.5}$ 污染浓度限值,入户监测成本高,不易开展长时间、标准化、大样本量的采样和监测等有关,建议后续开展相关研究确定室内污染浓度标准。(5)在污染控制方面,存在过滤材料价格过高、除霾空调及空气净化器成本高、能耗较大等问题。

未来应开发低成本、高效过滤材料以及低能耗净化空调及空气净化器,有效降低室内 PM_{2.5} 浓度。

参考文献:

- [1] 张生玲,王雨涵,李跃,等.中国雾霾空间分布特征及影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2017,27(9):15-22.
- [2] HE K B, YANG F M, MA Y L, et al. The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(29):4959-4970.
- [3] 朱易,胡衡生,张新英,等.南京市大气颗粒物 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 污染水平研究[J].环境污染与防治,2004,26(3):176-178.
- [4] 胡敏,唐倩,彭剑飞,等.我国大气颗粒物来源及特征分析[J].环境与可持续发展,2011(5):15-19.
- [5] 叶文波.宁波市大气可吸入颗粒物 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的来源解析研究[J].环境污染与防治,2011,33(9):66-69.
- [6] 唐遵.天津市环境空气 PM_{2.5} 来源解析[D].天津:南开大学,2014.
- [7] 任丽红,周志恩,赵雪艳,等.重庆主城区大气 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 来源解析[J].环境科学研究,2014,27(12):1387-1394.
- [8] 肖经汗,周家斌,郭浩天,等.采用正定矩阵因子分解法对武汉市夏季某 PM_{2.5} 样品的来源解析[J].环境污染与防治,2013,35(5):6-12.
- [9] 张智胜,陶俊,谢绍东,等.成都城区 PM_{2.5} 季节污染特征及来源解析[J].环境科学学报,2013,33(11):2947-2952.
- [10] 黄晓峰,云慧,宫照恒,等.深圳大气 PM_{2.5} 来源解析与二次有机气溶胶估算[J].中国科学:D 辑 地球科学,2014,44(4):723-734.
- [11] ZONG Z, WANG X, TIAN C, et al. Source apportionment of PM_{2.5} at a regional background site in North China using PMF linked with radiocarbon analysis: insight into the contribution of biomass burning[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(17):11249-11265.
- [12] 陈曦,杜鹏,关清,等.ICP-MS 和 ICP-AES 用于北京雾霾天气 PM_{2.5} 来源解析研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(6):1724-1729.
- [13] 黄虹,李顺诚,曹军骥,等.广州市夏、冬季室内外 PM_{2.5} 质量浓度的特征[J].环境污染与防治,2006,28(12):956-958.
- [14] WANG F, MENG D, LI X, et al. Indoor-outdoor relationships of PM_{2.5} in four residential dwellings in winter in the Yangtze River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 215:280-289.
- [15] JI W, ZHAO B. Contribution of outdoor-originating particles, indoor-emitted particles and indoor secondary organic aerosol (SOA) to residential indoor PM_{2.5} concentration: a model-based estimation[J]. Building and Environment, 2015, 90:196-205.
- [16] HAN Y, QI M, CHEN Y, et al. Influences of ambient air PM_{2.5} concentration and meteorological condition on the indoor PM_{2.5} concentrations in a residential apartment in Beijing using a new approach[J]. Environmental Pollution, 2015, 205:307-314.
- [17] LI T, CAO S, FAN D, et al. Household concentrations and personal exposure of PM_{2.5} among urban residents using different cooking fuels[J]. Science of the Total Environment, 2016, 548/549:6-12.
- [18] ZHOU Z, LIU Y, YUAN J, et al. Indoor PM_{2.5} concentrations in residential buildings during a severely polluted winter: a case study in Tien, China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 64:372-381.
- [19] 孙欢,林志平,毛华雄.激光打印机 PM_{2.5} 释放量的实验研究[J].建筑热能通风空调,2016,35(11):44-48.
- [20] 卢慧剑,金均,王琼真,等.杭州市大气 PM_{2.5} 消光特性研究[J].环境污染与防治,2016,38(9):53-56.
- [21] 张浩,石春娥,吴必文,等.合肥市能见度与相对湿度、PM_{2.5} 质量浓度的定量关系[J].生态环境学报,2017,26(6):1001-1008.
- [22] 郝巨飞,张功文,杨允凌.大气能见度及影响因子特征分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(4):160-164.
- [23] WANG J, ZHANG Y, SHAO M, et al. Quantitative relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing[J]. Journal of Environmental Science, 2006, 18(3):475-481.
- [24] CHURG A, BRAUER M. Human lung parenchyma retains PM_{2.5} [J]. American Journal of Respiratory & Critical Care Medicine, 1997, 155(6):2109-2111.
- [25] 徐建军,张志红,耿红,等.不同工作环境人群 PM_{2.5} 暴露水平与肺功能的研究[J].环境与健康杂志,2013,30(1):1-4.
- [26] XING Y, XU Y, SHI M, et al. The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system [J]. Journal of Thoracic Disease, 2016, 8(1):69-74.
- [27] 段艺珠,黄志军,舒志浩,等.PM_{2.5} 污染与心血管系统损害[J].中华心血管病杂志,2014,44(2):179-182.
- [28] YE H L, HSU S W, CHANG Y C, et al. Spatial analysis of ambient PM_{2.5} exposure and bladder cancer mortality in Taiwan[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(5):508-521.
- [29] SONG C, HE J, WU L, et al. Health burden attributable to ambient PM_{2.5} in China [J]. Environment Pollution, 2017, 223:575-586.
- [30] 李成橙,路凤,刘迎春,等.妊娠期 PM_{2.5} 暴露与新生儿低出生体重的 meta 分析[J].环境与健康杂志,2017,34(1):38-42.
- [31] 陈姣娥,武阳,焦铭,等.过敏与非过敏儿童的室内 PM_{2.5} 的细胞毒性比较研究[J].环境科学学报,2018,38(1):407-415.
- [32] 涂宏.南昌市城区 PM_{2.5} 的污染特征及其与儿童健康关系的研究[D].南昌:南昌大学,2016.
- [33] 顾金士,谢花.南京居民的雾霾风险认知及应对行为调查研究[J].环境科学与管理,2015,40(3):187-189.
- [34] SHI S, ZHAO B. Occupants' interaction with windows in 8 residential apartments in Beijing and Nanjing, China [J]. Building Simulation, 2015, 9(2):221-231.
- [35] 南宇,孙建飞.雾霾对游客出游决策的影响探讨[J].广州大学学报(社会科学版),2015,14(10):35-41.
- [36] 王清勤,李国柱,孟冲,等.室外细颗粒物(PM_{2.5})建筑围护结构穿透及被动控制措施[J].暖通空调,2015,45(12).
- [37] 谢伟,樊越胜,黄亦平,等.自然通风室内外 PM₁₀、PM_{2.5}、PM_{1.0} 污染特征[J].洁净与空调技术,2015(3):51-55.
- [38] 张敏,钱华,郑晓红,等.南京某幼儿园室内外细颗粒物(PM_{2.5})质量浓度调查及影响因素分析[J].暖通空调,2016,46(6):20-25.
- [39] 陈超,万亚丽,陈紫光,等.基于大气 PM_{2.5} 污染的建筑外窗缝隙通风次数动态变化特性[J].北京工业大学学报,2017,43(2):285-293.
- [40] 赵力,陈超,王平,等.北京市某办公建筑夏季室内 PM_{2.5} 浓度变化特征[J].建筑科学,2015,31(4):32-39.

(下转第 366 页)