

基于过滤浓度日数的新风 PM_{2.5} 过滤负荷特性研究

张承全, 高 军, 曾令杰, 叶 蔚

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 200092)

摘要: 我国建筑环境 PM_{2.5} 过滤或净化计算方法研究已引起广泛关注. 针对我国不同区域新风 PM_{2.5} 过滤负荷差异及变迁, 引入不保证天数法, 计算确定了各地区 PM_{2.5} 新风设计负荷; 类比空调度日数和采暖度日数提出过滤浓度日数 F_{CD} 的概念; 根据各地 PM_{2.5} 动态浓度数据及其室内标准浓度, 计算得到了历年全国省会及直辖市的 F_{CD}; 利用统计学方法获得了各地区 F_{CD} 和新风设计负荷的关系. 研究表明, F_{CD} 指标清晰地反映了全国各地新风 PM_{2.5} 设计计算负荷水平; F_{CD} 值与新风设计负荷表现为高度线性相关, 显著性水平 $P < 0.01$; 可用 F_{CD} 来直接指示建筑 PM_{2.5} 的新风设计负荷水平, 可为将来新风 PM_{2.5} 过滤系统设计、对比提供简单直观的依据.

关键词: PM_{2.5}; 过滤浓度日数; 新风过滤; 过滤负荷; 不保证天数

中图分类号: TU834.8

文献标志码: A

Filtering Load of Outdoor PM_{2.5} for Buildings Based on Concept of Filtering Concentration Days

ZHANG Chengquan, GAO Jun, ZENG Lingjie, YE Wei

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Filtering loads of outdoor PM_{2.5} for all province capital of China are determined with the method of unguarantee days. The concept of filtering concentration days (FCD) is proposed with the analogy of the cooling degree days (CDD) and heating degree days (HDD). Based on PM_{2.5} concentrations dynamic data and the base concentration, the FCDs of all province capital are calculated. The relationship between FCD and the filtering load of outdoor PM_{2.5} is analyzed with a statistical way. The result shows, FCD is highly linear correlated with the filtering load of outdoor PM_{2.5} with $P < 0.01$. And FCD can be used as the climatic indicator of the demand for filtering services. Besides, it can

provide a straightforward basis for the filtering system design.

Key words: PM_{2.5}; filtering concentration days; filtering of outdoor air; filtering load; unguarantee days

近几年,我国多数大中城市出现严重雾霾天气,造成这种现状的主要污染物是大气颗粒物 PM_{2.5}. 2009 年,中国的环保部门对灰霾天进行了试点监测,结果显示 2009-01-01—2009-12-31,各试点城市发生灰霾的天数在 51—211 d^[1]. 2013 年初,我国中东部地区出现长时间、大范围、重污染的雾霾天气,覆盖范围近 270 万 km²,影响人口约 6 亿^[2]. 雾霾污染最严重时,北京 PM_{2.5} 小时浓度最大值为 680 μg · m⁻³. 2015 年入冬以来,沈阳、北京和长春等城市空气质量多次达到严重污染程度,北京市空气重污染应急指挥部在 2015 年 12 月就发布了 2 次(7 日和 18 日)空气重污染红色预警指令^[3-4].

室外 PM_{2.5} 浓度升高,严重危害人体健康. PM_{2.5} 粒径小,比表面积大,为一些化学物质、细菌和病毒提供了载体. 对人体的危害至少包括以下几方面:降低心肺功能、损害神经系统、增加致癌率. Linares 发现大气中 PM_{2.5} 每增加 10 μg · m⁻³,儿童的健康相对危险度增加 1.03%^[5]. DOCKERY 发现 PM_{2.5} 每增加 10 μg · m⁻³,25~74 岁市民的死亡率增加 14%^[6]. POPE 等发现大气中 PM_{2.5} 每增加 10 μg · m⁻³,所有疾病死亡率、肺心病死亡率和肺癌死亡率分别增加 4%、6%和 8%^[7].

当雾霾发生时,人们大多会留在室内,但是房间并不一定可以作为防霾的“避风港”. 程鸿等人研究了北京秋季室内外 PM_{2.5} 的相关性,结果表明,PM_{2.5} 平均室内外浓度比 I/O 为 0.85;当室内没有明显污染源,大约有 78% 的室内颗粒物来源于室

收稿日期: 2016-10-31

基金项目: 中央高校基本科研业务经费专项资金(1000219177)

第一作者: 张承全(1989—),男,博士生,主要研究方向为室内空气品质. E-mail: 1162990559@qq.com

通讯作者: 高 军(1977—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为室内空气品质. E-mail: gaojun-hvac@tongji.edu.cn

外^[8]. 门窗紧闭无机械通风时,加利福尼亚和新泽西室外源对室内 PM2.5 的贡献率分别为 63% 和 52%^[9]. 高军等人发现无明显室内污染源时,室内外 PM2.5 平均 I/O 比值为 0.67 ± 0.17 ^[10]. 室外 PM2.5 进入室内的主要途径为空调新风系统、自然通风、围护结构缝隙穿透以及人员携带等. 空调新风系统中配置过滤器可以有效降低室内颗粒物浓度,提高室内空气品质,其中涉及的关键问题就是新风负荷. 目前已有学者对过滤器过滤效率进行了研究^[3,11-12],但缺少对新风负荷特性的研究,而且 PM2.5 新风负荷各地区分布特征尚不明确. 本文基于不保证天数的概念确定了新风负荷的计算方法;类比供热空调设计中的采暖度日数(HDD)和空调度日数(CDD)对建筑能耗的指示意义,提出了过滤浓度日数来反映新风负荷特性,分析了全国各城市的新风过滤负荷分布规律.

1 PM2.5 新风设计负荷

PM2.5 负荷即为单位时间内为保持一定室内 PM2.5 浓度,空气处理设备应去除的 PM2.5 量. 根据室内 PM2.5 来源^[13],PM2.5 负荷相应地可分为新风负荷、渗透负荷和室内污染源负荷,对同一建筑而言其分别取决于新风量、渗透风量和穿透因子、室内污染源. 以办公楼为例,分析室内三种 PM2.5 来源的相对大小. 分析新风负荷时,需确定新风量. 根据相关规范,查得普通办公室的人均最小使用面积^[14]和人均最小新风量^[15]分别为 4 m^2 和 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;假定建筑层高为 3 m,可得其换气次数为 2.5 h^{-1} . 分析渗透负荷时,需确定渗透风量和穿透因子. 当门窗紧闭无机械通风时,办公建筑的换气次数介于 $0.1 \sim 0.6 \text{ h}^{-1}$ 之间^[15],平均值约为 0.4 h^{-1} ;Tung 等人发现当办公室夜间室内无颗粒源并且关闭通风系统时, $0.43 \sim 10 \mu\text{m}$ 的颗粒的穿透系数在 $0.69 \sim 0.86$ 的范围内变化^[16]. 根据以上数据,经计算可知办公建筑 PM2.5 新风负荷至少是渗透负荷的 6.25 倍. 当开启新风系统时,室内压力增加,导致上述门窗缝隙通风量和颗粒物穿透系数大幅减小. 因此相比于 PM2.5 新风负荷,办公室的渗透负荷可忽略. 室内污染源负荷中,复印机和激光打印机是最主要的两类颗粒物发生源^[17]. 此发生源受人员行为和人员活动影响较大,室内污染源负荷难以定量分析,这里不做考虑. 本文侧重新风负荷分析,忽略室内污染源与本文内容并不矛盾. 在确定室内污染源造成的

PM2.5 负荷之后,将其与新风负荷叠加即可得到 PM2.5 负荷. 关于其他类型的建筑,上述分析也可做参考. 计算分析 PM2.5 新风负荷对于过滤器和空气净化器的选型,滤料使用周期的确定、过滤能耗分析均具有重要意义.

由 PM2.5 新风负荷(Particle Matter Load of Outdoor)定义可得计算公式如下:

$$L_{\text{pm}} = Q_0 \times (C_0 - C_i) \quad (1)$$

其中, L_{pm} 为 PM2.5 新风负荷; C_i 为稳定平衡时的室内 PM2.5 污染浓度; C_0 为室外空气 PM2.5 污染浓度; Q_0 为新风量. 当以上参数取设计参数时,即可得 PM2.5 新风设计负荷.

由公式(1)可知,计算 PM2.5 新风设计负荷需确定参数新风量 Q_0 、PM2.5 室外设计浓度、PM2.5 室内设计浓度. 这里需要注意的是新风负荷指的是,由新风系统带入房间的 PM2.5 量;而新风承担负荷指的是,将新风 PM2.5 处理到目标浓度需去除的 PM2.5 量. 后者往往比前者要大.

1.1 新风量的确定

目前我国最小新风量的确定综合考虑了人员污染和建筑污染^[18]. 前者主要针对 CO_2 浓度控制要求而确定,后者则考虑了大量新型建筑材料、装饰材料、清洁剂和粘结剂等的使用. 新风量可参考 GB50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中各类建筑的最小新风量指标. 本文为方便工程套算,取新风量为 $1\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

1.2 室外 PM2.5 设计浓度的确定

目前并没有国家标准和相关机构对室外 PM2.5 设计浓度进行明确规定. 在 PM2.5 控制和过滤系统设计的研究中,PM2.5 室外计算浓度均为试算值,如年均值、最高值等. 过滤系统的设计与建筑结构的设计不同. 建筑结构设计的目的在于提供居住、生产和科研的场所,因此要求几乎绝对的保证^[19]. 与供热空调设计的目的类似,一般民用建筑的过滤系统是为了提供良好的室内空气品质,如果室内 PM2.5 浓度在短时间内偏离设计要求,并不会造成太大的损失和危害. 因此可按不保证的概念确定室外 PM2.5 设计浓度. 国外确定颗粒物室外设计浓度和国外确定供暖空调室外参数的偏好相同,均采用不保证率的方法,Carlson 将瑞典斯德哥尔摩全年 PM10 的 98% 浓度值作为过滤器的室外计算浓度^[20];美国、日本等地区则采用不保证率为 5% 的 PM2.5 日平均浓度作为设计浓度^[12]. 而我国偏好不保证天数的方法,参考供热空调设计中室外参数的确定,本文分析

了 PM_{2.5} 历年最高日平均浓度、最高年不保证 5 d 的日平均浓度、历年平均不保证 5 d 的日平均浓度、累年最高月平均浓度、历年年平均浓度作为室外 PM_{2.5} 设计浓度的优劣。

根据《关于实施〈环境空气质量标准〉(GB 3095—2012)的通知》，可知从 2013 年京津冀、长三

角、珠三角等重点区域以及直辖市和省会城市才开始建立 PM_{2.5} 监测站,其他城市则更晚. 本文从环保局获取了各省会直辖市 PM_{2.5} 浓度数据,计算得出上述值并比较这些参数之间小时不保证率的区别. 如图 1、2 所示。

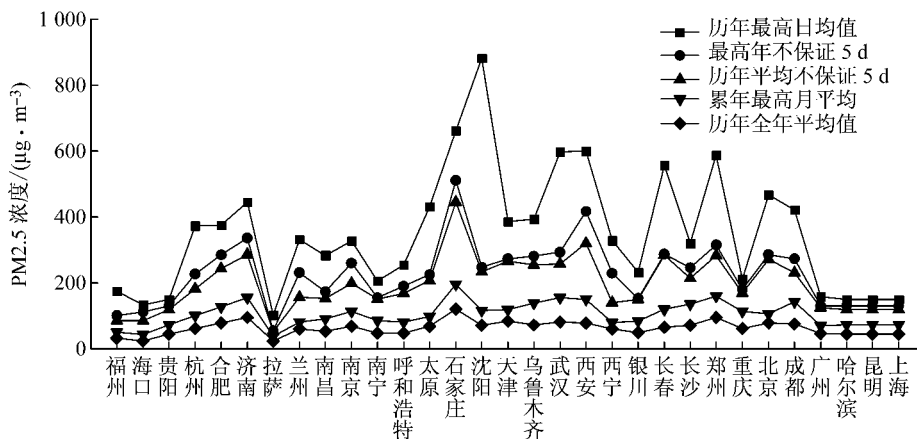


图 1 不同方法确定的室外 PM_{2.5} 设计浓度

Fig.1 The design concentrations of outdoor PM_{2.5} with different methods

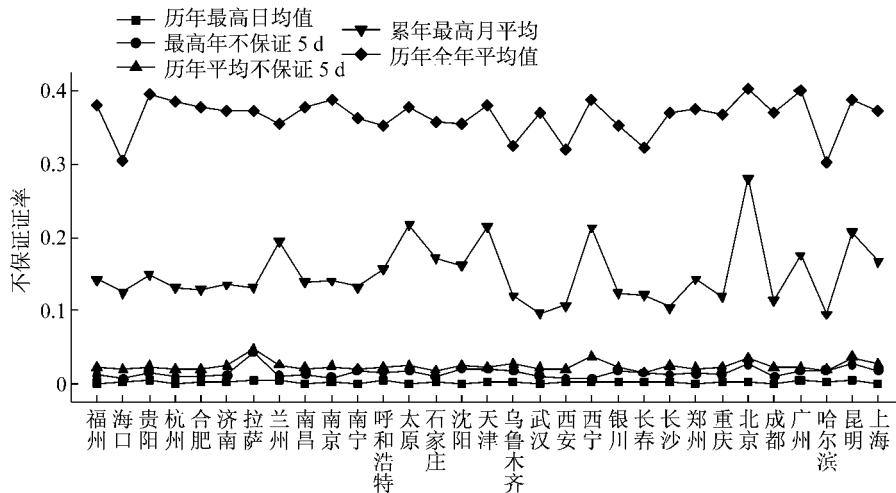


图 2 不同方法确定的室外 PM_{2.5} 设计浓度下的不保证率

Fig.2 The unguarantee rate for the design concentrations of outdoor PM_{2.5} with different methods

历年最高日平均浓度指的是自 2013 年监测 PM_{2.5} 以来,日平均浓度的最高值. 最高年不保证 5 d 的日平均浓度是指历年取不保证 5 d 的日平均浓度的最大值. 历年平均不保证 5 d 的日平均浓度是指平均每年不保证 5 d 的日平均浓度,本文考虑了 2013-01—2016-12 的 PM_{2.5} 浓度,因此对于 4 年而言即为不保证 20 d 的日平均浓度. 累年最高月平均浓度指的是历年月平均浓度最高月份的月平均浓度。

大气颗粒物浓度的变化具有随机性,利用历年最高日均值作为室外计算浓度,没有排除极端天气

的影响,其虽然可以满足几乎 100% 的保证率,但是随机性太大. 而且从图 1 可以看出,以此确定的室外 PM_{2.5} 设计浓度要比其他方法确定的室外 PM_{2.5} 设计浓度高很多,分别是最高年不保证 5 d 的日平均浓度、历年平均不保证 5 d 的日平均浓度、累年最高月平均浓度、历年年平均浓度的 1.62 倍、1.85 倍、3.53 倍和 5.93 倍. 以此选型的过滤器要求过滤效率更高,风机能耗(空气净化器)更大. 累年最高月平均浓度反映了室外 PM_{2.5} 在时间上的分布,历年年平均浓度反映了一年的平均水平. 但是二者的保证率过低(前者的保证率 70%~90%,后者的保证率

60%~70%),以它们作为室外设计浓度,就意味着某些城市一年分别有 30%和 40%的时间不能保证其室内空气质量达标。

图 3 统计了历年不保证 5 d 的日平均浓度和历年平均不保证 5 d 的日平均浓度. 31 个城市中不保证 5 d 日平均浓度最高的年份是 2013 年的有 23 个, 2014 年、2015 年各有 2 个. 选择最高年不保证 5 d 的日平均浓度作为室外 PM_{2.5} 设计浓度不能反映 PM_{2.5} 的变化趋势,并不贴近当下实际的室外 PM_{2.5} 情况,会造成没必要的浪费. 这是因为室外

PM_{2.5} 浓度受工业发展、工业类型与环境治理等多方面的影响. 每一年的 PM_{2.5} 浓度都会发生不同程度的变化,环保力度加强,污染控制显著的话,室外 PM_{2.5} 的浓度就会越来越低. 历年平均不保证 5 d 的日平均浓度综合考虑了历年的 PM_{2.5} 数据,避免了极端气候的影响. 从图 1 看出,其值相对较小,且其小时保证率也在 95.2%以上,在工程设计上,均衡了投资与功能的对立统一关系. 根据上述分析,本文以历年平均不保证 5 d 的室外日平均浓度作为 PM_{2.5} 的室外设计浓度.

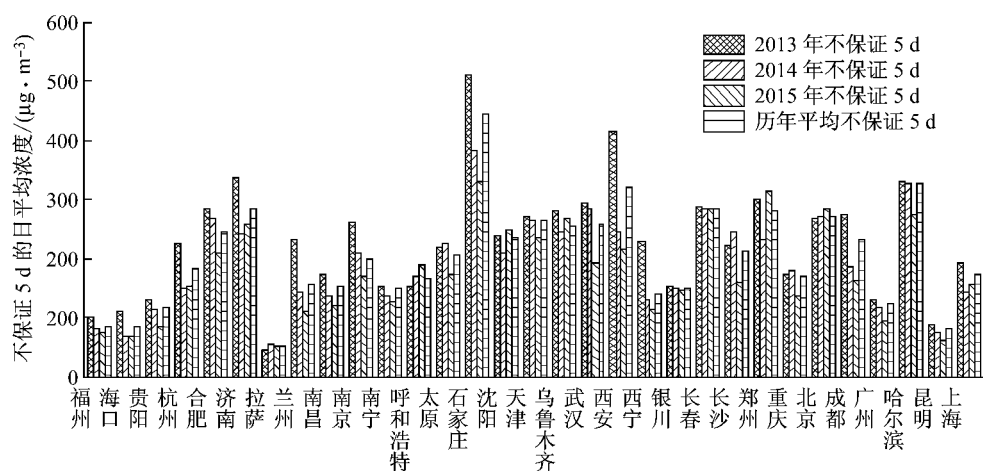


图 3 各省会、直辖市历年不保证 5 d 和历年平均不保证 5 d 的室外 PM_{2.5} 日平均浓度

Fig.3 The design concentrations of outdoor PM_{2.5} under unguaranteeing yearly 5-days and unguaranteeing average 5-days over year for all province capitals

1.3 室内 PM_{2.5} 设计浓度的确定

PM_{2.5} 室内设计浓度是以人体健康为标准而人为规定的一个参考浓度,各个国家(或地区)往往根据人体健康、发展水平选取适合本国(或地区)的参考浓度. ASHRAE 发布的《可接受的室内空气质量通风标准》^[21]中建议室内 PM_{2.5} 标准质量浓度为 $15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 加拿大住宅极限标准给出了 PM_{2.5} 瞬间暴露浓度限值为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 长期浓度限值为 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. WHO2005 年修订的《空气质量指南》^[22]确定的室内 PM_{2.5} 的年平均浓度标准值为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 日平均浓度标准值为 $25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 香港、澳大利亚、新西兰未给出 PM_{2.5} 的暴露标准,只有 PM₁₀ 的标准值.

我国的行业标准^[23]规定室内空气可吸入颗粒物 PM_{2.5} 的日平均浓度宜小于 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 2013 年出台的室内空气净化器净化 PM_{2.5} 测试方法和汽车内饰件挥发有机物测试评价指南规定室内 PM_{2.5} 标准参考 2012 年发布的《环境空气质量标准》,日平均浓度 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 综上本文取室内设计

浓度为 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

2 新风 PM_{2.5} 负荷特征的新指标

目前描述某地 PM_{2.5} 的指标,常见的有空气质量指数和平均浓度等. 这两者一般用于分析某地的 PM_{2.5} 污染状况,例如利用空气质量指数,分析一年内的优良天数或者是轻、中、重度污染天数及其所占全年天数的比例^[11]. 它们不能解释面向建筑新风需求的新风 PM_{2.5} 过滤负荷的大小,不能用于指导或者关联建筑新风过滤系统的设计计算. 因此本文提出反映新风 PM_{2.5} 负荷特征的新指标.

目前供热空调设计中,常采用度日数法来分析和预测建筑能耗. 度日数是最常见的反映供热和制冷设备需求的气候指标. CHRISTENSON 利用度日数法分析研究气候变暖对瑞士建筑能耗的影响^[24]. 严成文和姚健利用 HDD 和 CDD 来预测不同气候区的建筑能耗^[25]. ORHAN 给出了年度能耗与度日数的简单方程关系^[26]. 李明财等人研究表明采暖度日

可以反映办公、商场及居住建筑的热负荷特征而制冷度日不能完全反映办公及商场建筑冷负荷的变化^[27]. 类比采暖度日数和空调度日数, 本文提出过滤浓度日数 F_{CD} 的概念并探索其与新风设计负荷的相关关系. 过滤浓度日数即一年中当某天室外 PM_{2.5} 日平均浓度高于基础浓度时, 将该日平均浓度与基础浓度的差值浓度数乘以 1 d, 所得的乘积的累加值. 其单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$. 某一年的过滤浓度日数 F_{CD} 计算如下:

$$F_{CD} = \sum (C_a - C_b) \sigma \quad (1)$$

式中: C_a 是室外日平均浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; C_b 是基础浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其含义是当室外 PM_{2.5} 浓度高于此浓度时, 需开启空气净化设备, 维持室内良好的空气质量, 显然, 该基础浓度就是 1.3 节中的室内 PM_{2.5} 标准浓度, 取 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 当 $C_a > C_b$, $\sigma = 1$; 当 $C_a < C_b$, $\sigma = 0$. F_{CD} 的概念既包含了一年之中 PM_{2.5} 浓度高于基础浓度的天数又包含其高过基础浓度的程度, 反映了 PM_{2.5} 浓度与延续时间的关系, 因此 F_{CD} 不仅可用于分析该城市的 PM_{2.5} 新风负荷特性并对过滤器和净化器的选型有指导意义, 还可较好反映该地 PM_{2.5} 的年污染程度. 由式(1)可知, 浓度日数的求取主要需要两个参数, 即基础浓度和日平均

浓度. 关于日平均浓度的计算方法有如下几种: 一是真实日平均浓度, 即

$$C_a = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx \quad (2)$$

式中, x 为时间, $f(x)$ 表示随便时间变化的 PM_{2.5} 浓度, $x_1 \leq x \leq x_2$. 这种方法最为理想, 但是计算繁琐而且数据不易获得; 二是采用 24 h 观测值的算数平均值, 这种方法结果接近真实值且相对简便; 三是用日最高浓度和日最低浓度的算数平均值作为日平均浓度, 这种方法最简便, 但是精度稍欠. 故采用第二种计算方法.

3 全国各省会直辖市城市历年 F_{CD}

根据相关数据结合 F_{CD} 的计算公式得到全国各省会直辖市的 F_{CD} 值, 具体如图 4 所示. F_{CD} 分布规律与 CDD、HDD 差异很大, 后者主要取决于各地气温条件, 主要决定参数是干球温度, 所以在海拔、纬度、沿海或者内陆方面表征性很好. 海拔高、纬度大的地区和内陆地区, CDD 相对较小, HDD 较大^[26]. 前者主要取决于各地区能源消费方式、产业特色及规模.

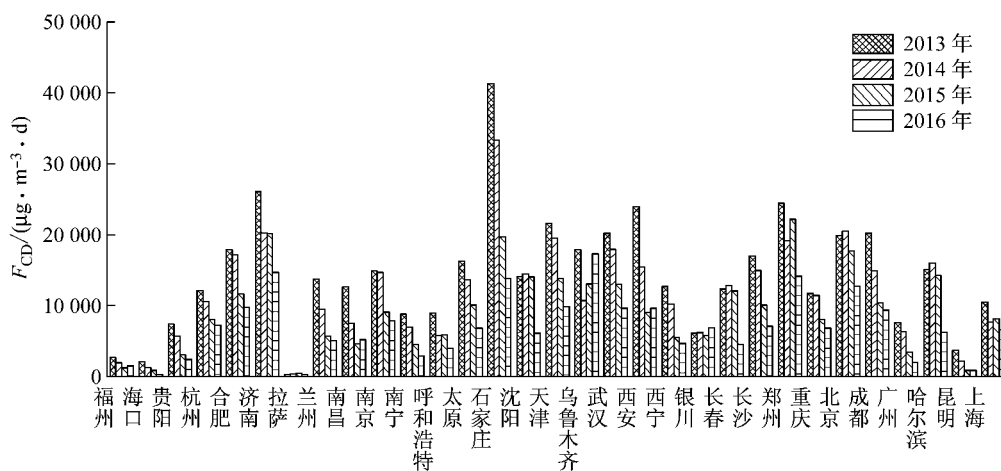


图4 省会直辖市历年 F_{CD} 汇总

Fig.4 F_{CD} of all province capitals

从图 4 可以看出不同城市之间的 F_{CD} 相差较大, 2013 年, 石家庄的 F_{CD} 最高超过 $40\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$, 拉萨的 PM_{2.5} 污染程度最轻, 其 F_{CD} 为 $288 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$; 济南、郑州等 6 个城市的 F_{CD} 在 $20\,000 \sim 26\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 之间; 北京、合肥等 15 个城市的 F_{CD} 在 $10\,000 \sim 20\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 之间; 呼和浩特、南宁等 8 个城市的 F_{CD} 在 $2\,000 \sim 9\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 之间. 2014 年, 仍然是石家庄的 F_{CD} 最高, 为 $33\,393$

$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$, 拉萨的 F_{CD} 最低为 $409 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$; 除石家庄外, F_{CD} 在 $20\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 以上的城市只有北京和济南; F_{CD} 在 $10\,000 \sim 20\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 的城市有 16 个. 2015 年, F_{CD} 最高的城市是郑州, 其值为 $22\,200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$, 最低的是拉萨 $423 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$; $2\,000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ 以下的城市也增加到 4 个. 2016 年, 石家庄的 F_{CD} 最高, 为 $24\,417 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$; F_{CD} 最低的城市变为了海口市, 其值为 $403 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$.

$\text{m}^{-3} \cdot \text{d}$. 31 个省会直辖市中 F_{CD} 从 2013 年至 2016 年逐年减小的有 21 个. 其中, 降幅最大的为海口市的 80%. 与 2013 年相比, 2016 年的 F_{CD} 只有两个城市没有减小, 分别是拉萨和银川, 这两个城市的 F_{CD} 一直都很小; 由此可见, 我国的 PM2.5 污染呈现减轻的趋势.

4 F_{CD} 与新风 PM2.5 设计负荷的关系

根据第 2 节内容, 取新风量为 $1\,000\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 就可以计算各地的新风设计负荷, 进而得到其与 F_{CD} 的线性关系, 如图 5、表 1 所示.

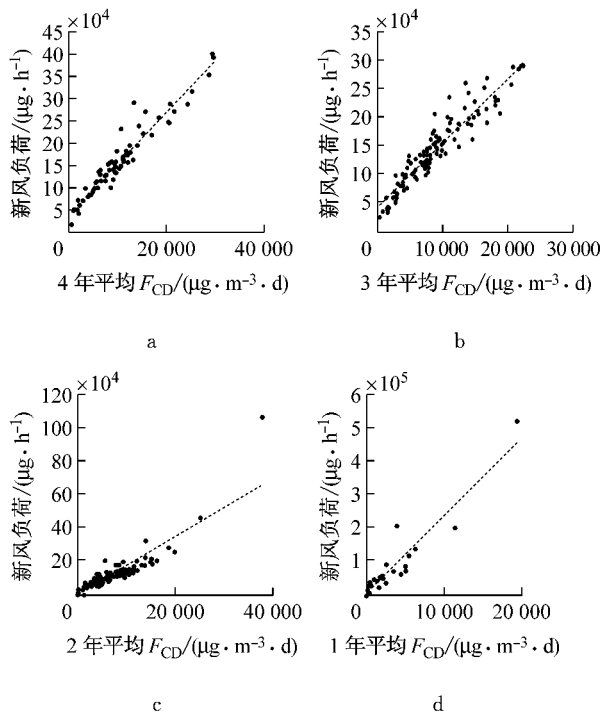


图 5 各地 F_{CD} 与新风设计负荷的关系

Fig. 5 The relationship between F_{CD} and the design filtering load of outdoor air

表 1 F_{CD} 与新风负荷的拟合关系

Tab. 1 The fitting relationship between F_{CD} and filtering load of outdoor air.

	拟合方程	R^2 值
5a	$y=11.505x+39\,315$	$R^2=0.929$
5b	$y=11.241x+44\,565$	$R^2=0.886$
5c	$y=17.372x-309.39$	$R^2=0.792$
5d	$y=23.457x+6\,686.8$	$R^2=0.887$

图 5a 表示从 2013 年开始监测 PM2.5 的城市 (共计 77 个城市) 的新风设计负荷与这 4 年平均 F_{CD} 的关系; 图 5b 表示从 2014 年开始监测 PM2.5 的城市 (共计 115 个城市) 的新风设计负荷与这 3 年平均 F_{CD} 的关系; 图 5c 表示从 2015 年开始监测 PM2.5

的城市 (共计 150 个城市) 的新风设计负荷与这两年平均 F_{CD} 的关系; 图 5d 表示从 2016 年开始监测 PM2.5 的城市 (共计 29 个城市) 的新风设计负荷与 2016 年 F_{CD} 的关系.

图 5 及表 1 中, 横坐标和 x 代表 $F_{\text{CD}} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d})$, 纵坐标和 y 代表新风设计负荷 $(\mu\text{g} \cdot \text{h}^{-1})$. 从图 5 和表 1, 可以发现, F_{CD} 与新风设计负荷线性相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$), R^2 也分别达到了 0.929、0.886、0.792 和 0.887. 因此可用过滤浓度日数来反映公共建筑的新风设计负荷特征, 证明用于分析 PM2.5 污染程度对新风设计负荷的影响是可行的. 这是因为 F_{CD} 与室外 PM2.5 浓度密切相关, 从式(1)可以看出, 对于同一建筑而言 PM2.5 新风负荷仅取决于 PM2.5 室外浓度. 而 CDD 与冷负荷的关系与之不同, 冷负荷不仅与室外空气温度相关, 还和室外空气湿度相关, 因此 CDD 不能完全反映公共建筑的冷负荷. 因为公共建筑的新风均是从新风系统引入, 因此其 PM2.5 新风负荷均可按式(1)计算, 从而对于所有公共建筑而言 F_{CD} 与 PM2.5 新风负荷的关系均成立.

5 结论

本文采用历年平均不保证 5 d 的日平均浓度作为室外 PM2.5 设计浓度, 均衡了工程设计中投资与功能的对立统一关系; 确定了新风负荷的计算方法, 并提出反映新风负荷特性的 PM2.5 指标, 即过滤浓度日数. 采用统计学方法分析 F_{CD} 与新风设计负荷的相关关系, 发现: F_{CD} 与新风设计负荷线性相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$). 由此根据 F_{CD} 的时空特性, 可知全国 PM2.5 新风负荷的分布特性, 进而为过滤器和净化器的选型提供参考价值.

参考文献:

- [1] 张吉洋, 耿世彬. 我国大气环境 PM2.5 来源、分布、危害现状分析[J]. 洁净与空调技术, 2014(1): 45.
ZHANG Jiyang, GENG Shibin. The analysis of origin, distribution & harm of PM2.5 existed in our atmosphere [J]. Clean Technology and Air Conditioning, 2014(1): 45.
- [2] 沈惠, 陈前火. PM2.5 的来源、现状、危害及防控措施[C]// 2014 中国环境科学学会学术年会. 北京: 中国环境科学学会, 2014.
SHEN Hui, CHEN Qianhuo. Origin, status, harm and control measures of PM2.5 [C]// 2014 Annual Conference of China Environmental Science Society. Beijing: China Environmental Science Society, 2014: 623-628.
- [3] 曹国庆, 谢慧, 赵申. 公共建筑室内 PM2.5 污染控制策略研

- 究[J]. 建筑科学, 2015(4): 40.
CAO Guoqing, XIE Hui, ZHAO Shen. Strategic research of pollution control of indoor PM_{2.5} in public buildings [J]. Building Science, 2015(4): 40.
- [4] 王清勤, 李国柱, 赵力, 等. 建筑室内细颗粒物(PM_{2.5})污染现状, 控制技术与标准[J]. 暖通空调, 2016, 46(2): 1.
WANG Qingqin, LI Guozhu, ZHAO Li, *et al.* Indoor particulate matter (PM_{2.5}) pollution situation, control technologies and standards [J]. Journal of HV&AC, 2016, 46(2): 1.
- [5] LINARES C, DÍAZ J. Impact of particulate matter with diameter of less than 2.5 microns [PM_{2.5}] on daily hospital admissions in 0—10-year-olds in Madrid. Spain [2003—2005] [J]. *Gaceta Sanitaria*, 2009, 23(3): 192.
- [6] DOCKERY D W, POPE C A, XU X, *et al.* An association between air pollution and mortality in six US cities[J]. *New England Journal of Medicine*, 1993, 329(24): 1753.
- [7] POPE 3rd C A, HANSEN M L, LONG R W, *et al.* Ambient particulate air pollution, heart rate variability, and blood markers of inflammation in a panel of elderly subjects[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, 112(3): 339.
- [8] 程鸿, 胡敏, 张利文, 等. 北京秋季室内外PM_{2.5}污染水平及其相关性[J]. 环境与健康杂志, 2009(9): 787.
CHENG Hong, HU Min, ZHANG Liwen, *et al.* PM_{2.5} Concentrations in Indoor and Outdoor Air and Their Relationship in the Fall of Beijing [J]. *Journal of Environment and Health*, 2009(9): 787.
- [9] MENG Q Y, TURPIN B J, KORN L, *et al.* Influence of ambient (outdoor) sources on residential indoor and personal PM_{2.5} concentrations; analyses of RIOPA data[J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2005, 15(1): 17.
- [10] 高军, 房艳兵, 张旭. 灰霾天气条件下上海地区冬季居住环境PM_{2.5}浓度及呼吸暴露分析[J]. 绿色建筑, 2014(1): 31.
GAO Jun, FANG Yanbing, ZHANG Xu. Analysis of indoor PM_{2.5} concentration and inhalation exposure under the haze climate in winter of Shanghai [J]. *Green Building*, 2014(1): 31.
- [11] 王清勤, 李国柱, 朱荣鑫, 等. 空气过滤器设计选型用PM_{2.5}室外设计浓度确定方法[J]. 建筑科学, 2015(12): 71.
WANG Qingqin, LI Guozhu, ZHU Rongxin, *et al.* Determination of PM_{2.5} outdoor design concentration for air filter design and selection [J]. *Building Science*, 2015(12): 71.
- [12] 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.
XU Wenhua. Calculation method of air filter efficiency in comfort air conditioning [J]. *Journal of HV&AC*, 2001, 31(3): 42.
- [13] 张颖, 赵彬, 李先庭. 室内颗粒物的来源和特点研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(9): 30.
ZHANG Ying, ZHAO Bin, LI Xianting. Sources and characteristics of indoor particulate matter; a review [J]. *Journal of HV&AC*, 2005, 35(9): 30.
- [14] 郭景, 郁银泉, 程懋堃, 等. 全国民用建筑工程设计技术措施[J]. 建设科技, 2015(10): 39.
GUO Jing, YU Yinquan, CHENG Maokun, *et al.* Technical measures for civil engineering design in China [J]. *Construction Science and Technology*, 2015(10): 39.
- [15] 佚名. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Anonymous. Code for design of heating, ventilation and air conditioning for civil buildings [M]. Beijing: China Industry Press, 2012.
- [16] TUNG T C, CHAO C Y, BURNETT J. A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(6): 881.
- [17] HETES R, MOORE M, NORTHEIM C. Office equipment: design, indoor air emissions, and pollution prevention opportunities[M]. [S.l.]: EPA, 1995.
- [18] 张旭, 周翔, 王军. 民用建筑室内设计新风量研究[J]. 暖通空调, 2012, 42(7): 27.
ZHANG Xu, ZHOU Xiang, WANG Jun. Research on design fresh air requirement for civil buildings [J]. *Journal of HV&AC*, 2012, 42(7): 27.
- [19] 洪天真, 江亿, 彦启森. 供热空调系统保证率设计的概念[J]. 暖通空调, 1994, 25(6): 10.
HONG Tianzhen, JIANG Yi, YAN Qisen. The concept of guarantee rate design for heating and air conditioning system [J]. *Journal of HV&AC*, 1994, 25(6): 10.
- [20] CARLSON T. Air filtration; Choosing the right filter class for HVAC systems[J]. *Filtration & Separation*, 2008, 45(9): 36.
- [21] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. Ventilation for acceptable indoor air quality; Standard 62.1-2010[S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2010.
- [22] World Health Organization. Air quality guidelines; global update 2005; particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide[M]. Geneva: World Health Organization, 2006.
- [23] 江源. 《建筑通风效果测试与评价标准》获准[J]. 建筑节能, 2013, 41(10): 75.
JIANG Yuan. Building ventilation testing and evaluation standards allowed [J] *Building Energy Efficiency*, 2013, 41(10): 75.
- [24] CHRISTENSON M, MANZ H, GYALISTRAS D. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(6): 671.
- [25] YAN Chengwen, YAO Jian. Application of ANN for the prediction of building energy consumption at different climate zones with HDD and CDD[C]// International Conference on Future Computer and Communication. Shanghai: IEEE, 2010: V3-286-V3-289.
- [26] BÜYÜKALACA O, BULUT H, YILMAZ T. Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey[J]. *Applied Energy*, 2001, 69(4): 269.
- [27] 李明财, 郭军, 史珺, 等. 利用采暖/制冷度日分析建筑能耗变化的适用性评估[J]. 气候变化研究进展, 2013(1): 43.
LI Mingcai, GUO Jun, SHI Jun, *et al.* Applicability evaluation of cooling/heating degree-days in analyzing building energy consumption changes [J]. *Progress of Research on Climate Change*, 2013(1): 43.