

一次回风空调系统 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制策略

吕晓慧 张 泠* 刘忠兵 徐 秀

(湖南大学土木工程学院, 长沙 410082)

摘 要 基于浓度守恒原理建立了一次回风空调系统室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模型, 研究了过滤器分别安装在新风段、回风段和送风段时过滤效率和新风量的变化对室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响。模拟结果表明: 在室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大于室内初始值的条件下, 过滤器安装在送风段或回风段时, 减少新风有利于室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制, 过滤器安装在新风段时, 根据过滤器效率调节新风, 过滤效率小于临界效率, 减小新风有利于室内污染控制; 在室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小于室内初始值的条件下, 过滤器安装在送风段或新风段时, 增加新风有利于室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制, 过滤器安装在回风段时, 也存在临界效率, 过滤效率小于临界值, 增加新风有利于室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制。

关键词 室内空气品质; 中央空调; $\text{PM}_{2.5}$; 新风稀释; 空气过滤

中图分类号 X502; X513 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)12-7141-06 DOI 10.12030/j.cjee.201508012

Primary return air system $\text{PM}_{2.5}$ control strategy

LYU Xiaohui ZHANG Ling* LIU Zhongbing XU Xiu

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract An indoor $\text{PM}_{2.5}$ concentration model of a primary return air system is presented based on a balance of concentration. The variation in filter efficiency and outdoor air rate on indoor $\text{PM}_{2.5}$ concentration is discussed, with filters installed outdoors at the return and supply vents. The simulation results show that if the outdoor $\text{PM}_{2.5}$ concentration is higher than the initial indoor value, it is recommended to reduce the amount of outdoor air when filter was installed at the supply or return vent to control the indoor $\text{PM}_{2.5}$ concentration. In addition, when a filter was installed for the outdoor airstream, the outdoor air rate had to be adjusted according to the filter efficiency, such as decreasing the outdoor air rate if the efficiency was greater than the critical value. If the outdoor $\text{PM}_{2.5}$ concentration was lower than the initial indoor value, it was recommended to increase the amount of outdoor air when a filter was installed at the supply or outdoor vents. When a filter was installed at the indoor vent, it was advised to increase the outdoor air rate if the efficiency was lower than the critical value.

Key words indoor air quality; central air condition; $\text{PM}_{2.5}$; ventilation; air filter

如今大多数空调房间通过引入大量新风来保证良好的室内空气品质, 导致大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 趁机涌入室内。 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附致癌物质和基因诱变物质, 给人类健康造成负面影响^[1], 通过调节新风降低室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有重要意义。

针对通风与室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系, 国内外学者做了相关研究。HALIOS 等^[2]通过数值模拟发现当室外空气较清洁时, 保证通风率在国标规定的最低要求上, 能降低 70% 的室内人员 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露量; WE-SCHLER 等^[3]指出室内外浓度比与通风换气次数呈

非线性比例变化。谢伟^[4]研究了室内颗粒物初始浓度、新风量、换气次数、渗透风量、过滤效率等因素对室内颗粒物浓度的影响, 并指出控制换气次数、安装空气过滤器可以控制室内颗粒物污染程度, 但没有给出安装过滤器后具体如何调节新风量。

空调房间内没有 $\text{PM}_{2.5}$ 源散发时, 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 由新风带入, 合理调节新风及过滤方式能有效降低室内浓度。由于室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受多种因素影响, 综合考虑过滤器效率以及安装位置来调节新风量的策略较少。因此, 本文建立一次回风空调系统室内 $\text{PM}_{2.5}$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578221)

收稿日期: 2015-08-03; 修订日期: 2015-12-01

作者简介: 吕晓慧(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度控制。E-mail: sdnancy@hnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: lingzhang@hnu.edu.cn

浓度模型,针对不同过滤器安装位置研究过滤效率、新风比与室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系,为利用新风及过滤控制室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染提供理论依据。

1 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模型建立

1.1 一次回风空调系统室内 $\text{PM}_{2.5}$ 模型介绍

我国的商业建筑和大型办公楼多采用中央空调来制冷或供热,其门窗一般是关闭的^[5]。空调系统如图1所示,新风和回风混合后进入过滤器,经空气处理器送入房间,不考虑从室外向室内的渗透风量。本文所建模型进行如下假设:

- 1) $\text{PM}_{2.5}$ 在房间内均匀分布;
- 2) 忽略室内外 $\text{PM}_{2.5}$ 密度和分散度变化对过滤器效率的影响;
- 3) 忽略管道产尘以及管道内 $\text{PM}_{2.5}$ 的沉积;
- 4) 忽略 $\text{PM}_{2.5}$ 再悬浮、凝结和相变作用;
- 5) 为简化模型方便计算,假定排风量与新风量相等。

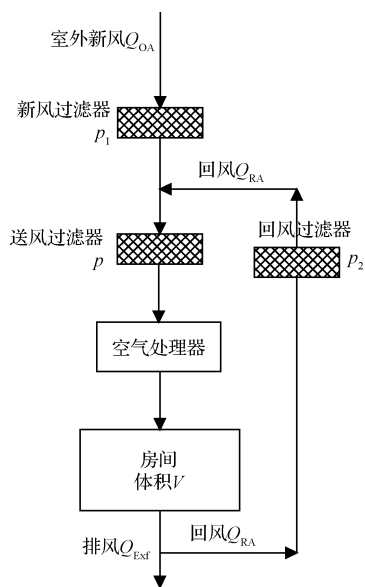


图1 一次回风空调系统图

Fig. 1 Schematic diagram of air-conditioning system

根据房间内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平衡可得下式:

$$\frac{dC}{dt} = R_{in} - R_o \quad (1)$$

式中: R_{in} 为单位时间内进入室内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度; R_o 为单位时间内排出室内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, dC/dt 为时间 t 内室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化率。

R_{in} 由3部分组成: 室外新风、室内回风进入、室内污染源散发的 $\text{PM}_{2.5}$ 。同理, R_o 可分为4部分: 回

风口吸取、机械排风、沉积在室内各个表面、由于化学反应引发衰减的 $\text{PM}_{2.5}$ 。

故 R_{in}, R_o 用下式表达:

$$R_{in} = \frac{C_{OA} \cdot Q_{OA}}{V} \cdot (1-p) \cdot (1-p_1) + \frac{C \cdot Q_{RA}}{V} \cdot (1-p) \cdot (1-p_2) + \frac{S}{V} \quad (2)$$

$$R_o = \frac{C \cdot (Q_{RA} + Q_{Exf})}{V} + C \cdot (\lambda + k) \quad (3)$$

式中: C 为室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$; C_{OA} 为室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, $\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$; Q_{OA} 为新风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Q_{RA} 为回风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; Q_{Exf} 为排风量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; p, p_1 和 p_2 分别为送风、新风、回风过滤器的过滤效率; V 为房间体积, m^3 ; S 为室内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源散发强度, $\text{个} \cdot \text{h}^{-1}$; λ 为室内 $\text{PM}_{2.5}$ 的沉降率, h^{-1} ; k 为室内 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学反应衰减率, h^{-1} 。

为减少变量计算, 令:

$$\alpha = k_v \cdot m \cdot (1-p) \cdot (1-p_1) \quad (4)$$

$$\beta = k_v \cdot (1-m) \cdot (1-p) \cdot (1-p_2) - k_v \quad (5)$$

式中: $k_v = (Q_{RA} + Q_{OA})/V$, 即送风量的换气次数, h^{-1} ; m 为新风占总送风的比例。

将(4)、(5)代入(1)、(2)、(3)式可得:

$$\frac{dC}{dt} = C_{OA} \cdot \alpha + C \cdot (\beta - \lambda - k) + \frac{S}{V} \quad (6)$$

在时间 T (常数) 内对(6)式两端积分, 积分时认为在时间 T 内 $\alpha, \beta, \lambda, k$ 为定值。

$$\int_{C(0)}^{C(T)} dC = \int_0^T (\beta - \lambda - k) C dt + \int_0^T \alpha C_{OA} dt + \int_0^T \frac{S}{V} dt \quad (7)$$

根据积分中值定理, 得:

$$\overline{C_{OA}} = \frac{1}{T} \int_0^T C_{OA} dt, \overline{C} = \frac{1}{T} \int_0^T C dt, \overline{S} = \frac{1}{T} \int_0^T S dt$$

将以上公式代入(7)式可得:

$$\frac{C(T) - C(0)}{T} = (\beta - \lambda - k) \overline{C} + \alpha \overline{C_{OA}} + \frac{\overline{S}}{V} \quad (8)$$

在短时间内, 认为室内外微粒浓度以及污染源散发浓度随时间线性变化^[6], 故时间 T 不宜大于 0.5 h, 积分时间 T 内 $\overline{C}, \overline{C_{OA}}, \overline{S}$ 可用下式表达:

$$\overline{C} = \frac{C(T) + C(0)}{2}, \overline{C_{OA}} = \frac{C_{OA}(T) + C_{OA}(0)}{2}$$

$$\overline{S} = \frac{S(T) + S(0)}{2} \quad (9)$$

方程(9)代入方程(8)可得:

$$C(T) = D_1 \cdot C(0) + \frac{D_2 \cdot [C_{OA}(T) + C_{OA}(0)]}{2} + \frac{D_3 \cdot (S(T) + S(0))}{2V} \quad (10)$$

式中: $D_1 = \frac{2+b}{2-b}$, $D_2 = \frac{2T\alpha}{2-b}$, $D_3 = \frac{2T}{2-b}$, $b = (\beta - \lambda - k)T$ 。

将方程(10)化为一般迭代公式,得:

$$C_{n+1} = D_1 \cdot C_n + \frac{D_2 \cdot [C_{OA(n)} + C_{OA(n+1)}]}{2} + \frac{D_3 \cdot [S_n + S_{n+1}]}{2V} \quad (11)$$

式中: C_{n+1} 为当前时刻室内 PM_{2.5} 浓度; C_n 为前一时
刻室内 PM_{2.5} 浓度; $C_{OA(n+1)}$ 为当前时刻室外 PM_{2.5} 浓度
; $C_{OA(n)}$ 为前一时刻室外 PM_{2.5} 浓度; S_{n+1} 为当前时
刻室内源强; S_n 为前一时刻室内源强。方程(11)即
求解室内实时 PM_{2.5} 浓度的算术表达式。

1.2 验证模型

利用 QUANG 等^[7]在澳大利亚昆士兰 Brisbane
的 A 楼所测数据对以上求解模型进行验证,
QUANG 等^[7]选用 TSI Model 3025 测试室内 PM_{2.5}
数量浓度,测试时间为 06:00—18:00。该办公楼
采用一次回风空调系统,忽略室外空气通过门、窗
缝隙进入室内的空气量;仅在送风段设置过滤器;
验证时假设室内不存在 PM_{2.5} 散发源;PM_{2.5} 的化学
衰变率 k 值很小,可忽略不计^[8-10];沉积率 λ 值取
决于很多因素,如建筑体表面积比、微粒性质
等^[11-14],有研究指出沉积率低于 1 h⁻¹^[15],与换气
次数相比是个很小的数值,本文采用 MARSIK
等^[8]所用数值 0.2 进行模拟。验证模型时所需输
入参数见表 1。

表 1 验证模型时所需输入参数

Table 1 Input parameters required for
verification of model

输入 参数	V/ m ³	p/ %	λ/ h ⁻¹	Q _{OA} / (m ³ ·s ⁻¹)	Q _{Ext} / (m ³ ·s ⁻¹)	Q _{RA} / (m ³ ·s ⁻¹)	C _{OA} / (个·cm ⁻³)
数值	7 940	47	0.2	2	2	13.8	10 × 10 ³ ~ 40 × 10 ³

2 模拟结果与分析

2.1 验证模型结果

由图 2 可以看出,实测室内浓度曲线波动较大,
预测曲线变化平缓。10:30—12:00 期间,预测室内

PM_{2.5} 与室外 PM_{2.5} 浓度变化趋势相同,与实测室内
PM_{2.5} 浓度趋势相反且两者差值较大,是因为 10:30—
11:00 期间,室内有 PM_{2.5} 散发源,11:00—12:00 期
间室内 PM_{2.5} 散发源停止,实测室内浓度下降,而本
模型验证时忽略了室内污染源,故此期间内预测室
内 PM_{2.5} 浓度与实测存在较大偏差。从整体分析,工
作时间(10:00—17:00)实测室内浓度曲线在预测
浓度曲线上方,非工作时间(06:00—9:00)室内预
测浓度曲线和实测曲线几乎吻合,进一步说明工
作期间的偏差是忽略人员走动、吸烟或打印机的
工作引起室内 PM_{2.5} 浓度再悬浮及散发造成的。
另外,由于仪器精度及操作方面的误差,室内实测
PM_{2.5} 浓度也会偏离真实值。虽然实测室内 PM_{2.5}
数量浓度曲线与预测曲线存在细微偏差,但对于
不存在 PM_{2.5} 散发源的房间,本文模型可用来预测
室内 PM_{2.5} 浓度。

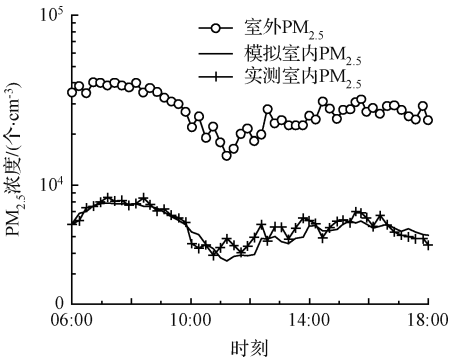


图 2 室外、室内实测 PM_{2.5} 及室内预测 PM_{2.5} 曲线
Fig. 2 Curve of measured outdoor and indoor PM_{2.5}
concentration, and model output

2.2 模拟分析新风、过滤对室内 PM_{2.5} 浓度的影响

利用 1.1 节模型模拟一次回风空调系统在
新风段、回风段、送风段装设过滤器时新风量的
变化对室内 PM_{2.5} 浓度的影响,空调系统总送风
量不变,下文用新风比 m 的变化代替新风量的
变化。

图 3 为室外 PM_{2.5} 浓度大于室内初始值时,室内
浓度在不同新风比 m 下随新风过滤效率 p_1 的变
化关系,可以看出新风过滤效率 p_1 存在临界值 p_{b1} 。
当 $p_1 < p_{b1}$ 时,减小新风量对降低室内 PM_{2.5} 浓度
有利;而 $p_1 > p_{b1}$ 时,增加新风量有利于降低室内
PM_{2.5}。这是由于经高效过滤器处理后的新风含尘
浓度低,若低于室内浓度时,增加新风量对降低室内
PM_{2.5} 浓度大有裨益。新风过滤器效率处于临界值

时,任何新风比下的室内浓度均相同,利用该效率下全新风与全回风状态运行时室内浓度相同来求解该临界效率。

不妨令临界效率下全新风工况室内浓度为 $C_{qx,pbl}$,全回风工况室内 $PM_{2.5}$ 浓度为 $C_{qh,pbl}$ 。根据公式(11)求解 $C_{qx,pbl}, C_{qh,pbl}$ 。由 $C_{qx,pbl} = C_{qh,pbl}$,得:

$$p_{bl} = 1 - \frac{2C_0}{C_{OA}(2 + \lambda T)} \tag{12}$$

式中 T 为过滤器运行时间。

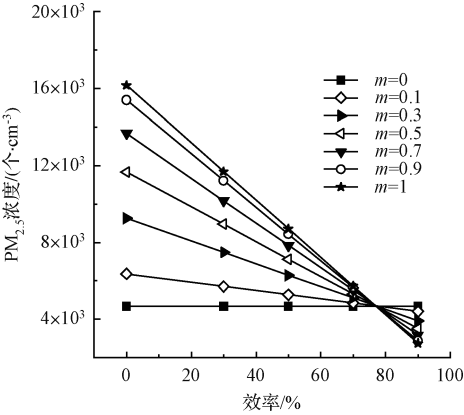


图 3 室外 $PM_{2.5}$ 浓度大于室内初始值,新风过滤效率 p_1 与室内浓度在不同新风比下的变化关系

Fig. 3 Relationship between outdoor air filter efficiency and indoor concentration under various percentage of outdoor air when outdoor concentration higher than indoor initial

图 4 为室外 $PM_{2.5}$ 浓度小于室内初始值时,室内浓度在不同新风比 m 下随新风过滤效率 p_1 的变化关系。可以看出,随过滤器效率的增加,不同新风量

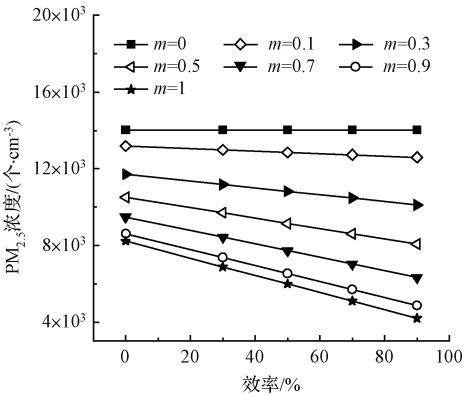


图 4 室外 $PM_{2.5}$ 浓度小于室内初始值,新风过滤效率 p_1 与室内浓度在不同新风比下的变化关系

Fig. 4 Relationship between outdoor air filter efficiency and indoor concentration under various percentage of outdoor air when outdoor concentration lower than indoor initial

下的室内浓度差别较大,室内 $PM_{2.5}$ 浓度呈下降趋势,且同等过滤效率下,新风比越大室内 $PM_{2.5}$ 浓度越低。由以上分析可知,当室外 $PM_{2.5}$ 浓度小于室内初始值时,过滤器安装在新风段时,增加新风量有利于室内 $PM_{2.5}$ 污染控制。

图 5 为室外 $PM_{2.5}$ 浓度大于室内初始值时,与室内浓度在不同新风比下随回风过滤效率 p_2 的变化关系。可以看出,过滤效率越大,不同新风比下的室内浓度差别越大大,同等过滤效率下,新风比越小,室内 $PM_{2.5}$ 污染控制越好。从以上分析可知,在一次回风空调系统的回风管上设置过滤器时,不论回风过滤器效率高与低都应减小新风量,控制室内 $PM_{2.5}$ 污染。

图 6 为室外 $PM_{2.5}$ 浓度小于室内初始值时,室内

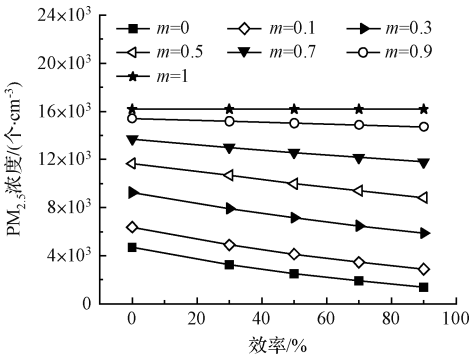


图 5 室外 $PM_{2.5}$ 浓度大于室内初始值,回风过滤效率 p_2 与室内浓度在不同新风比下的变化关系

Fig. 5 Relationship between return air filter efficiency and indoor concentration under various percentage of outdoor air when outdoor concentration higher than indoor initial

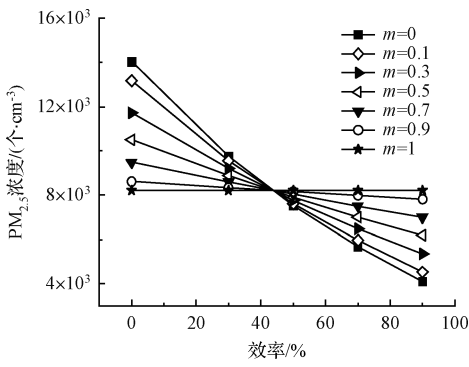


图 6 室外 $PM_{2.5}$ 浓度小于室内初始值,回风过滤效率 p_2 与室内浓度在不同新风比下的变化关系

Fig. 6 Relationship between return air filter efficiency and indoor concentration under various percentage of outdoor air when outdoor concentration lower than indoor initial

浓度在不同新风比下随回风过滤效率 p_2 的变化关系。可以看出回风过滤效率存在临界值 p_{b2} 。当 $p_2 < p_{b2}$ 时,增加新风量有利于降低室内 PM_{2.5} 浓度;而 $p_2 > p_{b2}$ 时,减小新风有利于降低室内 PM_{2.5} 浓度。这是由于经大于 p_{b2} 的回风过滤器处理后,回风浓度低于新风浓度的缘故。当 $p_2 = p_{b2}$ 时,室内 PM_{2.5} 浓度不受新风量变化的影响,与求解 p_{b1} 同理,解得:

$$p_{b2} = \frac{3.8C_0 - 4C_{0A} - 2\lambda TC_{0A}}{4C_0 + 2k_v TC_{0A}} \quad (13)$$

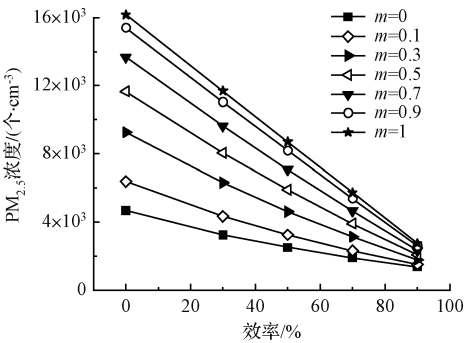


图 7 室外 PM_{2.5} 浓度大于室内初始值,送风过滤效率 p 与室内浓度在不同新风比下的变化关系

Fig. 7 Relationship between supply air filter efficiency and indoor concentration under various percentage of outdoor air when outdoor concentration higher than indoor initial

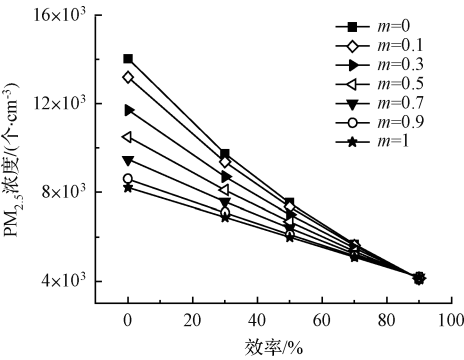


图 8 室外 PM_{2.5} 浓度小于室内初始值,送风过滤器过滤效率 p 与室内浓度在不同新风比下的变化关系

Fig. 8 Relationship between mix air filter efficiency and indoor concentration under various percentage of outdoor air when outdoor concentration lower than indoor initial

图 7、图 8 分别为过滤器安装在送风段时,室内浓度在不同新风比下随送风过滤效率 p 的变化关系。当室外 PM_{2.5} 浓度大于室内初始浓度时,新风量越小,室内 PM_{2.5} 浓度越低;当室外 PM_{2.5} 浓度低于室内初始浓度时,新风量越大,室内 PM_{2.5} 越低。从

图 7 和图 8 可以看出,过滤器效率越高,不同新风量下的室内浓度差别越小。当室外 PM_{2.5} 浓度低于室内初始值时,选择过滤效率在 0.7 以上的过滤器已经能获得较低的室内 PM_{2.5},此时调节新风对室内 PM_{2.5} 浓度变化不明显。

3 结 论

1) 建立的求解室内 PM_{2.5} 浓度模型经过对比验证,当室内不存在 PM_{2.5} 散发源时,预测空调房间室内 PM_{2.5} 较为准确。

2) 空调系统的新风段装设过滤器:当室外 PM_{2.5} 浓度高于室内初始浓度时,存在临界新风过滤效率 p_{b1} , $p_1 < p_{b1}$,减小新风量有利于室内 PM_{2.5} 控制,而 $p_1 > p_{b1}$,增加新风量有利于室内 PM_{2.5} 控制;当室外 PM_{2.5} 浓度低于室内初始时,不存在临界过滤效率,增加新风有利于室内 PM_{2.5} 污染控制。

3) 空调系统的回风段装设过滤器:当室外 PM_{2.5} 浓度低于室内初始值时,存在临界回风过滤效率 p_{b2} ,在 $p_2 < p_{b2}$ 时,增加新风量有利于室内 PM_{2.5} 污染控制,而 $p_2 > p_{b2}$ 时,减少新风量有利于室内 PM_{2.5} 污染浓度;当室外 PM_{2.5} 浓度高于室内初始浓度时,不存在临界回风过滤效率,减少新风量有利于室内 PM_{2.5} 污染控制。

4) 空调系统的送风段装设过滤器:当室外 PM_{2.5} 浓度低于室内初始值时,增加新风量有利于室内 PM_{2.5} 污染控制;而当室外 PM_{2.5} 浓度高于室内初始值时,减小新风量有利于室内 PM_{2.5} 污染控制。过滤器效率越大,不同新风量下的室内 PM_{2.5} 浓度差别越小,室内浓度越低。

参 考 文 献

[1] 周灵君,夏思佳,姜伟立. 建立江苏省 PM_{2.5} 环境空气质量标准的需求探讨. 环境工程技术学报, 2011, 1 (3): 243-248
ZHOU Lingjun, XIA Sijia, JIANG Weili. Discussion on the demand of establishing PM_{2.5} standard in Jiangsu Province. Journal of Environmental Engineering Technology, 2011, 1(3): 243-248 (in Chinese)

[2] HALIOS C., SANTAMOURIS M., HELMI A., et al. Exposure to fine particulate matter in ten night clubs in Athens Greece: Studying the effect of ventilation, cigarette smoking and resuspension. Science of The Total Environment, 2009, 407(17): 4894-4901

[3] WESCHLER C. J., SHIELDS H. C. Experiments probing

- the influence of air exchange rates on secondary organic aerosols derived from indoor chemistry. *Atmospheric Environment*, **2003**, 37(39/40): 5621-5631
- [4] 谢伟. 室内颗粒物浓度变化特征及污染控制策略研究. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, **2013**
XIE Wei. The research on characteristic of indoor particulate matter and control strategies. Xi'an: Master Dissertation of Xi'an University of Architecture & Technology, **2013** (in Chinese)
- [5] 田利伟. 室内环境颗粒物浓度预测模型及污染控制策略研究. 长沙: 湖南大学博士学位论文, **2009**
TIAN Liwei. The research on modeling of indoor particulate matter of outdoor origin and control strategies. Changsha: Doctor Dissertation of Hunan University, **2009** (in Chinese)
- [6] MORAWSKA L., HE Congrong, HITCHINS J., et al. The relationship between indoor and outdoor airborne particles in the residential environment. *Atmospheric Environment*, **2001**, 35(20): 3463-3473
- [7] QUANG T. N., HE Congrong, KNIBBS L. D., et al. Co-optimisation of indoor environmental quality and energy consumption within urban office buildings. *Energy and Building*, **2014**, 85: 225-234
- [8] MARSIK T., JOHNSON R. HVAC air-quality model and its use to test a $PM_{2.5}$ control strategy. *Building and Environment*, **2007**, 43(11): 1850-1857
- [9] MOSLEY R. B., GREENWELL D. J., SPARKS L. E., et al. Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Science Technology*, **2001**, 34(1): 127-136
- [10] HENDERSON D. E., MILFORD J. B., MILLER S. L. Prescribed burns and wildfires in Colorado: Impacts of mitigation measures on indoor air particulate matter. *Journal of Air & Waste Management Association*, **2005**, 55(10): 1516-1526
- [11] ZHAO Bin, WU Jun. Modeling particle deposition onto rough walls in ventilation duct. *Atmospheric Environment*, **2006**, 40(36): 6918-6927
- [12] WANG Yungang, HOPKE P. K., CHALUPA D. C., et al. Long-term characterization of indoor and outdoor ultra-fine particles at a commercial building. *Environment Science & Technology*, **2010**, 44(15): 5775-5780
- [13] WILSON W. E., MAGE D. T., GRANT L. D. Estimating separately personal exposure to ambient and nonambient particulate matter for epidemiology and risk assessment: Why and how. *Journal of Air & Waste Management Association*, **2000**, 50(7): 1167-1183
- [14] NAZAROFF W. W. Indoor particle dynamics. *Indoor Air*, **2004**, 14(S7): 175-183
- [15] THATCHER T. L., LUNDEN M. M., REVZAN K. L., et al. A concentration rebound method for measuring particle penetration and deposition in the indoor environment. *Aerosol Science and Technology*, **2003**, 37(11): 847-864