

# 控制室内甲醛和 $\text{PM}_{2.5}$ 的新风净化系统 优化设计

邹惠芬<sup>1</sup>, 岳志安<sup>1</sup>, 彭 辉<sup>1</sup>, 许华萌<sup>1</sup>, 徐珊珊<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳城市建设学院市政与环境工程系, 辽宁 沈阳 110167)

**摘 要** 目的 探讨在新风净化系统下室内空气品质的变化情况, 提出控制室内污染物的合理方法. 方法 建立数学模型, 以某办公房间在雾霾天气典型工况下的实测结果对计算模型进行验证; 模拟3种送风方式和3种排风口位置下新风净化系统对室内甲醛和可吸入肺颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  的净化情况. 结果 3种送风方式中, 置换通风方式对室内污染物的净化效果最好; 3种排风口位置中, 靠近污染源的位置, 新风净化系统对室内污染物的净化效果最好. 结论 当室外  $\text{PM}_{2.5}$  的质量浓度  $\leq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时, 新风净化系统能够较好地净化室内  $\text{PM}_{2.5}$ , 当室内采用置换通风方式, 并将排风口布置在靠近污染源的位置时, 新风净化系统对污染物的净化效果最好.

**关键词** 新风净化系统; 室内空气品质; 甲醛;  $\text{PM}_{2.5}$

中图分类号 TU834; X51

文献标志码 A

## Optimization Design of Fresh Air Purification System with Formaldehyde and $\text{PM}_{2.5}$ Controlled in Purification Room

ZOU Huifen<sup>1</sup>, YUE Zhian<sup>1</sup>, PENG Hui<sup>1</sup>, XU Huameng<sup>1</sup>, XU Shanshan<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;  
2. Department of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** The change of indoor air quality under the fresh air purification system was explored to be proposed a reasonable method to control indoor pollutants. In this paper, a mathematical model is established, and verified by the measured results of a certain office room under typical working conditions in haze weather. The purification of indoor formaldehyde and  $\text{PM}_{2.5}$  particles with fresh air purification system under three air supply modes and three air return ports simulated was investigated. The results show that among of the three kinds of air supply way, the way of

收稿日期: 2019-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978421)

作者简介: 邹惠芬(1972—), 女, 教授, 博士, 主要从事建筑节能和空气品质保障技术等方面研究.

displacement ventilation on indoor pollutants purification effect is best; among of the 3 kinds of return air mouth position, purification effect with the position close to the location of the pollution sources is best; When the outdoor  $\text{PM}_{2.5}$  mass concentration  $\leq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , the fresh air purification system can achieve a better purification effect for indoor  $\text{PM}_{2.5}$ . When displacement ventilation is adopted in the room and the return air outlet is arranged near the pollution source, the fresh air purification system has the best purification effect on pollutants.

**Key words:** fresh air purification system; indoor air quality; formaldehyde;  $\text{PM}_{2.5}$

绿色建筑更注重室内环境舒适和健康<sup>[1-2]</sup>. 在我国严寒地区的冬季, 为了维持室内的热舒适, 用户经常关闭门窗, 导致室内空气不通畅, 达不到规范中所要求的换气次数, 使得室内空气品质下降, 严重影响着人们的身心健康. 为了保证冬季室内热舒适和良好空气品质, 一系列的新风净化设备应运而生. 新风净化系统可以在保证室内空气品质的前提下尽可能减小对室内热舒适的影响. 但是国内对新风净化系统的应用并没有普及, 我国新风净化系统的安装率比欧洲低将近 89%. 随着人们对新风认识度的提升和室内空气污染情况日益严峻, 我国的新风净化系统必然会走向一个快速发展的阶段<sup>[3-4]</sup>. 欧阳沁等<sup>[5]</sup> 针对长江以北地区的住宅式新风净化系统进行了研究, 在冬季, 通过门窗渗透进入室内的新风量远无法达到室内人员所需的新风量, 因此, 新风净化系统就成为保证冬季供暖地区室内新风量的有效途径和方法. T. Maier 等<sup>[6]</sup> 通过实验研究了各种通风方式下室内二氧化碳浓度的变化情况, 得出采用新风净化系统的住户能够营造更好的室内空气环境. B. Q. Deng 等<sup>[7]</sup> 采用模拟的方法, 通过改变新风机净化系统的运行工况, 分析了室内 VOC 的浓度变化情况, 当运行工况为连续通风时, 室内 VOC 的质量浓度最低, 但是如果新风净化系统通风停止运行, 室内 VOC 的质量浓度会迅速增高, 降低室内空气品质. 国内对新风净化系统的研究起步较晚, 且对于兼顾室内外多种污染物的新风净化系统综合优化策略的研究还较为缺乏. 笔者采用数值模拟的方法研究机械通风工况

下室内的空气品质, 并通过试验对计算模型进行验证. 针对某一办公建筑, 通过实测和模拟的方法对办公建筑中 3 种气流组织形式及 3 种回风口位置对室内甲醛和  $\text{PM}_{2.5}$  的净化情况进行对比研究, 确定最佳的组织形式和回风口位置. 通过对典型工况的模拟, 分析采用新风净化系统实现室内外多种污染物同时控制的可行性, 优化设计控制室内污染物的新风净化系统.

## 1 计算模型

室内和室外的污染源均会影响室内的空气品质. 室内存在多种污染源, 但为了简化多种污染物的控制, 仅取室内建筑材料和设施释放的甲醛污染物作为室内的代表污染物. 用可吸入肺颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  代表来源于室外的污染物. 假定  $\text{PM}_{2.5}$  仅来自于室外大气, 认为室内无  $\text{PM}_{2.5}$  释放源. 运用组分输运方程对污染物的运移进行模拟<sup>[8-9]</sup>.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \frac{\partial C_j}{\partial x_j} \right) + S. \quad (1)$$

式中:  $C_j$  为污染物质量浓度;  $K$  为湍流扩散系数,  $K = \nu_t / \sigma$ ;  $\sigma = 0.7$ ;  $\nu_t$  为湍流动力黏性系数;  $S$  为污染物的排放源强度.

笔者将利用式(1)对室内的空气品质进行模拟. 由于对室内流场的求解主要是求解守恒型方程, 为了保证模型区域内物理量的守恒性, 笔者采用有限体积法对控制方程进行离散. 进而求解得出室内各种流场的分布情况.

## 2 模型验证

为了验证计算模型的可靠性, 以某办公

房间在雾霾天气典型工况下的实测结果对计算模型进行验证. 实验测试房间有效面积为 15.75 m<sup>2</sup>. 长 4.2 m, 宽 3.75 m, 层高为 3.0 m. 测试房间密闭性较好, 因此不考虑门窗渗风对室内空气环境的影响. 新风净化系

统采用顶送顶回的通风方式, 在房间南墙的顶部两个角落各安装一个直径为 125 mm 的圆形塑料送风口, 在顶棚的西北角安装一个直径为 125 mm 的圆形排风口(见图 1). 测点布置如图 2 所示.

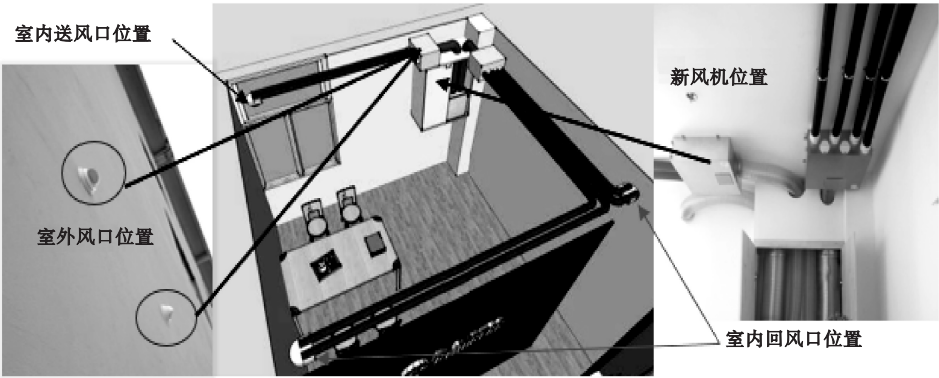


图 1 测试房间位置图  
Fig. 1 Picture of test room

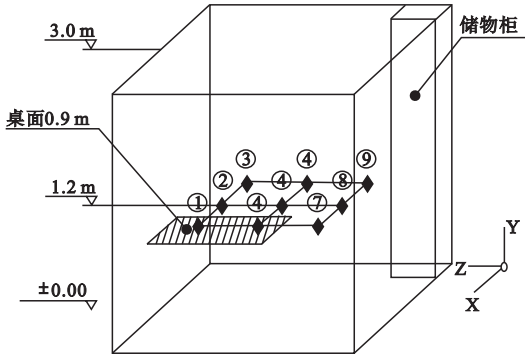


图 2 测点分布图  
Fig. 2 Picture of measuring point layout

实验测试的房间功能为办公, 室内人员大多数时间处于坐姿状态, 为了更加准确地反映室内污染物的分布情况, 测点位置仅考

虑室内人员坐姿高度 1.2 m 平面内的污染物质量浓度.

测试之前先维持房间密闭 12 h. 12 h 后开启新风机一档开关, 送风量为 199 m<sup>3</sup>/h, 并开始测试, 测试时间持续 1 h, 每 10 min 记录一次数据.

测试当天室外 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度为 154 μg/m<sup>3</sup>. 新风净化系统一档工况运行, 此时新风机对室外 PM<sub>2.5</sub> 的一次通过净化效率为 76.02%, 送风口处 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度为 36 μg/m<sup>3</sup>. 魏昊然<sup>[10]</sup>根据各环境参数对甲醛散发率的影响, 得出甲醛散发率与各参数之间的关系为

$$R = \frac{-0.14(0.0018t - 4.29)(0.112D + 0.164)(0.096 + 5.587N)}{135.07C + 14.49} \tag{2}$$

式中:  $R$  为甲醛释放率, mg/(m<sup>3</sup>·s);  $C$  为室内甲醛质量浓度, mg/m<sup>3</sup>;  $t$  为室内温度, °C;  $D$  为相对湿度, %;  $N$  为换气次数, 次/h.

新风净化系统在一档运行时的送风量为 199 m<sup>3</sup>/h, 房间体积为 47.25 m<sup>3</sup>, 室内温度设为 18 °C, 相对湿度设为 45%, 初始时刻,

室内的甲醛质量浓度为 0.17 mg/m<sup>3</sup>, 利用式(2)计算可知, 该办公室模型的室内甲醛释放率为 0.19 mg/(m<sup>3</sup>·s). 将送风口处的 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度和甲醛释放率、新风净化系统送风量作为已知边界条件进行稳态模拟, 模拟计算结果与实测结果对比如图 3 所示.

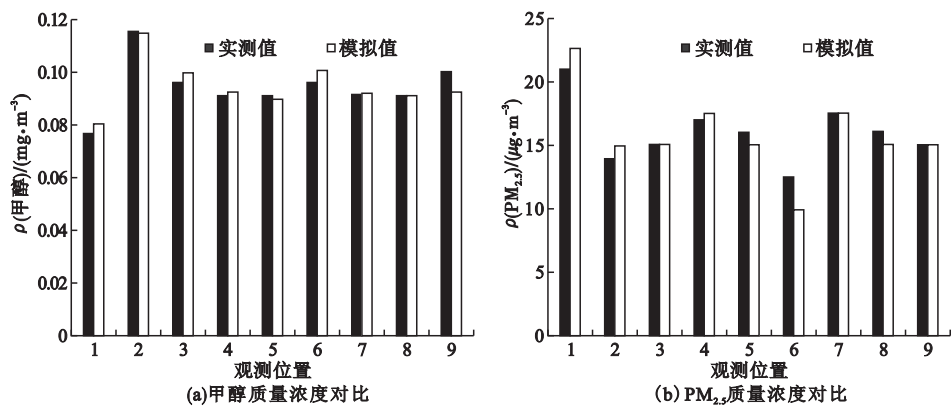


图3 甲醛质量浓度和PM<sub>2.5</sub>质量浓度实测与模拟结果对比

Fig. 3 Comparison between the measured and simulated results

我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)中规定室内甲醛的1 h 均值不能超过 0.1 mg/m<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub> 的日平均质量浓度≤35 μg/m<sup>3</sup>时为优. 从图 3 可以看出, 新风净化系统采用顶送顶回的通风方式下, 室内局部位置的甲醛污染物质量浓度并未达标, PM<sub>2.5</sub> 质量浓度被控制在《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 允许的范围内. 图 3 显示模拟计算结果与实测结果吻合较好. 因此, 通过此计算模型进行新风净化系统的优化设计策略研究有比较好的可靠性.

### 3 不同送风方式下新风净化系统对污染物的控制能力分析

#### 3.1 工况设置

新风净化系统设置为一档风量: 送风量

199 m<sup>3</sup>/h, 排风量 160.8 m<sup>3</sup>/h, 各种通风方式下的风口大小和风速如表 1 所示.

表1 3种送风方式下新风净化系统的参数设置  
Table 1 Parameter setting of fresh air purification system under three air supply modes

送风方式	送风口 长宽/m	排风口 长宽/m	送风风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	排风风速/ (m·s <sup>-1</sup> )
顶送顶回	0.2×0.1	0.2×0.1	2.67	2.22
上送下回	0.2×0.1	0.2×0.1	2.67	2.22
置换通风	2×0.15	0.75×0.3	0.185	0.2

新风净化系统的 3 种送风方式如图 4 所示. 在研究室内 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度时, 假设室外 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度小于等于 150 μg/m<sup>3</sup>, 且室内 PM<sub>2.5</sub> 全部来自室外.

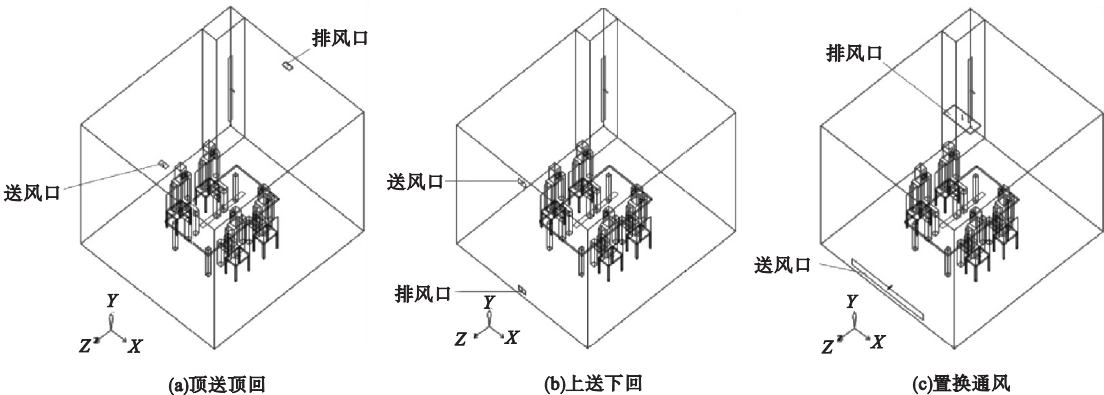


图4 3种送风方式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three air supply modes

3.2 结果分析

不同送风方式下室内人体呼吸高度1.2 m处的空气龄分布如图5所示.图中 $x$ 轴表示该房间模型的 $x$ 轴方向.

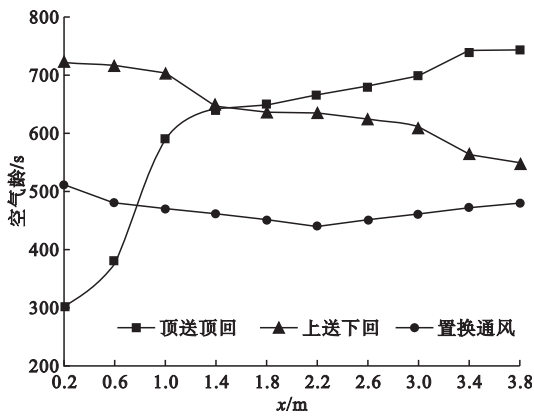


图5 不同送风方式人体呼吸高度1.2 m空气龄分布  
Fig.5 Air age distribution at breathing height 1.2 m under different air supply modes

由图5可知,顶送顶回方式下,送风口位置处的空气龄最小,空气龄沿房间的 $x$ 轴正方向递增,人体坐姿呼吸高度上的空气龄为665 s;上送下回方式下,空气龄沿房间的 $x$ 轴正方向递减,且递减趋势弱于顶送顶回的增加趋势,人体坐姿呼吸高度上的空气龄为646 s;置换通风方式下,人体坐姿呼吸高度上的空气龄分布较均匀,且小于另外两种送风方式,空气龄大小为465 s.

取测试房间最理想的平均空气龄为429 s,3种送风方式下房间的换气效率如表2所示.

表2 3种送风方式下的换气效率值  
Table 2 Ventilation efficiency values in different air supply modes

送风方式	送排风口特性	最理想的平均空气龄/s	平均空气龄/s	换气效率/%
顶送顶回	组合风口	429	665	64.5
上送下回	同侧	429	646	66.4
置换通风	低速	429	465	92.2

换气效率为可能最短的空气龄与平均空气龄之比<sup>[11-15]</sup>.换气效率愈高室内空气停留时间越短,空气的清洁度愈高.因为置换通风在房间的工作区域接近层流的状态,所以其换气效率高,从表2可以看出置换通风工况下的房间换气效率为92.2%,明显高于其他两种送风方式.

不同送风方式下室内人体呼吸高度1.2 m处甲醛分布如图6所示.上送下回送风方式下房间整体的甲醛质量浓度均值最大为0.099 mg/m<sup>3</sup>,顶送顶回次之为0.094 mg/m<sup>3</sup>,且顶送顶回送风方式下室内的甲醛质量浓度均匀性最差,采用置换通风的送风方式,房间整体的甲醛质量浓度均值最小为0.045 mg/m<sup>3</sup>,且办公区域甲醛质量浓度较为均匀.所以相比于其他两种送风方式,置换通风更有利于室内污染物的控制.

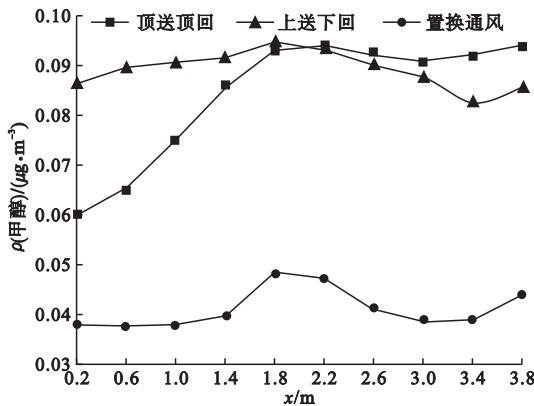


图6 不同送风方式人体呼吸高度1.2 m处甲醛分布  
Fig.6 Formaldehyde distribution at breathing height 1.2 m under different air supply modes

对于排除污染物来说,通风效率也称为排污效率<sup>[16-20]</sup>.结合不同送风方式下人体坐姿呼吸高度1.2 m上的甲醛质量浓度,3种送风方式下新风净化系统的通风效率如表3所示.3种送风方式下只有置换通风的工作区甲醛浓度低于排风口处的甲醛浓度,且通风效率在3种送风方式中最高,为1.11,顶送顶回和上送下回方式的通风效率相近,分别为0.9和0.89.所以,3种送风方式中,置换通风更能够有效地排除室内的甲醛污染物.



表3 3种送风方式下新风净化系统的通风效率

Table 3 Ventilation efficiency of fresh air purification system in different air supply modes

送风方式	排风口处	送风口处	工作区	
	甲醛质量	甲醛质量	甲醛质量	通风效率
	浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )	浓度/ (mg·m <sup>-3</sup> )		
顶送顶回	0.085	0	0.094	0.9
上送下回	0.089	0	0.099	0.89
置换通风	0.050	0	0.045	1.11

不同送风方式下室内人体坐姿呼吸高度1.2 m处PM<sub>2.5</sub>质量浓度分布如图7所示.顶送顶回送风方式下房间送风口下的PM<sub>2.5</sub>质量浓度最高为36 μg/m<sup>3</sup>,人体坐姿呼吸高度1.2 m处平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度为20 μg/m<sup>3</sup>;上送下回送风方式下人体坐姿呼吸高度1.2 m处平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度为19 μg/m<sup>3</sup>左右,置换通风送风方式下人体坐姿呼吸高度1.2 m处平均PM<sub>2.5</sub>质量浓度为3种送风方式中的最小值13 μg/m<sup>3</sup>.

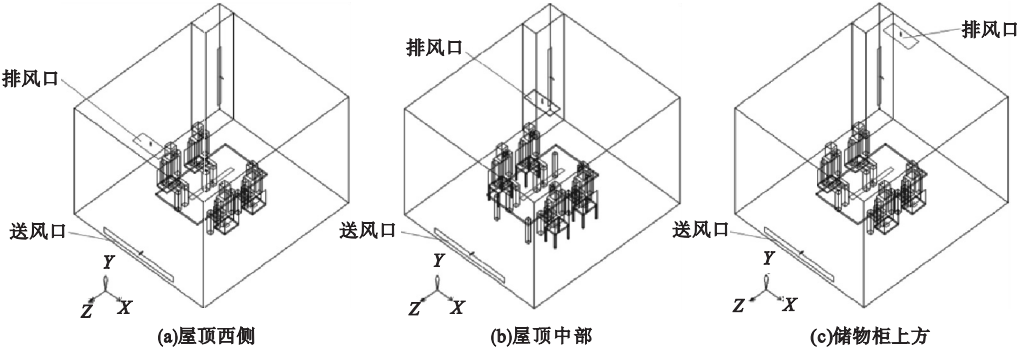


Fig. 8 Schematic diagram of return air inlet location

4.2 结果分析

对3种排风口位置时的室内空气质量进行模拟,模拟时不改变置换通风的送风口位置,送排风的风速与表1保持一致.室内人体坐姿呼吸高度1.2 m处的甲醛浓度分布如图9所示.3种排风口位置下,甲醛质量浓度在x>1 m时的变化规律基本一

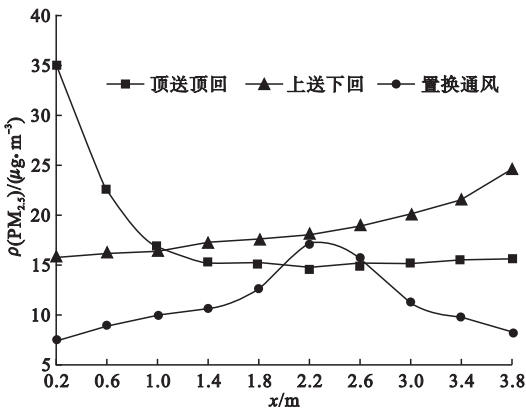


图7 不同送风方式人体呼吸高度1.2 m处PM<sub>2.5</sub>分布

Fig. 7 PM<sub>2.5</sub> distribution at breathing height 1.2 m under different air supply modes

4 排风口位于不同位置时新风净化系统对污染物的控制效果分析

4.1 工况设置

图8为采用置换通风方式时新风净化系统的3种排风口位置,分别是屋顶西侧(与送风口同侧)、屋顶中部和储物柜上方(屋顶东侧),其中储物柜就是甲醛释放源.

致,其中当排风口位于甲醛污染源上方时,房间人体坐姿呼吸高度1.2 m处的甲醛质量浓度相比另外两种排风口位置来说更低,所以将排风口布置在甲醛污染源的上方起到了“局部排风”的作用,既能有效地防止甲醛在室内的扩散,又能提高新风净化系统对甲醛的控制效果.

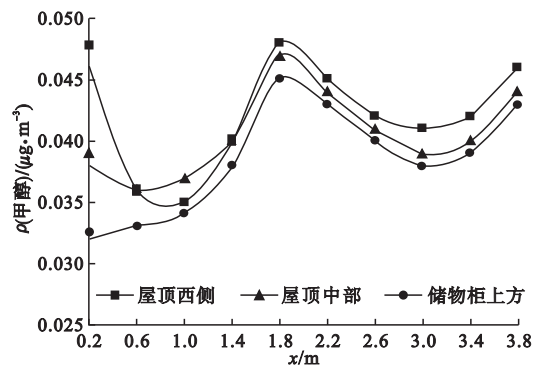


图9 不同排风口位置人体呼吸高度1.2m 甲醛分布

Fig.9 Formaldehyde distribution at breathing height 1.2 m of different air return outlet

不同排风口位置时,房间排风口位置处的甲醛如表4所示,结合不同送风方式下人体坐姿呼吸高度1.2 m处的甲醛质量浓度,3种排风口位置下新风净化系统的通风效率如表4所示.

表4 3种排风口位置下新风净化系统的通风效率

Table 4 Ventilation efficiency of fresh air purification system at three return air outlets

排风口位置	稳态时排风质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	送风口质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	工作区质量浓度/ ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	通风效率
屋顶西侧	0.047	0	0.046	1.02
屋顶中部	0.05	0	0.045	1.11
储物柜上方	0.053	0	0.043	1.23

从表4可以看出当排风口靠近储物柜上方时,排风口处的甲醛质量浓度高于其他两种排风口处的甲醛质量浓度,因为储物柜是室内甲醛的主要释放源.排风口位于其上方时,能够减少大部分甲醛在室内的停留时间.3种排风口位置下的通风效率都大于1,与送风口同侧和屋顶中部两种排风口位置条件下的通风效率分别为1.02和1.11,排风口位于甲醛污染源上方时新风净化系统的通风效率最高为1.23.

3种排风口位置下房间人体坐姿呼吸高度1.2 m处的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随房间x轴方向的变化规律基本一致(见图10).

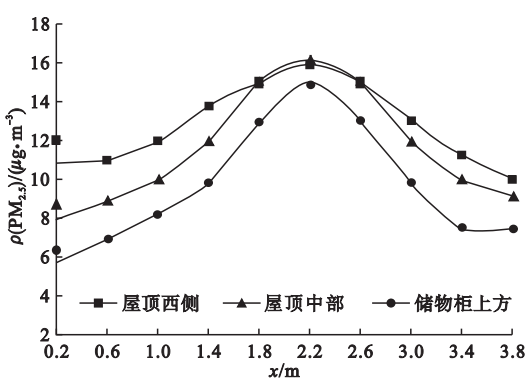


图10 不同排风口位置人体呼吸高度1.2 m处 $\text{PM}_{2.5}$ 分布

Fig.10  $\text{PM}_{2.5}$  distribution at breathing height 1.2 m of different air return outlet

由图10可知,排风口位于与送风口同侧时,房间1.2 m处的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度最高 $13\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;排风口位于屋顶中部时,房间1.2 m高度上的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度居中 $12\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;排风口位于甲醛污染源上方时,房间1.2 m高度上的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度最低 $9\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 5 结 论

(1)顶送顶回、上送下回、置换通风3种送风方式中,置换通风方式下房间人体坐姿呼吸高度1.2 m处的污染物质量浓度均值最小,且办公区域污染物质量浓度均匀性最好.置换通风与其他两种相比,能够营造更好的室内空气品质.

(2)将排风口布置在靠近污染源的位置既能有效地抑制甲醛在室内的扩散,又能提高新风净化系统对甲醛的控制效果.

(3)当室外 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量质量浓度 $\leq 150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,应用新风净化系统完全能够有效地控制室内的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在标准允许的范围内.

## 参考文献

[1] 李百战,郑洁,姚润明,等.室内热环境与人体热舒适[M].重庆:重庆大学出版社,2012.  
(LI Baizhan,ZHEN Jie,YAO Runming,et al. Indoor thermal environment and human thermal

- comfort [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2012. )
- [2] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (ZHU Yingxin. Built environment [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. )
- [3] 果海凤, 胡颐衡, 刘郁林, 等. 新风系统在住宅建筑中的应用研究[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(3): 69-71. (GUO Haifeng, HU Yiheng, LIU Yulin, et al. Application research of fresh air system in residential building [J]. Building energy & environment, 2019, 38(3): 69-71. )
- [4] 田博. 住宅建筑新风系统的比较与节能研究[J]. 资源节约与环保, 2014(3): 32-33. (TIAN Bo. Comparison and energy conservation of residential building fresh air system [J]. Resources economization & environmental protection, 2014(3): 32-33. )
- [5] 欧阳沁, 朱颖心. 北方地区住宅冬季通风换气方案研究[J]. 中国住宅设施, 2004(6): 26-28. (OUYANG Qin, ZHU Yingxin. Study on ventilation scheme for residential buildings in north China in winter [J]. China housing facilities, 2004(6): 26-28. )
- [6] MAIER T, KIZACZEK M, TEJCHMAN J. Comparison of physical performance of the ventilation residential homes [J]. Energy and buildings, 2009(41): 337-353
- [7] DENG B Q, CHANG N K. CFD Simulation of VOCs concentrations in a resident building with new carpet under different ventilation strategies [J]. Building and environment, 2007(42): 297-303.
- [8] 沈加超. 基于街谷模型的PM<sub>2.5</sub>扩散数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015. (SHEN Jiachao. Numerical simulation of PM<sub>2.5</sub> diffusion based on street conyons model [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015. )
- [9] 蒋德海, 蒋维楣, 苗世光. 城市街道峡谷气流和污染物分布的数值模拟[J]. 环境科学研究, 2006(3): 7-12. (JIANG Dehai, JIANG Weimei, MIAO Shiguang. The numerical simulation of air flow and pollutant distribution in street canyons [J]. Research of environmental sciences, 2006(3): 7-12. )
- [10] 魏昊然, 周浩, 乔利锋, 等. 住宅内甲醛散发率的估算方法[J]. 南昌大学学报(工科版), 2016, 38(1): 32-38. (WEI Haoran, ZHOU Hao, QIAO Lifeng, et al. Estimation method for indoor formaldehyde emission rate in residential buildings [J]. Journal of Nanchang university (engineering & technology), 2016, 38(1): 32-38. )
- [11] 耿世彬, 王瑞海. 新装修住宅内甲醛质量浓度测试及其影响因素分析[J]. 建筑热能通风空调, 2005(3): 96-99. (GENG Shibin, WANG Ruihai, Investigation on the pollution of formaldehyde in newly decorated apartments and analysis of the effect factor [J]. Building energy & environment, 2005(3): 96-99. )
- [12] DELPHINE B, PIERRE M, VALÉRIE D, et al. Formaldehyde emission behavior of building materials: On-site measurements and modeling approach to predict indoor air pollution [J]. Journal of hazardous materials, 2014(280): 164-173.
- [13] LIANG, W H, YANG X D. Indoor formaldehyde in real buildings: Emission source identification, overall emission rate estimation, concentration increase and decay patterns [J]. Building and environment, 2013(69): 114-120.
- [14] 毛惠娟. 室内环境中甲醛检测方法及防治措施研究[J]. 绿色环保建材, 2017(6): 12-13. (MAO Huijuan. Study on formaldehyde detection and prevention measures in indoor environment [J]. Green environmental protection building materials, 2017(6): 12-13. )
- [15] 谭双, 孙丽颖. 办公室应用辐射供暖加新风系统的气流组织研究[J]. 流体机械, 2016, 44(10): 59-64. (TAN Shuang, SUN Liyin, Air distribution investigation of office installing radiant heating combining with fresh Air system [J]. Fluid machinery, 2016, 44(10): 59-64. )
- [16] 蔡芬, 胡平放. 通风效率性能参数在通风设计应用的探讨[J]. 建筑热能空调, 2005(1): 73-75. (CAI Fen, HU Pingfang. Study on application of ventilation efficiency indices in ventilation system design [J]. Building energy & environment, 2005(1): 73-75. )
- [17] 吴小舟, 赵加宁, 王洋浩. 低温辐射地板供暖与供新风室内热环境及通风效率实验研究[J]. 暖通空调, 2015, 45(9): 64-69. (WU Xiaozhou, ZHAO Jianing, WANG Fenghao. Experimental study of indoor thermal environment and ventilation effectiveness in a room with low temperature radiant floor heating system and ventilation systems [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2015, 45(9): 64-69. )
- [18] 顾建明, 连之伟, 陆明琦. 通风系统性能的评价[J]. 暖通空调, 2002(5): 100-101. (GU Jianming, LIAN Zhiwei, LU Mingqi. Evaluation of ventilation system performance [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2002(5): 100-101. )
- [19] 罗清海. 通风策略对室内空气品质的影响[J]. 制冷空调与电力机械, 2007(2): 14-17. (LUO Haiqing. Influence of ventilation strategy on indoor air quality [J]. Power generation technology, 2007(2): 14-17. )
- [20] 马仁民. 通风的有效性与室内空气品质[J]. 暖通空调, 2000(5): 20-23. (MA Renmin. Ventilation effectiveness and IAQ [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2000(5): 20-23. )
- [21] 高义人. 层状通风对兰州地区室内空气品质及热环境影响的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014. (GAO Yiren. Numerical study of indoor air quality and the influence of the mal environment under stratum Ventilation in Lanzhou [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. )
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)