文章编号:1007－6735(2026)05－0618－11　DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20250922001

混合通风参数对冬季地暖房间内甲醛去除和热舒适性的影响研究

黄远东，　徐智超，　李　彬，　王子佳，　罗　杨，　崔鹏义
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘要：在地暖房间常需要采用新风系统来改善空气质量，新风系统送风参数的选择尤为重要。基于计算流体动力学数值模拟方法，探究混合通风的送风温度和送风角度对地暖房间甲醛去除效果和热舒适性的影响。研究中设定甲醛由办公桌释放，考虑送风角度(30°、60°、90°)和送风温度(10、15、20 ℃)的不同组合。基于模拟结果，分析房间内不同竖向截面和脚踝活动区域的气流速率、温度、预测平均评价–预测不满意百分比指标(predicted mean vote and predicted percentage of dissatisfied, PMV-PPD)和甲醛质量分数分布特征，并且计算头足温差和甲醛去除效果评价指标。研究结果表明：送风角度一定时，随着送风温度升高，地板温度和送风温度的温差减小，热浮力作用减弱，导致室内气流速率减小；送风温度一定时，送风角度影响新风流动路径，进而改变室内涡旋气流的分布；送风温度升高会使室内温度升高，室内温度分布与气流速率分布密切相关，高温区域常出现在气流低速区；头足温差计算结果，表明室内热舒适性符合一级满意度；PMV-PPD 表明，在送风温度为 20 ℃、送风角度为 60°时，室内一级舒适区占比最多；在送风温度为 15 ℃、送风角度为 30°时甲醛去除效果最佳。

关键词：混合通风；地暖；热舒适性；甲醛；污染物去除率
中图分类号：X 196　　**文献标志码：**A

Effect of mixed ventilation parameters on formaldehyde removal and thermal comfort in underfloor heating rooms during winter

Huang Yuandong,　Xu Zhichao,　Li Bin,　Wang Zijia,　Luo Yang,　Cui Pengyi
(*School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*)

收稿日期: 2025−09−22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42277477)
通信作者: 黄远东(1964—)，男，教授．研究方向：室内外空气质量模拟．E-mail：huangyd@usst.edu.cn

引文格式: 黄远东，徐智超，李彬，等．混合通风参数对冬季地暖房间内甲醛去除和热舒适性的影响研究[J]．上海理工大学学报，2026，48(5)：618-628.
Citation: Huang Yuandong, Xu Zhichao, Li Bin, et al. Effect of mixed ventilation parameters on formaldehyde removal and thermal comfort in underfloor heating rooms during winter[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(5): 618-628.

Abstract: A fresh air supply system is often necessary in winter to enhance indoor air quality in underfloor heating rooms, making the selection of air supply parameters particularly important. Computational fluid dynamics simulations were employed to investigate the effects of supply air temperature and supply angle under mixed ventilation on the formaldehyde removal efficiency and indoor thermal comfort in an underfloor heating room. The study set the release of formaldehyde from the office desk, and different combinations of supply air angles (30°, 60°, 90°) and supply air temperatures (10, 15 and 20 °C) were considered. Based on the simulation results, distribution characteristics of air flow velocity, temperature, predicted average rating minus predicted dissatisfaction percentage indicator (predicted mean vote and predicted percentage of dissatisfied, PMV-PPD) and formaldehyde mass fraction on different vertical planes and in the ankle activity region were analyzed. Quantitative calculations of the head-to-foot temperature difference and formaldehyde removal efficiency indicators were also conducted. The research results indicate that when the supply air angle is constant, an increase in supply air temperature reduces the temperature difference between the floor and the supply air, the thermal buoyancy effect weakens, leading to a decrease in airflow velocity. When the supply air temperature is constant, the change in the supply air angle affect the flow path of the fresh air, thereby altering the distribution of vortex airflow. An increase in supply air temperature will increase the indoor temperature. The indoor temperature distribution is closely related to the air flow velocity distribution, high-temperature areas often occur in low-velocity air flow zones. The calculation of head-to-foot temperature difference indicates that the indoor thermal comfort meets the first-level satisfaction standard. The PMV-PPD indicates that when the supply air temperature is 20 °C and the supply air angle is 60°, the proportion of the first-level comfort zone in the indoor space is the largest. The best formaldehyde removal efficiency is achieved at a supply air temperature of 15 °C and a supply air angle of 30°.

Keywords: *mixed ventilation*; *underfloor heating*; *thermal comfort*; *formaldehyde*; *pollutant removal rate*

城市居民有超过 80% 的时间在室内度过[1-2]，因此，室内空气质量对人们的健康至关重要。改善室内空气质量的措施包括除源、通风和空气净化[3-8]，不同的处理措施各有利弊。冬季室内为了保证热舒适，会采取密闭空间并使用空调、地暖、暖气片等一系列的采暖设施。然而，室内长时间封闭采暖会导致污染物浓度增加，影响人体健康。因此，需要采用新风系统改善室内空气品质。

新风能改善室内空气质量。邹惠芬等[9]采用 3 种送风方式和 3 种排风口位置下的新风净化系统，研究了新风净化系统对室内空气品质的影响，探究了办公室内的甲醛和 $PM_{2.5}$。结果表明，排风口靠近污染源，净化效果良好，同时采用置换通风方式的净化效果最好。刘雅楠等[10]研究新风系统的不同通风方式对教室内污染物的影响，通过计算流体动力学（computational fluid dynamics, CFD）对教室内 CO_2 和 $PM_{2.5}$ 进行数值模拟。结果显示，在学生呼吸区高度内，上送上回通风方式下 CO_2 浓度最低，通风效率最高，室内 $PM_{2.5}$ 的浓度最低。Zhang 等[11]研究了住宅用新风系统纤维过滤器的运行性能。

冬季室内为了保障热舒适性，人们开始关注采暖设备送风的作用。Cetin 等[12]采用缩尺模型，耦合置换通风和地板采暖，探究了粒径为 0.5、5.0、10.0 μm 的颗粒在室内的分散和沉积特性。结果表明，污染物分布与通风处出口、开口结构以及颗粒源位置高度相关。Causone 等[13]研究地暖耦合置换通风房间内不同类型的污染源。结果表明，污染源与热源无关系时，地板采暖和置换通风也很难保证室内空气品质，污染源释放过多，因此，需要使用高效率的通风。Zhou 等[14]基于通风耦合地暖室内，开展采暖温度对粒径为 1.0 μm 颗粒的影响研究，结果表明：随着供热温度的升高，室内颗粒去除加快；随着入口风速的增加，沉积在地板上的颗粒数量减少；当地板温度为 308 K

时，采用下送风模式，颗粒物清除时间可减少15%。

甲醛为常见的室内污染物，含量超标会刺激眼、鼻、喉，引发哮喘和支气管炎，并可能致癌。学者们已关注室内甲醛的污染和去除问题。赵涛杰等[15]针对刚装修好的房间，开展地层通风的送风角度(30°、60°、90°)对甲醛扩散的影响研究。结果表明：送风角度为60°、风速为1.2 m/s时，可降低坐姿呼吸高度(1.2 m)和站立时呼吸高度(1.8 m)的甲醛浓度；送风角度为30°时脚踝区域甲醛浓度降低；送风角度为90°时送风口一侧的甲醛浓度降低，对侧区浓度升高；送风角度为60°时，甲醛浓度整体最低。Tian等[16]比较了置换通风和混合通风方式，研究了不同高度源位置的甲醛在室内的扩散分布规律。结果表明：相较于置换通风，污染源位于人员近旁时，呼吸区甲醛浓度较低；污染源位于人员上方时，呼吸区甲醛浓度基本持平；污染源位于人员下方时，呼吸区甲醛浓度也较低。Kempton等[17]研究了气密性对室内空气质量的影响。其调查的室内空气质量参数包括CO_2、$PM_{2.5}$、甲醛、挥发性有机化合物、NO_2、CO和氡气的浓度，以及相对湿度和霉菌。结果表明，增加气密性可以减少室外污染物的渗透。Qin等[18]研究城市客舱室内空气甲醛污染，发现室内甲醛水平随着呼吸区高度的升高和送风速率的增加而降低。

虽有学者研究了室内甲醛扩散问题，但针对冬季密闭采暖办公室在配置新风系统条件下，家具释放的甲醛的去除效果及热舒适性，尚缺乏系统耦合研究。基于此，本文考虑送风温度和送风角度的不同组合，评估不同通风参数下室内热舒适性和甲醛扩散分布及去除效果，为冬季房间地暖和新风系统的耦合优化来改善室内空气品质和热舒适性提供支撑。

1 研究方法

1.1 物理模型

Zhuang等[19]采用尺寸为5 m×4 m×3 m(长×宽×高)的空房间做模型，研究了装设不同空调系统的房间内颗粒物的去除及沉积问题。本文也建立一个尺寸为5 m×4 m×3 m的房间，且与Zhuang等[19]的房间模型不同，本文建立的房间包含1扇门、2扇窗户、4盏灯和一个尺寸为1 m×1 m×0.5 m的办公桌(见图1)。办公桌位于房间地面中心，其表面为甲醛释放源。建立三维直角坐标系，原点位于地面的一端点处。

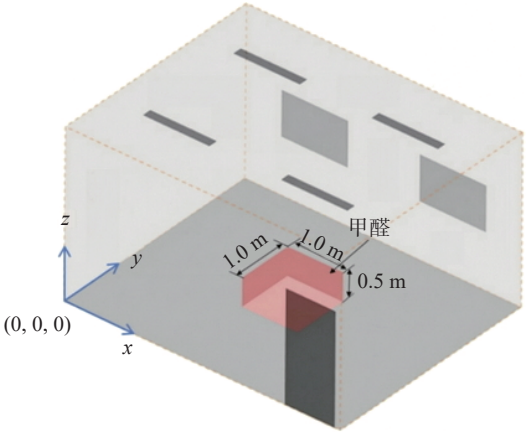

图1 含甲醛释放源的房间

Fig. 1 Room with emission source of formaldehyde

为探究混合通风下地暖室内甲醛的去除效果和热舒适性，在图1所示房间内设置通风系统，构成地暖耦合混合通风(coupling mixed ventilation with underfloor heating, MVF)的房间(见图2)。地暖为平铺在整个地面(尺寸为5 m×4 m)的辐射供暖系统[20]。混合通风的进风口位于天花板中心，尺寸为0.6 m×0.3 m；排风口置于房间壁面靠近地面的位置(对称于墙面的两侧)，尺寸为0.4 m×0.4 m[21-22]。

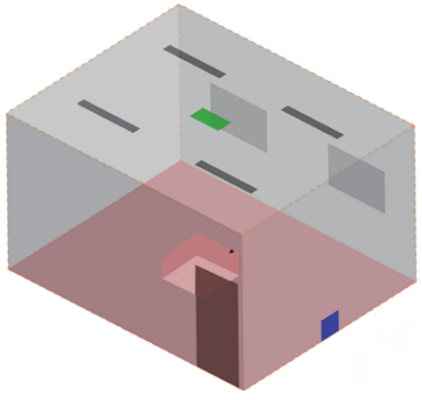

图2 MVF房间

Fig. 2 Room with MVF

参考前人研究和《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》，地暖供热的地板表面温度设为25 ℃[20]；送风速率选定为0.2 m/s(为防止人体吹风感的影响，人体表面风速需低于0.25 m/s[23])。根据《室内空气质量标准》的要求，室内最低送风量为30 m^3/(h·人)，而基于选定的送风速率(0.2 m/s)和进风口尺寸(0.6 m×0.3 m)，求得本文设置的送风量为129.6 m^3/h，满足办公室内1～

4 人使用的通风量要求。考虑不同送风角度（30°、60°、90°）（见图 3）和不同送风温度（10、15、20 ℃）的组合，共计 9 个工况（记为 MVF-10-30°，MVF-10-60°，MVF-10-90°，MVF-15-30°，MVF-15-60°，MVF-15-90°，MVF-20-30°，MVF-20-60°，MVF-20-90°）。

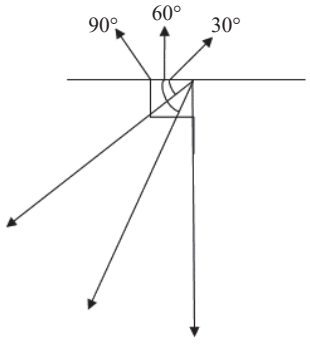

图 3　混合通风下的送风角度示意图

Fig. 3　Schematic diagram of air supply angle under mixed ventilation

1.2　数值模型

1.2.1　控制方程及湍流模型

采用雷诺平均的 N-S 方程描述通风和热浮力引起的湍动气流，其控制方程由连续性方程、动量方程和能量方程组成。湍流模型则采用重整化群（renormalization group, RNG）k-ε模型[24]。对于房间内辐射热传递模拟则采用离散方向（discrete ordinates, DO）模型[25]。本文考虑的污染物为甲醛，其在流场中的扩散基于组分输运方程模拟。

1.2.2　边界条件与数值方法

本研究考虑了 3 种送风温度（10、15、20 ℃）和恒定的地板温度（25 ℃）。由于室内温度差异不大且未涉及高温情况，因此，将办公桌表面的甲醛释放率设为定值 2.78×10^{-12} kg/(m^2·s)[26]。进风口处设置风速，排风口为自由出流，建筑内外壁面、窗户、天花板、地板、门、灯、办公桌均设为无滑移边界条件。

在 ANSYS Fluent 平台上进行数值模拟。压力采用交错格式 PRESTO!求解，其他变量采用二阶迎风格式求解。压力–速度耦合则采用 SIMPLE 算法。

1.3　网格划分与网格独立性分析

采用 ICEM 14.5 以六面体网格对计算域进行离散。总共考虑了 4 套网格数，网格渐变率在 1.01～1.35 之间[27]，4 套网格数分别为 55 万（粗网格）、87 万（中网格）、147 万（细网格）和 270 万（超细网格）。通过网格敏感性分析，本研究的房间模型选用数量为 147 万的网格进行划分。

1.4　室内热环境评价指标

1.4.1　预测平均评价–预测不满意百分比指标

李洋[28]在研究中采用丹麦 Fanger 提出的预测平均评价（predicted mean vote, PMV）热感觉指标 λ_{PMV} 来主观评价室内的热舒适性。λ_{PMV} 有 7 个评价等级，如表 1 所示。

表 1　热感觉指标[29]

Tab. 1　Thermal sensation index

冷	凉	微凉	适中	微暖	暖	热
−3	−2	−1	0	+1	+2	+3

λ_{PMV} 的计算如下：

$$\begin{aligned}\lambda_{PMV}=&(0.303\exp(-0.036M)+0.028)\{(M-W)-\\&3.05\times10^{-3}[5\,733-6.99(M-W)-P_a]-\\&0.42(M-W-58.15)-1.7\times10^{-5}M(5\,867-P_a)-\\&0.001\,4M(34-T_a)-3.96\times10^{-8}f_{cl}[(T_{cl}+\\&273)^4-(T_r+273)^4]-f_{cl}h_c(T_{cl}-T_a)\}\end{aligned}\tag{1}$$

式中：M 为新陈代谢率，轻办公工作为 69.84 W/m^2；W 为人体输出功，在此室内情况下设置为 0；P_a 为水蒸气分压，由室内空气局部温度计算而来；T_a 为局部空气温度；f_{cl} 为穿衣人体和裸体表面积之比，冬季正常穿衣为 0.48；T_{cl} 为着衣外表面温度，冬季可设置为 30 ℃；T_r 为平均辐射温度，近似采用局部空气温度；h_c 为对流交换系数，由室内空气局部速度计算而来。

由于个体差异，人们对热环境有存在不满意的情况。Fanger 提出了预测不满意百分比（predicted percentage of dissatisfied, PPD）指标 δ_{PPD} 来评估在同一环境下人群中不满意率的占比。δ_{PPD} 由 λ_{PMV} 计算得到：

$$\delta_{PPD}=100-95\exp[-(0.033\,53\lambda_{PMV}^4+0.217\,9\lambda_{PMV}^2)]\tag{2}$$

λ_{PMV} 和 δ_{PPD} 的关系表现为一个开口向上的抛物线，随着 λ_{PMV} 接近舒适状态，δ_{PPD} 随之降低。根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》，1 级热舒适要求：$-0.5\leqslant\lambda_{PMV}\leqslant0.5$，$\delta_{PPD}\leqslant10\%$；2 级热舒适要求：$-1.0\leqslant\lambda_{PMV}\leqslant-0.5$ 或 $0.5\leqslant\lambda_{PMV}\leqslant1$，$\delta_{PPD}\leqslant27\%$。

1.4.2　垂直空气温差

采用头部与脚踝的温差作为评价局部热舒适的指标[30]。一般情况下，室内人们常保持坐姿状态，所以头部的位置设置在 1.1 m 高度，脚踝的位

置在 0.1 m 高度。如图 4 所示，将室内地面均分为 4 个区域，选择每个区域的中心线作为检测线（*L*1、*L*2、*L*3、*L*4），通过检测线上的温差来判断每个区域的局部热舒适。检测线上的温差计算为

$$\Delta T_{1.1-0.1} = T_{1.1} - T_{0.1} \tag{3}$$

式中：$\Delta T_{1.1-0.1}$为头足温差；$T_{1.1}$为 1.1 m 高度处的空气温度；$T_{0.1}$为 0.1 m 高度的空气温度。针对室内头足温差，主要参考 ISO 和欧盟标准，将满意度分为 3 级：小于 2 ℃ 为 1 级；小于 3 ℃ 为 2 级；小于 4 ℃ 为 3 级。

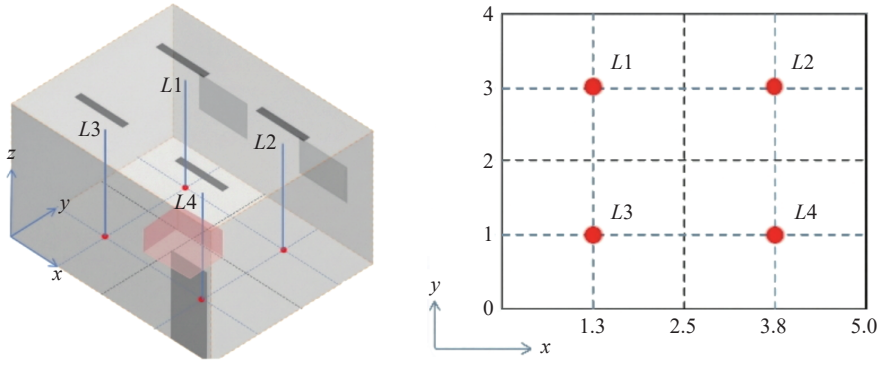

图 4 垂直温差检测位置

Fig. 4 Vertical temperature difference detection positions

1.5 室内甲醛去除效果评价指标

甲醛去除效果评价指标定义如下[31]：

$$\varepsilon_{\mathrm{H}} = \frac{C_{\mathrm{e}} - C_{\mathrm{s}}}{C_{\mathrm{i}} - C_{\mathrm{s}}} \tag{4}$$

式中：ε_{H}为甲醛去除效果；C_{e}是排风口甲醛的体积分数；C_{s}是送风口甲醛的体积分数；C_{i}是人体活动区域的甲醛平均体积分数。ε_{H}越高，说明室内气流组织对甲醛的去除能力越强，室内空气质量越好。

1.6 CFD 模型的验证

CFD 模型得到了本研究中环境舱实验结果的验证[32]。环境舱实验分为等温和非等温两种工况。等温工况是指地板未加热的情况；非等温工况中对地板进行加热，保持地板与送风气流之间的恒定温差。实验中得到了环境舱内垂直检测线上的速度、无量纲温度和流体无量纲浓度分布。在 CFD 模拟中，*k*-*ε* 模型是一类非常经典的湍流模型，用于模拟和预测流体的流动状态。SKE（standard *k*-*ε* model, 标准 *k*-*ε* 模型）是最基础的版本，应用广泛且计算量相对较小。RLKE（realizable *k*-*ε* model, 可实现 *k*-*ε* 模型）是对标准模型的一种改进，通过修正湍流黏度的计算公式，使其在数学上更“可实现”（符合湍流的物理约束）。RNG（RNG *k*-*ε* model, 重整化群 *k*-*ε* 模型）利用一种叫“重整化群”的数学方法，对 *N*-*S* 方程进行推导，得到了改进的模型常数和方程。EXP 指的是风洞实验结果，结果揭示 RNG 湍流模型的计算结果能很好再现检测线上的速度、无量纲温度和无量纲浓度分布（见图 5 与图 6），表明了 CFD 模型的可靠性。环境舱实验的仪器设备、实验方法、实验结果以及 CFD 模拟结果和实验结果的对比分析详见文献[32]。

2 数值模拟结果与讨论

2.1 室内流场和热环境特征

基于数值模拟结果，提取不同工况下，室内 z = 0.1 m、x = 1.25 m、x = 2.5 m 和 x = 3.75 m 处的速度云图和温度云图。据此分析不同通风参数下的室内流场和热环境特征。

图 7 显示不同送风角度和送风温度下室内的速度云图。从各截面的速率分布和流线分布中可以明显看出：由于流动分离和热浮力等作用，室内流动存在复杂的涡旋结构，流速存在明显的空间不均性，室内流场受到送风角度和送风温度的显著影响。当送风角度一定时，随着送风温度（10、15、20 ℃）的增加，地板温度和送风温度的温差减小，热浮力减小，进而导致气流速率减小；当送风温度一定时，送风角度的变化（30°、60°、90°）影响新风的流动路径，进而改变各截面上气流速率和流线分布式样。

图 8 为不同送风角度和送风温度下室内的温度云图。从各截面的温度分布可以清楚看出：送风温度增加时，各截面的温度增加；各截面上的

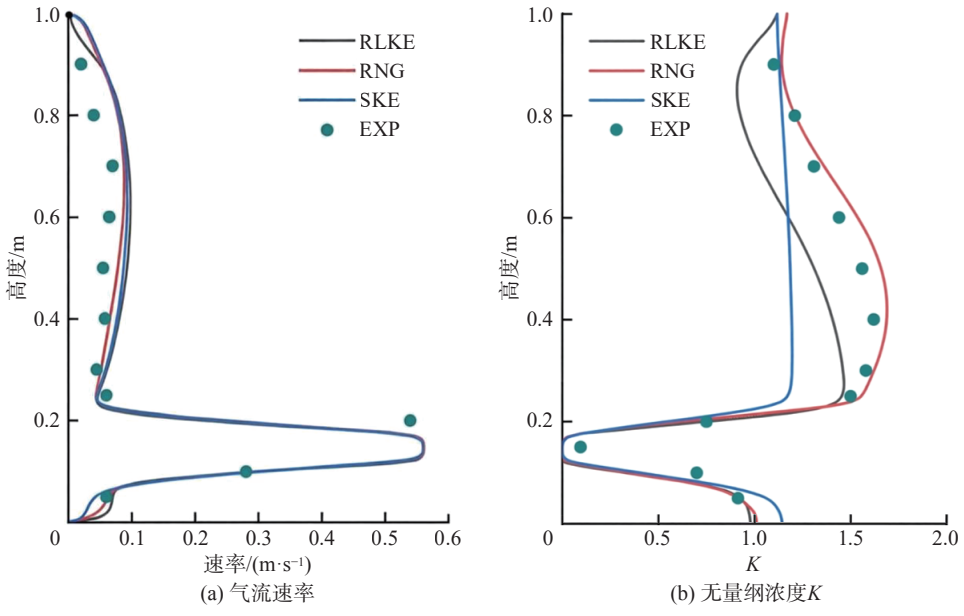

图 5　气流速率与污染物浓度分布的 CFD 模拟结果与实验结果比较（等温条件下）

Fig. 5　Comparison of simulation and experimental results of airflow velocity and pollutant concentration distribution (under isothermal conditions)

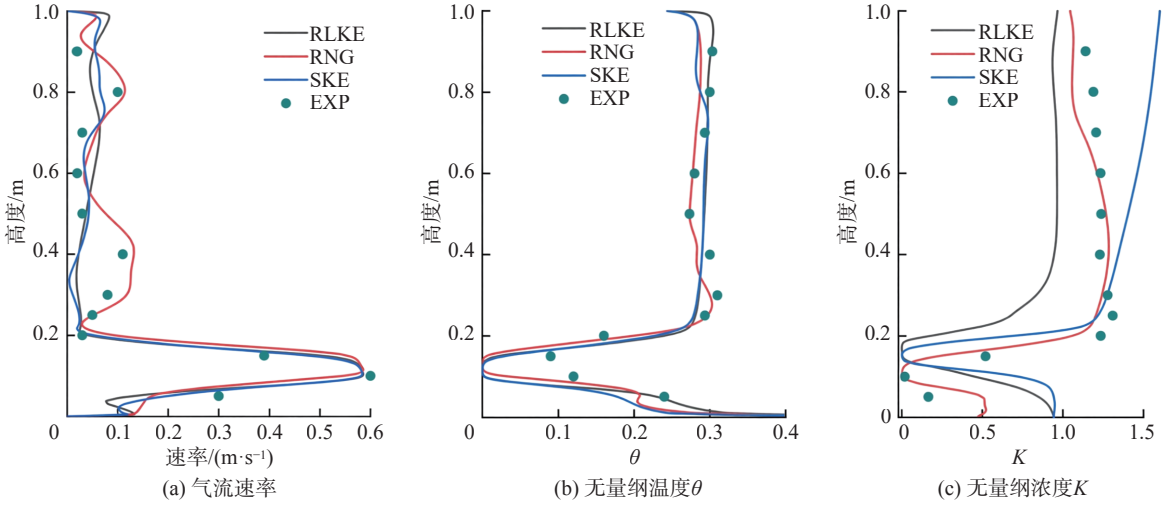

图 6　气流速率、温度和污染物浓度的 CFD 模拟结果与实验结果比较（非等温条件下）

Fig. 6　Comparisons of CFD simulation and experimental results of airflow velocity, temperature and pollutant concentration distribution（under non-isothermal conditions）

温度分布和气流速率分布密切相关，高温区域出现在低速区，这从人体脚踝高度平面上的气流速率分布和温度分布的对比中可以清晰看出。

2.2　地暖耦合混合通风室内热舒适性分析

2.2.1　垂直温差

表 2 列出了不同工况下 4 条检测线位置的头足温差。室内各区域的头足温差都小于 2 ℃，满足头足温差的 1 级标准，即各检测线位置都满足热舒适要求。这是由于在混合通风房间内的温度垂直分布较均匀，无明显的高温区。

2.2.2　预测平均评价–预测不满意百分比指标

图 9 为不同送风温度和角度下的 λ_{PMV} 分布，表明大部分区域的 λ_{PMV} 值在−0.7～−0.6 之间，符合 2 级舒适（小于 3 ℃ 为 2 级）。然而，当送风温度为 10 ℃ 时，室内存在明显的不舒适区，主要位于入射气流的附近区域。进一步看出，在 60°送风角度下产生的不舒适区域最为突出，将送风角度调至 30°则能够保证大部分区域满足 2 级舒适。送风温度为 15 ℃ 时，无论何种送风角度下，都存在着 λ_{PMV} 的低值区和高值区，分别出现在桌面上

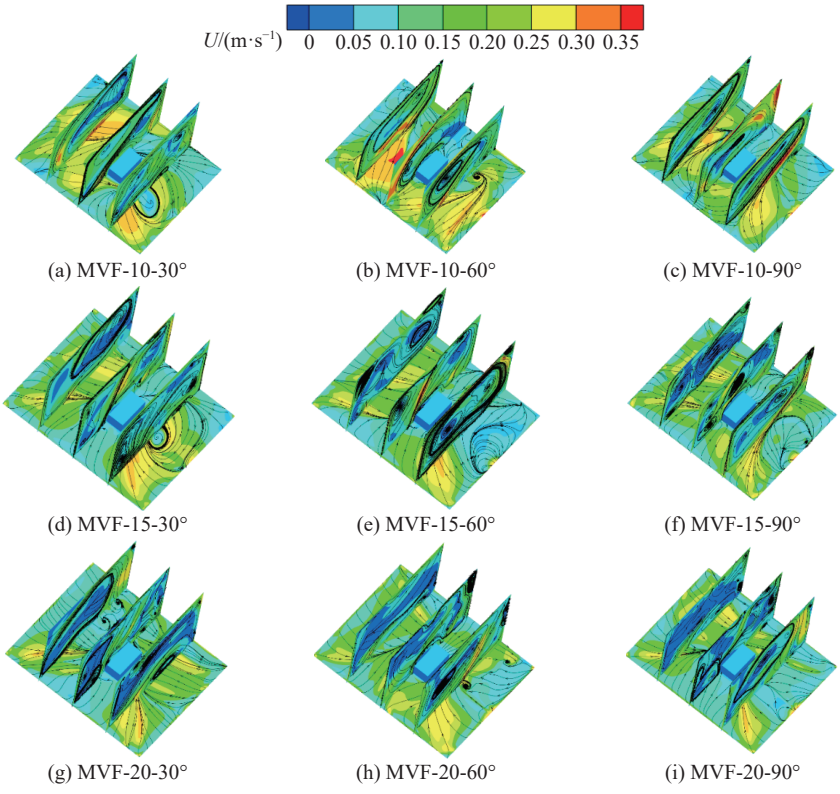

图 7 室内速率分布云图

Fig. 7 Cloud maps of velocity distributions inside the room

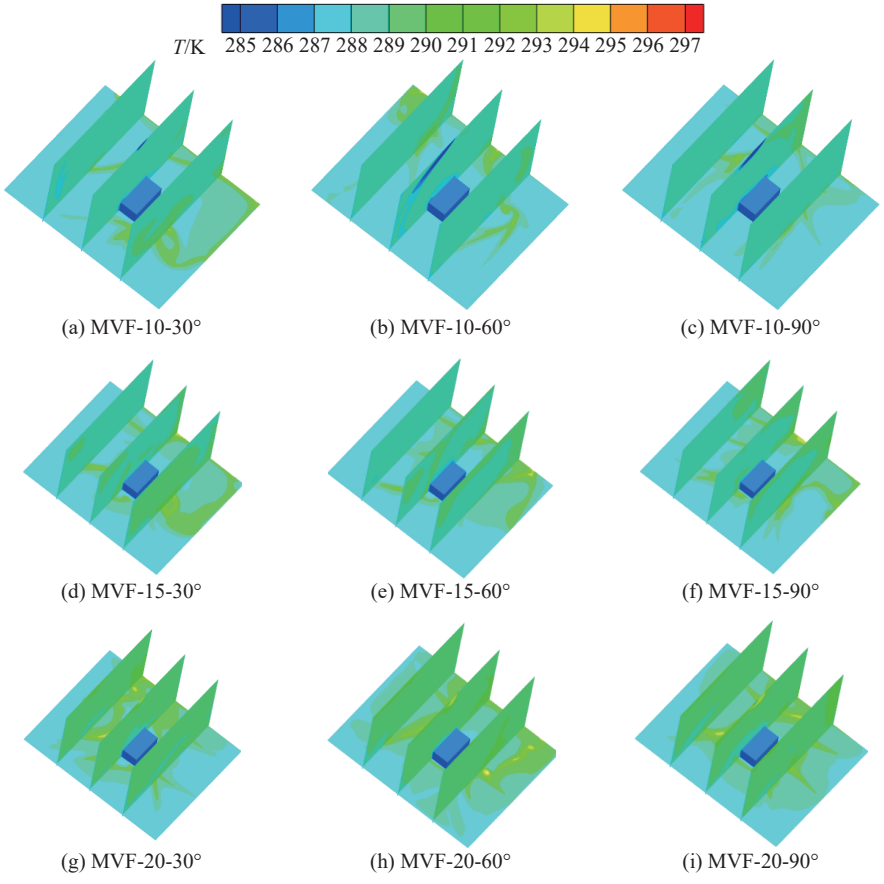

图 8 室内温度分布云图

Fig. 8 Cloud maps of temperature distributions inside the room

表 2　室内头足温差

Tab. 2　Temperature differences between the head and feet inside the room

送风温度/℃	送风角度/°	头足温差/℃			
		*L*1	*L*2	*L*3	*L*4
10	30	0.48	0.29	0.26	0.50
	60	1.71	1.47	0.24	0.45
	90	0.24	0.66	0.14	0.27
15	3°	0.28	0.23	0.02	0.73
	60	0.10	1.72	0.43	0.79
	90	0.04	0.14	0.05	0.00
20	30	1.06	0.10	0.04	0.97
	60	0.18	0.27	2.44	0.63
	90	0.21	0.17	0.97	0.16

方、$z = 0.1$ m 平面的左侧两角处，以及 $x = 1.25$ m 和 3.75 m 的底部。这主要是因为冷壁面和涡旋的形成产生了低值区，而高值区的出现，则来自于气流带动地板辐射的热量改变了该区域的热舒适性。特别地，在这种送风温度下，满足 2 级舒适区域占比最大的是 30°的送风角度。然后，当送风温度提升至 20 ℃，1 级舒适区的范围出现了明显的扩大。值得注意的是，此时即使提高送风角度至 60°和 90°，对室内热舒适区的影响也较小。这一观察结果揭示了在相对较高的送风温度情况下，送风角度对整体热舒适度的作用减小。

图 10 为不同送风温度和角度下的 δ_{PDD} 云图。δ_{PPD} 云图对 $z = 0.1$ m 平面进行了详细划分，形成了不同舒适度区域。从图 10 中发现，虽然 λ_{PMV} 基本都在−0.7～−0.6 之间，但仍存在某些区域的 δ_{PPD} 较低。这意味着，即使整体的热舒适度相当，部分区域也能提供给人们很好的舒适感，为住户或使用者带来更优的居住或工作体验。在室内环境优化和舒适度提升的过程中，这些研究和发现均可提供宝贵的参考和启示。

2.3　地暖耦合混合通风室内甲醛扩散分布分析

图 11 为不同送风温度和角度下室内甲醛质量分数分布。甲醛的扩散分布受制于室内流场。在

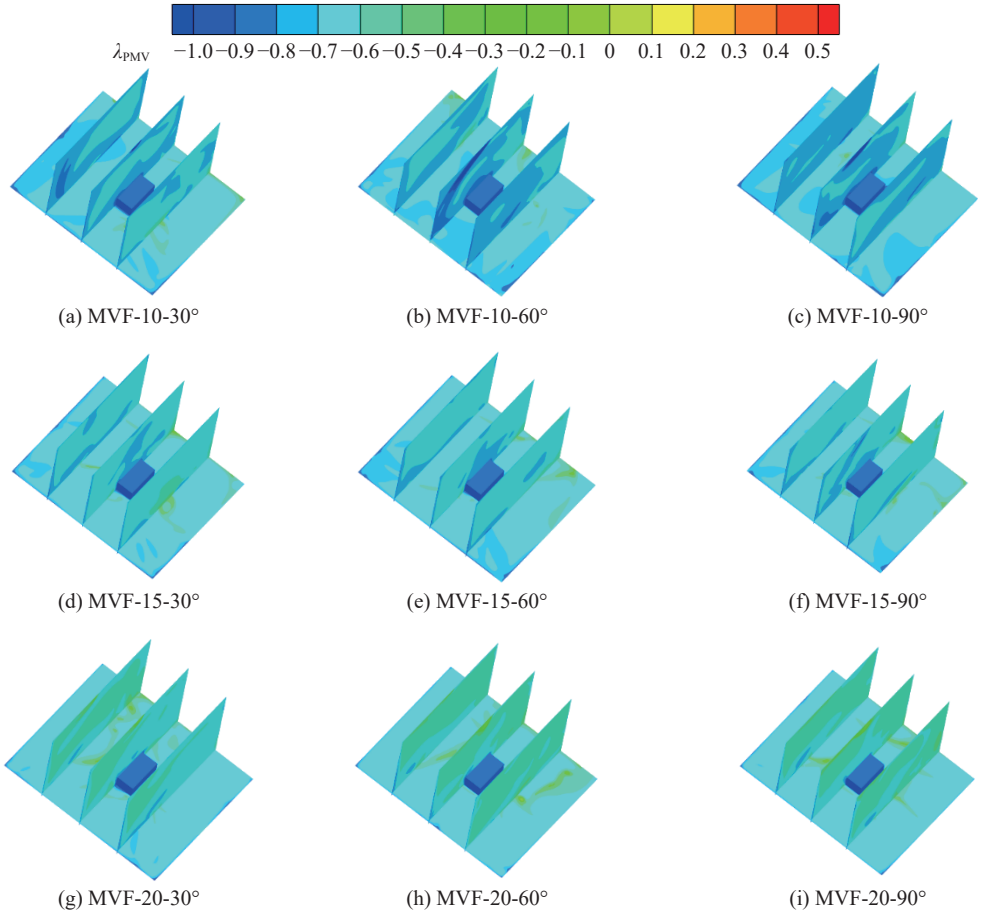

图 9　室内 λ_{PMV} 分布云图

Fig. 9　Cloud maps of λ_{PMV} distributions inside the room

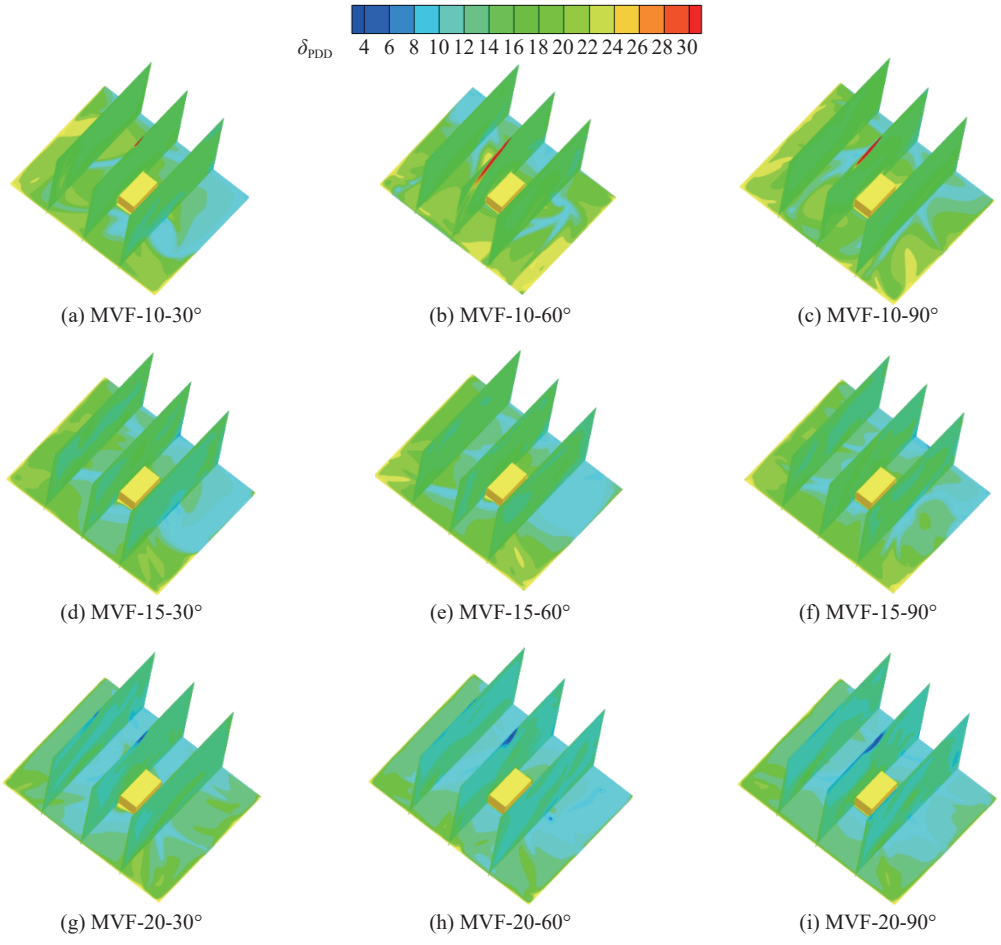

图 10 室内 δ_{PPD} 分布云图

Fig. 10 Cloud maps of δ_{PPD} distributions inside the room

z= 0.1 m 平面上，由于该区域形成的涡旋将甲醛卷吸进入涡旋内，形成高质量分数区，如 MVF-10-30°、MVF-10-60°和 MVF-15-30°；或者是受到区域涡旋阻挡只能往一个方向流动，造成污染物集中，如 MVF-15-60°、MVF-10-90°和 MVF-15-90°。送风温度为 20 ℃ 时，z = 0.1 m平面上的质量分数分布较为均匀，没有明显高质量分数区。在竖直平面上，混合通风条件下大部分都是低质量分数区，且分布均匀。但是，在 MVF-20-30°条件下，x = 2.5 m 平面上出现高质量分数区，通过分流场分布，该区域左侧形成一个逆时针的大涡旋阻挡了甲醛的扩散，使甲醛集中在右侧。

图 12 为室内呼吸高度处(z = 1.2 m)甲醛平均质量分数。可以得出，送风角度为 30 °下送风温度为 10 ℃ 或 15 ℃ 时，呼吸高度处甲醛平均质量分数最低。

2.4 地暖耦合新风室内甲醛的去除分析

图 13 显示不同送风温度和送风角度下的室内甲醛去除效果。从图 13 可以看出，送风温度为 15 ℃ 和送风角度为 30°时去除效果最佳，ε_H达到 4.92。

3 结 论

本文基于 CFD 数值模拟，探究了混合通风的送风温度和角度对地暖房间内甲醛去除效果和热舒适性的影响。研究中甲醛来源于办公桌释放，考虑了 3 个送风角度(30°、60°和 90°)和 3 个送风温度(10、15、20 ℃)的组合。基于 CFD 模拟结果，重点分析了房间内不同竖直面(x = 1.25 m、2.50、3.75 m)和脚踝区域(z = 0.1 m)的气流速率、温度、PMV-PPD 和甲醛质量分数分布，并且定量分析了头足温差和甲醛去除效果指标等。得到的主要结论如下：

a. 头足温差指标表明室内热舒适符合 1 级满意度；PMV-PPD 指标表明在送风温度为 20 ℃、送风角度为 60°时，室内 1 级舒适区占比最多。

b. 采用指标ε_H评价室内甲醛的去除效果，在

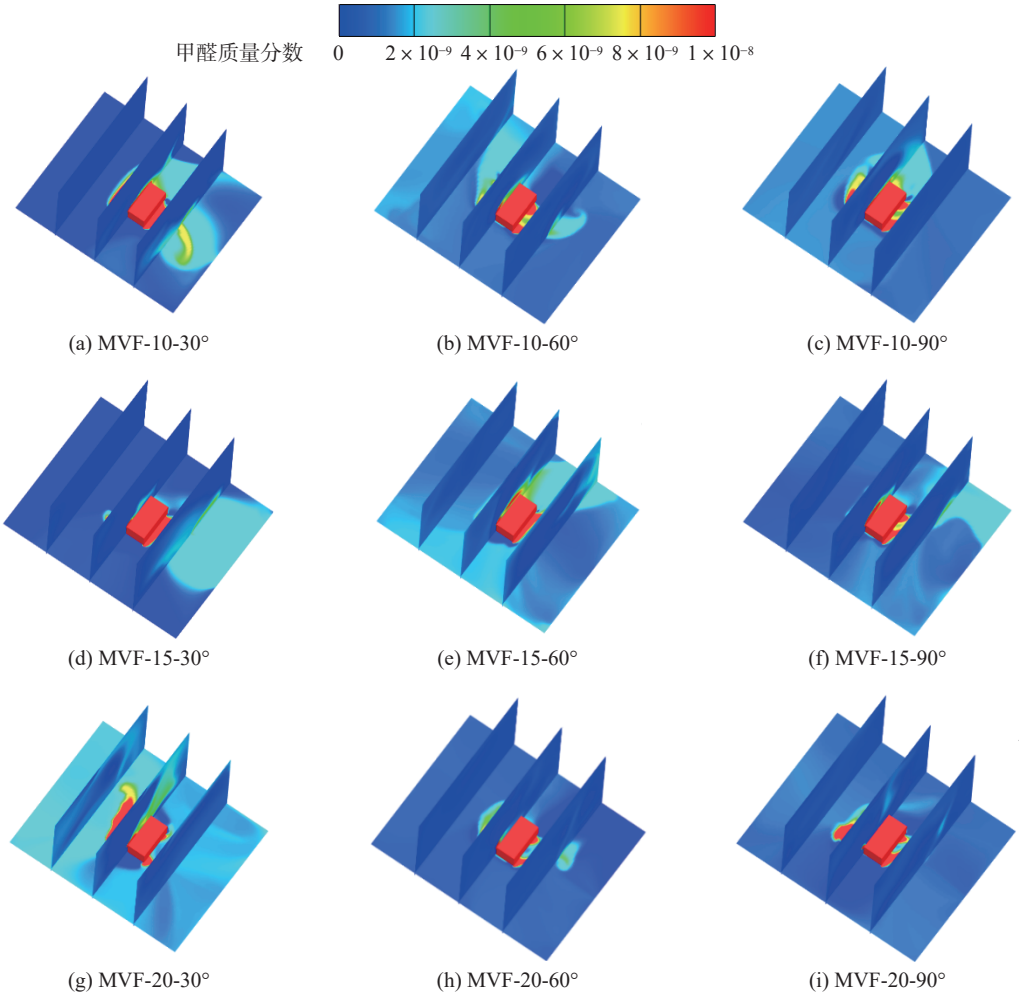

图 11　室内甲醛分布云图

Fig. 11　Cloud maps of formaldehyde distrubtions inside the room

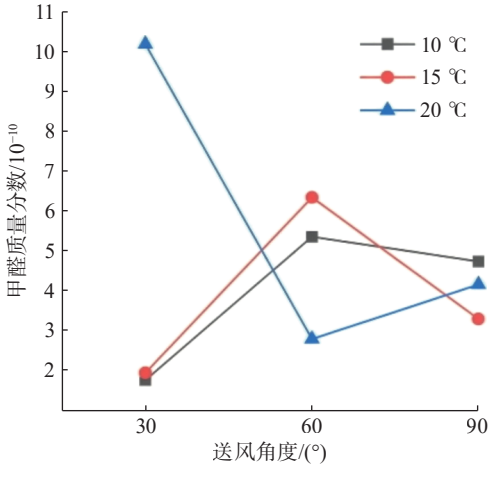

图 12　室内呼吸高度处甲醛质量分数

Fig. 12　Mass fraction of formaldehyde at breathing height level inside the room

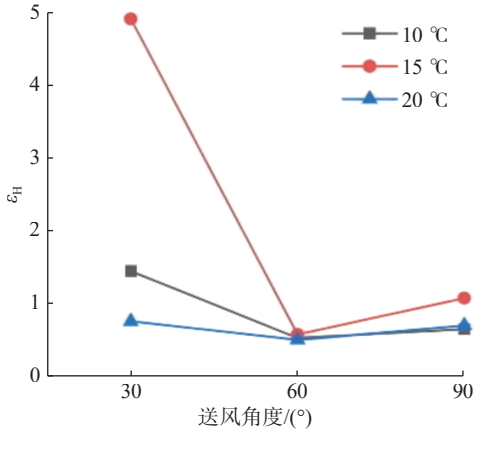

图 13　室内甲醛去除效果

Fig. 13　Formaldehyde removal effectiveness inside the room

送风温度为 15 ℃ 和送风角度为 30°时去除效果最佳，ε_H达到 4.92。

研究结果可为冬季地暖房间耦合混合通风以改善室内热舒适性和空气品质时的送风参数选择提供技术支撑。

参考文献：

[1] Mannan M, Al-Ghamdi S G. Indoor air quality in

buildings: a comprehensive review on the factors influencing air pollution in residential and commercial structure[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(6): 3276.

[2] 孟晓郁.基于生物样本检测的室内环境空气污染评估方法研究 [D].河北大学,2021.

[3] 王汉青, 周振宇. 采用化学方法的室内空气净化技术综述 [J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(5): 6−10.

[4] Yang C Q, Yang X D, Xu T F, et al. Optimization of bathroom ventilation design for an ISO Class 5 clean ward[J]. Building Simulation, 2009, 2(2): 133−142.

[5] 祁冰, 王芃远, 魏艳雨, 等. 室内空气品质营造技术措施 [J]. 能源与环保, 2020, 42(4): 39−45.

[6] Jin X M, Yang L J, Du X Z, et al. Numerical investigation of particle transport characteristics in an isolated room with single-sided natural ventilation[J]. Building Simulation, 2016, 9(1): 43−52.

[7] Shin D, Kim Y, Hong K J, et al. The effectiveness of a mechanical ventilation system for indoor $PM_{2.5}$ in residential houses[J]. Toxics, 2023, 11(11): 912.

[8] 皮东恒. 盆栽植物净化室内空气中甲醛机理研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2010.

[9] 邹惠芬, 岳志安, 彭辉, 等. 控制室内甲醛和 $PM_{2.5}$ 的新风净化系统优化设计 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2020, 36(4): 712−719.

[10] 刘雅楠, 孙昊, 朱鸿运, 等. 新风系统不同通风方式对教室室内污染物的影响 [J]. 制冷, 2025, 44(5): 46−52,61.

[11] Zhang M, Liu J J, Liu X Y, et al. Evaluation and prediction of fibrous filters' operating performance in residential fresh air system[J]. Building and Environment, 2024, 255: 111441.

[12] Cetin Y E, Avci M, Aydin O. Particle dispersion and deposition in displacement ventilation systems combined with floor heating[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2020, 26(8): 1019−1036.

[13] Causone F, Olesen B W, Corgnati S P. Floor heating with displacement ventilation: an experimental and numerical analysis[J]. HVAC& R Research, 2010, 16(2): 139−160.

[14] Zhou Y, Deng Y L, Wu P, et al. The effects of ventilation and floor heating systems on the dispersion and deposition of fine particles in an enclosed environment[J]. Building and Environment, 2017, 125: 192−205.

[15] 赵涛杰, 刘泽勤, 董敏. 地板送风模式下的送风角度对室内甲醛扩散的模拟研究 [J]. 科技与创新, 2022(5): 50−52.

[16] Tian L, Lin Z, Wang Q W. Comparison of gaseous contaminant diffusion under stratum ventilation and under displacement ventilation[J]. Building and Environment, 2010, 45(9): 2035−2046.

[17] Kempton L, Daly D, Kokogiannakis G, et al. A rapid review of the impact of increasing airtightness on indoor air quality[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104798.

[18] Qin D C, Guo B, Zhou J, et al. Indoor air formaldehyde (HCHO) pollution of urban coach cabins[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 332.

[19] Zhuang C, Yang G, Long T, et al. Numerical comparison of removal and deposition for fully-distributed particles in central- and split-type air-conditioning rooms[J]. Building and Environment, 2017, 112: 17−28.

[20] Jahanbin A, Semprini G. Integrated effects of the heat recovery ventilation and heat source on decay rate of indoor airborne particles: a comparative study[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104156.

[21] Jurelionis A, Gagytė L, Prasauskas T, et al. The impact of the air distribution method in ventilated rooms on the aerosol particle dispersion and removal: the experimental approach[J]. Energy and Buildings, 2015, 86: 305−313.

[22] Ma J C, Qian H, Nielsen P V, et al. What dominates personal exposure? Ambient airflow pattern or local human thermal plume[J]. Building and Environment, 2021, 196: 107790,

[23] 肖学冬. 贴附通风与导流板对室内气流组织协同影响及应用研究 [D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2023.

[24] Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3−51.

[25] Yuan P, Fang Z C, Wang W J, et al. Numerical simulation analysis and full-scale experimental validation of a lower wall-mounted solar chimney with different radiation models[J]. Sustainability, 2023, 15(15): 11974.

[26] 付斌, 宋瑞金, 吴远强. 木质人造板材的甲醛释放量 [J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(4): 297−299.

[27] Allegrini J, Dorer V, Carmeliet J. Buoyant flows in street canyons: validation of CFD simulations with wind tunnel measurements[J]. Building and Environment, 2014, 63-74.

[28] 李洋. 基于室内空气品质的供暖方式研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2023.

[29] 李杨. 办公楼空调系统室内气流组织和热舒适性研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2017.

[30] 麦岚, 何焰. 架空地板送风系统在办公楼中的应用 [J]. 制冷空调与电力机械, 2003, 24(3): 32−34,31.

[31] Jahanbin A, Semprini G. Numerical study on indoor environmental quality in a room equipped with a combined HRV and radiator system[J]. Sustainability, 2020, 12(24): 10576.

[32] 李彬, 崔鹏义, 姚一丰, 等. 混合通风对地板再悬浮颗粒物沉积和去除特性的影响 [J]. 能源研究与信息, 2025, 41(2): 63-74.

（编辑：何代华）