

# 严寒地区住宅穿堂通风去除甲醛与 人员热舒适的模拟分析

黄凯良,王 珺,冯国会,宋嘉森

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究穿堂通风去除室内甲醛污染的变化规律,得到不同季节合理的最短穿堂通风时间.方法 以沈阳市某代表性住宅为例,建立住宅物理模型,利用 CFD 进行数值模拟,使用实测甲醛质量浓度值作为甲醛源强,模拟穿堂通风在不同季节典型风速工况下的甲醛质量浓度变化规律.结果 冬季甲醛初始质量浓度为  $0.148 \text{ mg/m}^3$  时,穿堂通风 150 s 室内甲醛质量浓度可达到  $0.057 \text{ mg/m}^3$ ;夏季甲醛初始质量浓度为  $0.25 \text{ mg/m}^3$  时,穿堂通风 500 s 室内甲醛质量浓度达到  $0.05 \text{ mg/m}^3$ ;过渡季甲醛初始质量浓度为  $0.23 \text{ mg/m}^3$  时,穿堂通风 200 s 室内甲醛质量浓度达到  $0.055 \text{ mg/m}^3$ .结论 各季节穿堂通风使室内甲醛质量浓度达到稳定的时间不同,尽管穿堂通风可能会给居民带来不舒适感,但穿堂通风可快速地降低室内甲醛质量浓度.

**关键词** 穿堂通风;甲醛质量浓度;数值模拟;开窗热损失

中图分类号 TU834

文献标志码 A

## Simulated Analysis of Formaldehyde Removal and Personnel Thermal Comfort by Hall Ventilation of Residential House in Cold Areas

HUANG Kailiang, WANG Jun, FENG Guohui, SONG Jiasen

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China 110168)

**Abstract:** The change rule of hall ventilation to remove indoor HCHO pollution was studied to obtain the shortest ventilation time in different seasons. A representative residence in shenyang as an example, its physical model is established by using CFD numerical simulation. The measured formaldehyde mass concentration as the formaldehyde source, the formaldehyde concentration of hall ventilation was simulated under typical wind speed conditions in different seasons. In winter, when the initial concentration of formaldehyde is  $0.148 \text{ mg/m}^3$ , indoor formaldehyde

收稿日期:2019-03-05

基金项目:“十三五”国家重点研发项目子课题(2016YFC0700501-02);辽宁省自然科学基金指导计划项目(201601211);沈阳市中青年科技创新人才支持计划(SHSCXRC2017003)

作者简介:黄凯良(1985—),男,副教授,博士,主要从事相变储能与空气质量方面研究.

concentration can reach  $0.057 \text{ mg/m}^3$  after 150 s ventilation. after summer, when the initial concentration of formaldehyde is  $0.25 \text{ mg/m}^3$ , indoor formaldehyde concentration can reach  $0.05 \text{ mg/m}^3$  after 500 s ventilation. In transition season, when the initial concentration of formaldehyde is  $0.23 \text{ mg/m}^3$ , indoor formaldehyde concentration can reach  $0.055 \text{ mg/m}^3$  after 200 s ventilation. The results show that the time of reaching a stable level for indoor formaldehyde concentration is different in each seasons. Although hall ventilation may bring discomfort to residents, hall ventilation can rapidly reduce indoor formaldehyde concentration.

**Key words:** ventilation; formaldehyde concentration; numerical simulation; heat loss

室内空气质量状况与每个居民的健康息息相关<sup>[1]</sup>. 自然通风具有控制室内污染物水平、改善室内空气质量、调节室内热环境等功能,并且具有节能、环保等优点<sup>[2]</sup>. 谭冰等<sup>[3]</sup>通过调查发现,我国装修民居的室内甲醛超标率达到 60% 以上,高浓度的甲醛是鼻窦癌、鼻腔癌和白血病的主要诱因. 肖楚璠等<sup>[4]</sup>发现甲醛质量浓度的大小与装修年限、室内外温湿度和通风强度等因素有关. 甲醛作为当前室内污染的重要污染源,开始引起人们的高度关注. 严寒地区冬季由于天气寒冷自然通风受到限制,新风不足可能会导致室内甲醛污染物超标<sup>[5]</sup>. 李元铭等<sup>[6]</sup>对通风以及新风引入处理机组和热回收处理方式进行分析,阐述了新风对室内空气质量的影响. 通过穿堂通风快速置换室内空气可达到通风节能,降低污染物浓度的目的. 尽管冬季不可能长时间开窗,穿堂通风时室内温降较快,但短时间的穿堂通风热损失小,去除室内污染物的效率高<sup>[7-10]</sup>. 笔者以沈阳市某一典型住宅为例,采用 CFD 数值模拟的方法分析住宅在冬季、夏季和过渡季节穿堂通风条件下甲醛质量浓度的变化规律.

## 1 建立物理模型

沈阳属于东北严寒地区,11 月~次年 3 月为寒冷干燥的冬季,4 月~5 月、9 月~10 月为较短的过渡季,6 月~8 月为高温多雨的夏季. 笔者所选测试住户为沈阳地区,建筑面积  $140 \text{ m}^2$ ,四室两厅两卫户型,南北通透,所在楼层为 2 层,家中主要家具为复合家具以

及少部分的实木家具. 自然通风构建的物理模型如图 1 所示. 简化掉部分房间后模型长宽高为  $11.4 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 2.75 \text{ m}$ ;可开启窗户共 6 扇,长宽为  $0.55 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,距地 1 m;主要家具设置为每个卧室一张床,在客厅设置沙发和茶几. 利用前处理器 gambit 对其进行网格划分,网格的单元类型设置为 Tet/Hybrid,网格的划分类别设置为 Tgrid,步长中选中 interval size,共划分网格数量为 639 823 个.

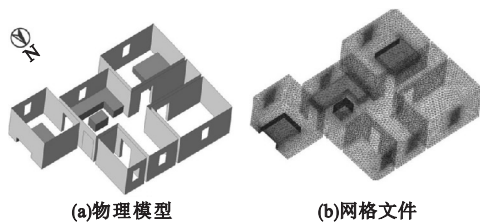


图 1 自然通风住户物理模型图

Fig. 1 Natural ventilation household physical model

## 2 模拟条件设定

### 2.1 空气流动模型

将室内空气视为不可压缩流体进行模拟,空气流动符合质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程. 通风流场采用组分传输模型和标准  $k-\epsilon$  紊流模型对室内甲醛质量浓度进行数值模拟<sup>[11-12]</sup>. 通风条件下雷诺数大于 2 300,室内结构复杂,空气流动过程中速度变化较大,所以室内空气流态为湍流.

### 2.2 初始条件与边界条件

模拟中空气视为不可压缩流体,忽略室内照明、烹饪、人员等内热源和室外通过房间的围护结构向室内的传热对甲醛扩散的影响. 忽略墙壁、屋顶等对甲醛的吸附作用. 甲

醛的扩散属于纯物理过程,污染物不产生消耗,甲醛与室内空气之间也不发生化学反应<sup>[13]</sup>.在进行计算时,网格数量与时间步长均通过独立性检验<sup>[14]</sup>.

入口边界选取适用于不可压缩流体的速度入口,出口边界设置为自由出流.家具设置为质量入口<sup>[15]</sup>.根据实测不同季节的甲醛扩散率计算各个家具表面的具体数值<sup>[16]</sup>.固体壁面边界设为无滑移边界.

2.3 模拟工况设定

由于严寒地区各个季节气候特征明显,笔者在冬季、夏季和过渡季5种代表工况下对该住宅穿堂通风时的甲醛质量浓度场和室内温度场分别进行模拟.模拟工况如表1所示.

表1 模拟工况  
Table 1 Simulation conditions

工况	季节	室外温度/K	室内温度/K	送风速度/(m·s <sup>-1</sup> )
I	冬季	263	295	2
II	冬季	263	295	1.5
III	夏季	297	300	0.8
IV	夏季	297	300	1
V	过渡	288	285	3

3 模拟结果分析

截取 Z=0.5 m、Z=1.2 m 和 Z=1.7 m 平面,分别代表家具表面高度、坐姿高度和站立高度来研究甲醛质量浓度的变化规律<sup>[17]</sup>.且 Z=1.2 m 和 Z=1.7 m 的温度场相似,笔者仅分析 Z=0.5 m 与 Z=1.2 m 平面的温度场.

3.1 冬季模拟结果分析

严寒地区冬季集中供暖,冬季工况设置地面热流边界条件为 1 230 W/m<sup>2</sup><sup>[18]</sup>,污染源为家具表面,设置卧室甲醛扩散率为 7.97 × 10<sup>-11</sup> kg/s、客厅甲醛扩散率为 11.9 × 10<sup>-11</sup> kg/s,当初始甲醛质量浓度为 0.148 mg/m<sup>3</sup><sup>[19]</sup>时,对甲醛质量浓度与室内温度分布情况进行模拟.

3.1.1 风速为 2 m/s 时模拟结果

图2为工况I条件下穿堂通风300 s时

不同高度的室内甲醛质量浓度分布云图.根据《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB50325—2010)规定,I类民用建筑工程室内环境污染物质量浓度不能超过 0.08 mg/m<sup>3</sup>.冬季由于热压的作用风速较大,穿堂通风 300 s 时,不同高度平面的甲醛平均质量浓度均为 0.06 mg/m<sup>3</sup>,窗口处甲醛质量浓度最低,但家具表面和家具附近仍然存在超标现象.穿堂通风 300 s 后,室内空气质量已达到较理想的状态.

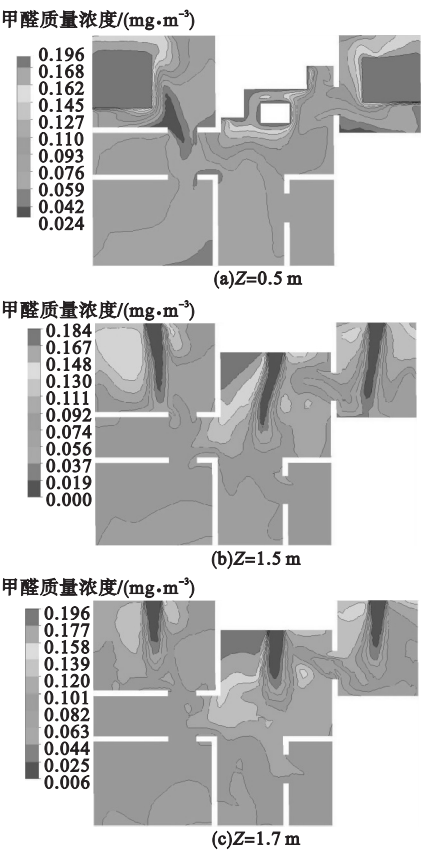


图2 风速为 2 m/s,不同高度下 300 s 时甲醛质量浓度分布云图

Fig. 2 When wind speed is 2 m/s, mass concentration distribution at 300 s at different heights

图3为工况I条件下穿堂通风300 s时不同高度下的室内温度云图.穿堂通风300 s时,冬季室内温度在 263 ~ 303 K 内变化.窗口处温度最低.严寒地区室内外温度差大,开窗会造成一定的热损失. Z=0.5 m 与 Z=1.2 m 平面的平均温度分别为 285 K、284 K.

室内温度在可接受的范围内,但人员活动区域温度较低.虽然模拟结果相对于实际有误差,但在冬季穿堂通风 300 s 后的确会造成室内居民的强烈冷感.

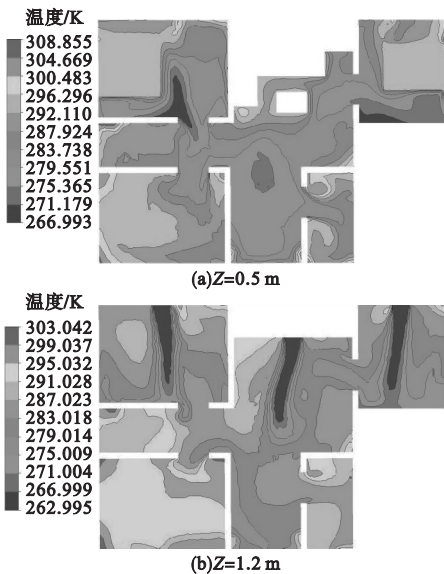


图3 风速为2 m/s,不同高度下300s时温度云图

Fig. 3 When wind speed is 2 m/s,temperature cloud diagram at 300 s at different heights

图4为平均甲醛质量浓度与温度随时间的变化曲线.

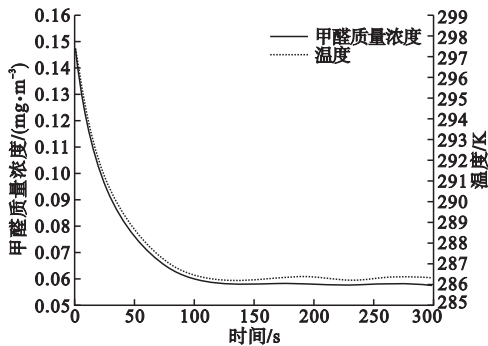


图4 风速为2 m/s,平均甲醛质量浓度与温度随时间的变化曲线

Fig. 4 When wind speed is 2 m/s, Variation curve of average HCHO mass concentration and temperature with time

穿堂通风 150 s 时室内甲醛质量浓度与温度已基本稳定.室内甲醛质量浓度降至最低约为  $0.057\text{ mg/m}^3$ ,室内温度在 286 K 上下波动.在冬季如果采取穿堂通风的方式去除室内

甲醛,150 s 即可以达到目的.结合通风房间室内换气次数与开窗时间,定量估计开窗造成的热损失<sup>[20]</sup>.经计算该住户冬季供暖时穿堂通风 300 s 的开窗热损失为  $2.724 \times 10^6\text{ J}$ .

3.1.2 风速为 1.5 m/s 时模拟结果

图5为工况Ⅱ条件下穿堂通风 300 s 时不同高度的室内甲醛质量浓度分布云图.当室外风速为 1.5 m/s,穿堂通风 300 s 时, $Z=0.5\text{ m}$ 、 $Z=1.2\text{ m}$ 、 $Z=1.7\text{ m}$  平面的甲醛平均质量浓度均为  $0.08\text{ mg/m}^3$ .工况Ⅱ条件下穿堂通风 300 s 后,甲醛质量浓度虽已降到标准值以下但仍维持在较高水平.

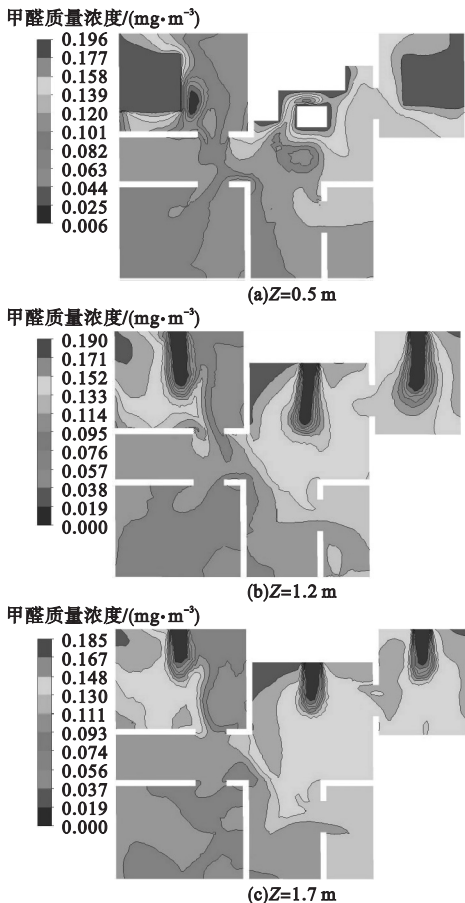


图5 风速为1.5 m/s,不同高度下300s时甲醛质量浓度分布云图

Fig. 5 When wind speed is 1.5 m/s,cloud diagram of HCHO mass concentration distribution at 300s at different heights

图6为工况Ⅱ条件下不同高度的室内温度云图.穿堂通风 300 s 时,可以看出冬季室



内温度在 264 ~ 307 K 内变化.  $Z=0.5\text{ m}$ 、 $Z=1.2\text{ m}$  时平面的平均温度为 290 K, 均在可接受范围内. 然而窗口处的温度仍然较低, 当人员处于坐姿平面时会有不舒适感, 但与送风速度为 2 m/s 的结果相比, 室内温度场更合理.

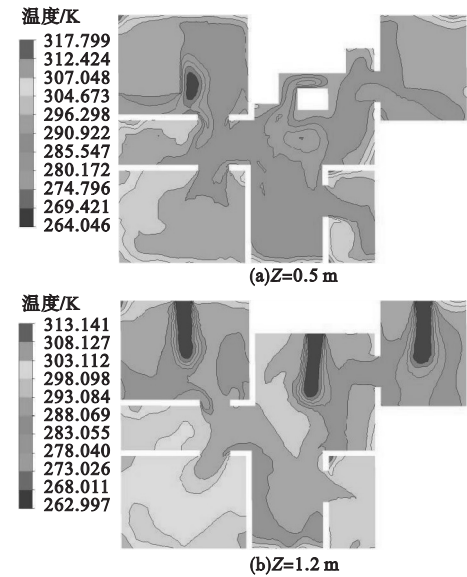


图 6 风速为 1.5 m/s, 不同高度下 300s 时温度云图  
Fig. 6 When wind speed is 1.5 m/s, temperature cloud diagram at 300s at different heights

穿堂通风 200 s 时室内甲醛质量浓度与温度已经基本稳定, 甲醛质量浓度保持在  $0.08\text{ mg/m}^3$ , 温度稳定在 292.5 K. 冬季室外风速为 1.5 m/s 时, 穿堂通风 200 s 左右室内甲醛质量浓度和温度即可达到稳定 (见图 7).

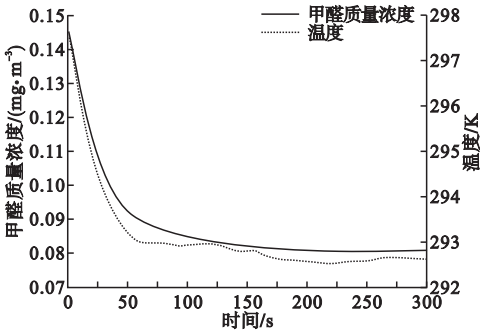


图 7 风速为 1.5 m/s, 平均甲醛质量浓度与温度随时间的变化曲线  
Fig. 7 When wind speed is 1.5 m/s, variation curve of average HCHO mass concentration and temperature with time

3.2 夏季模拟结果分析

严寒地区夏季室内外温差小, 风速较小. 笔者分别模拟夏季风速为 0.8 m/s 和 1 m/s, 模拟夏季工况时, 污染源仍为房间内家具. 设置卧室甲醛扩散率为  $9.87 \times 10^{-11}\text{ kg/s}$ 、客厅甲醛扩散率为  $3.26 \times 10^{-10}\text{ kg/s}$ , 当初始甲醛质量浓度为  $0.25\text{ mg/m}^3$  时, 对甲醛质量浓度与室内温度分布情况进行模拟.

3.2.1 风速为 0.8 m/s 时模拟结果

图 8 为工况 III 条件下穿堂通风 1 200 s 时不同高度的室内甲醛质量浓度分布云图.

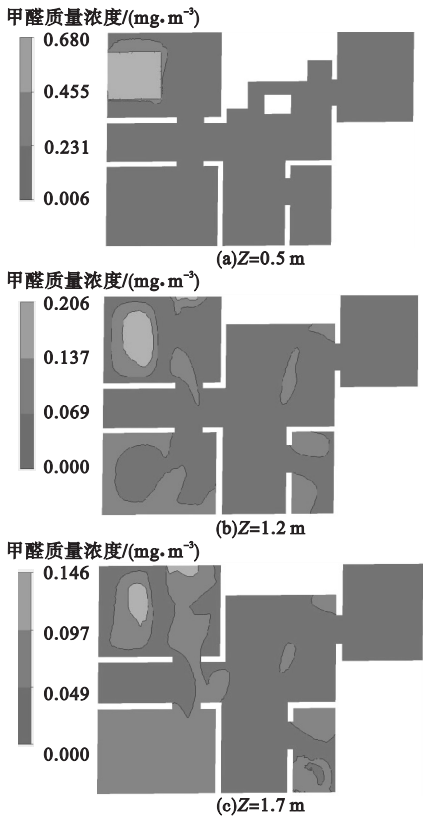


图 8 风速为 0.8 m/s, 不同高度下 1 200 s 时甲醛质量浓度分布云图  
Fig. 8 When wind speed is 0.8 m/s, cloud diagram of HCHO mass concentration distribution at 1 200 s at different heights

经模拟结果可知, 当穿堂通风 1 200 s 时,  $Z=0.5\text{ m}$ 、 $Z=1.2\text{ m}$  与  $Z=1.7\text{ m}$  平面甲醛平均质量浓度分别为  $0.08\text{ mg/m}^3$ 、 $0.05\text{ mg/m}^3$ 、 $0.038\text{ mg/m}^3$ . 穿堂通风 1 200 s 后, 室内甲醛质量浓度已降到标准值以下. 夏季室内温度较高,

尽管室内污染物已处于较低水平,仍然可继续穿堂通风,满足居民新风需求。

图9为工况Ⅲ条件下不同高度的室内温度云图。穿堂通风1200s时,可以看出夏季室内温度在297~300K内变化。 $Z=0.5\text{ m}$ 、 $Z=1.2\text{ m}$ 平面的平均温度为299K,整个温度场较为均匀。在夏季送风速度为0.8m/s时,穿堂通风1200s不会给室内居民带来不舒适的感觉。

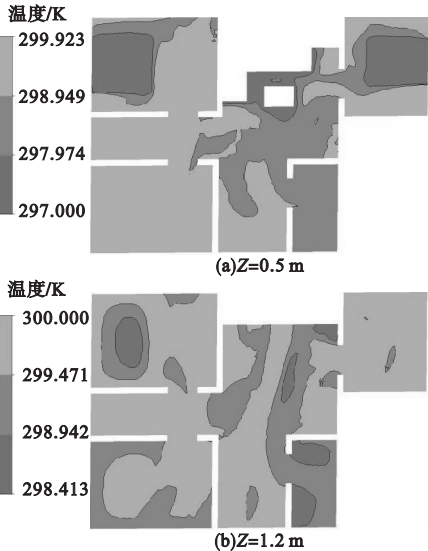


图9 风速为0.8 m/s,不同高度下1200s时温度云图

Fig. 9 When wind speed is 0.8 m/s, temperature cloud diagram at 1200 s at different heights

图10为平均甲醛质量浓度与温度随时间变化曲线。

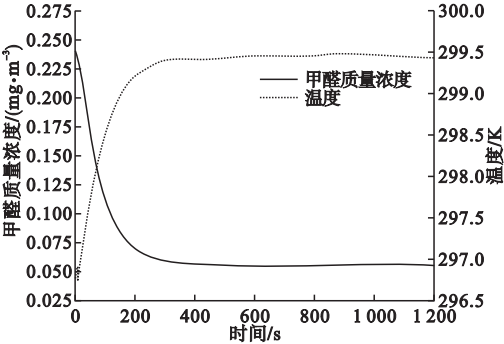


图10 风速为0.8 m/s,平均甲醛质量浓度与温度随时间的变化曲线

Fig. 10 When wind speed is 0.8 m/s, variation curve of average HCHO mass concentration and temperature with time

图10表明夏季风速为0.8m/s,室内甲醛初始质量浓度为0.25mg/m<sup>3</sup>,穿堂通风500s时室内甲醛质量浓度与温度已经基本稳定,甲醛质量浓度保持在0.05mg/m<sup>3</sup>,温度稳定在299.5K。夏季室外温度较高,尽管甲醛质量浓度已经达到稳定,仍然可以进行长时间的穿堂通风。

3.2.2 风速为1 m/s时模拟结果

图11为工况Ⅳ条件下穿堂通风1200s时不同高度的室内甲醛质量浓度分布云图。经模拟结果可知,穿堂通风1200s时, $Z=0.5\text{ m}$ 、 $Z=1.2\text{ m}$ 与 $Z=1.7\text{ m}$ 平面甲醛平均质量浓度分别为0.08mg/m<sup>3</sup>、0.05mg/m<sup>3</sup>、0.045mg/m<sup>3</sup>,模拟结果基本与送风速度为0.8m/s时相同。穿堂通风1200s后,室内空气质量达到理想的状态,甲醛散发源附近存在超标现象。

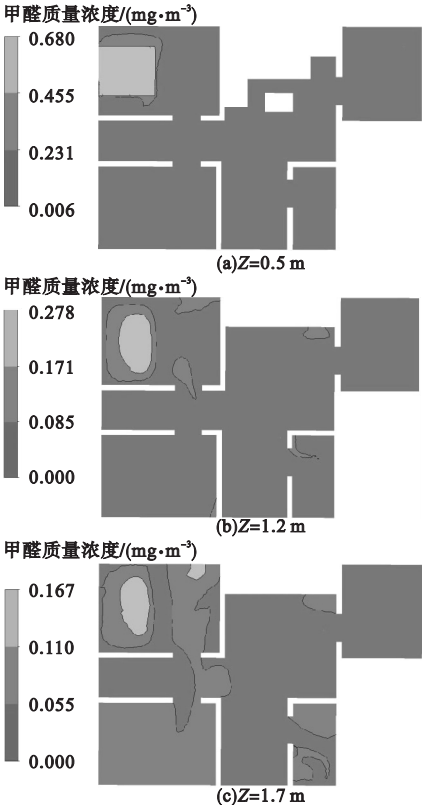


图11 风速为1 m/s,不同高度下1200s时甲醛质量浓度分布云图

Fig. 11 When wind speed is 1 m/s, cloud diagram of HCHO mass concentration distribution at 1200 s at different heights

图 12 为工况 IV 条件下不同高度的室内温度云图. 穿堂通风 1 200 s 时,室内温度在 297~300 K 内变化. 不同高度平面的平均温度均为 299 K,整个温度场比较均匀. 在夏季当送风速度为 1 m/s 时,穿堂通风 1 200 s 不会给室内居民带来不舒适的感觉.

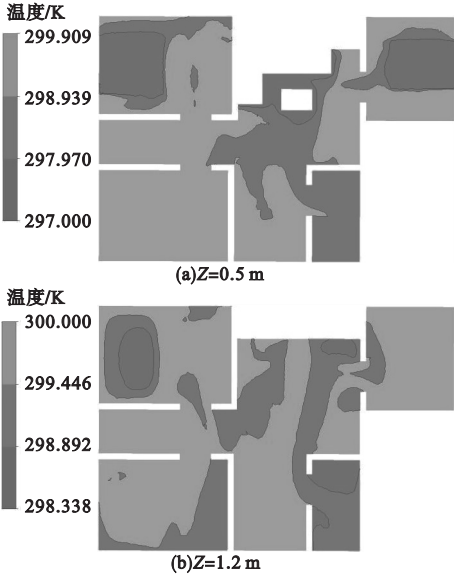


图 12 风速为 1 m/s,不同高度下 1 200 s 时温度云图

Fig. 12 When wind speed is 1 m/s,temperature cloud diagram at 1 200 s at different heights

夏季风速为 1 m/s 的模拟结果与送风速度为 0.8 m/s 时基本相同,穿堂通风 500 s 左右室内甲醛质量浓度和温度即可达到稳定(见图 13).

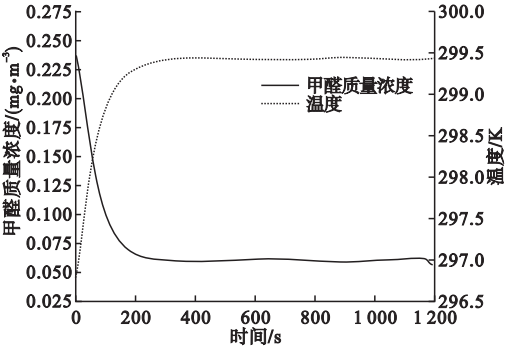


图 13 风速为 1 m/s,平均甲醛质量浓度与温度随时间的变化曲线

Fig. 13 When wind speed is 1 m/s,variation curve of average HCHO mass concentration and temperature with time

3.3 过渡季模拟结果分析

严寒地区过渡季室外风速较大,笔者模拟过渡季风速为 3 m/s. 模拟过渡季节工况时污染源仍然为房间内的家具,设置卧室甲醛扩散率为  $3.92 \times 10^{-11}$  kg/s、客厅甲醛扩散率为  $8.53 \times 10^{-11}$  kg/s,当初始甲醛质量浓度为 0.23 mg/m<sup>3</sup> 时,对甲醛质量浓度与室内温度分布情况进行模拟.

3.3.1 风速为 3 m/s 时模拟结果

图 14 为工况 V 条件下穿堂通风 900 s 时不同高度的室内甲醛质量浓度分布云图.

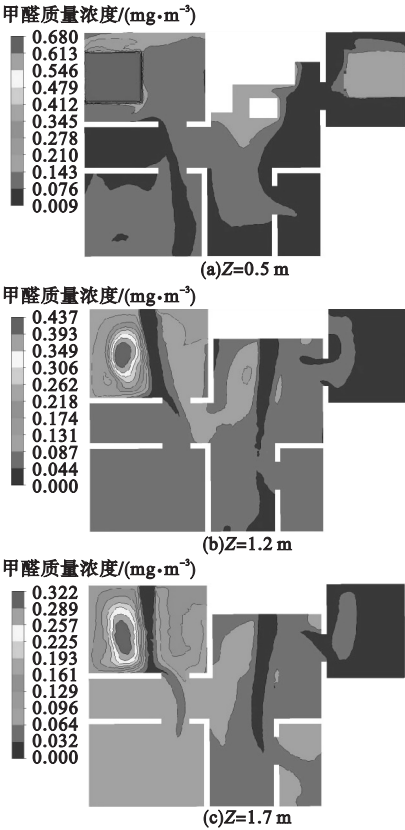


图 14 风速为 3 m/s,不同高度下 900s 时甲醛质量浓度分布云图

Fig. 14 When wind speed is 3 m/s,cloud diagram of HCHO mass concentration distribution at 900s at different heights

经模拟结果可知,穿堂通风 900 s 时, Z=0.5 m、Z=1.2 m 与 Z=1.7 m 平面甲醛平均质量浓度分别为 0.06 mg/m<sup>3</sup>、0.05 mg/m<sup>3</sup>、

0.04 mg/m<sup>3</sup>. 过渡季节尽管初始甲醛质量浓度较高,但穿堂通风可快速降低室内甲醛质量浓度.900 s 后,甲醛质量浓度已降低到标准水平以下.但从舒适度角度讲在过渡季节风速较大时长时间的穿堂通风会给居民带来较大的吹风感.

图 15 为工况 V 条件下不同高度的室内的温度云图.穿堂通风 900 s 时,室内温度在 285 ~ 287 K 内变化. Z = 0.5 m、Z = 1.2 m 平面的平均温度均为 285 K,窗口附近出现最低温度,温度波动较小且均处于可接受温度范围内.在过渡季节室外风速为 3 m/s 时,穿堂通风 900 s 不会造成热不舒适.

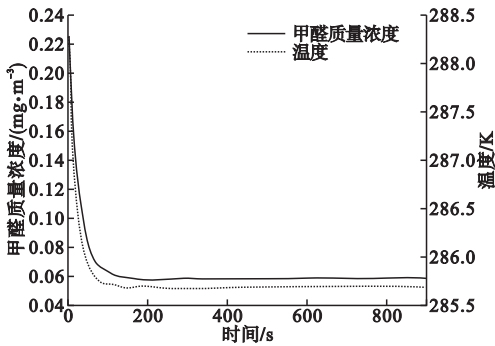


图 16 风速为 3 m/s,平均甲醛质量浓度与温度随时间的变化曲线

Fig. 16 When wind speed is 3 m/s, variation curve of average HCHO mass concentration and temperature with time

4 结 论

(1) 冬季甲醛初始质量浓度为 0.148 mg/m<sup>3</sup>时穿堂通风 150 s 室内甲醛质量浓度降低到 0.057 mg/m<sup>3</sup>. 冬季穿堂通风会造成室内热损失,300 s 时开窗热损失为 2.724 × 10<sup>6</sup> J.

(2) 夏季甲醛初始质量浓度为 0.25 mg/m<sup>3</sup>穿堂通风 500 s 室内甲醛质量浓度达到 0.05 mg/m<sup>3</sup>. 由于夏季室外温度高,消除污染物后可继续穿堂通风. 过渡季甲醛初始质量浓度为 0.23 mg/m<sup>3</sup> 时穿堂通风 200 s 室内甲醛质量浓度达到 0.055 mg/m<sup>3</sup>.

(3)穿堂通风可快速降低室内污染物浓度.严寒地区冬季室外温度低,开窗后会给居民带来不舒适感.从热舒适与节能角度考虑,在冬季进行短暂的穿堂通风消除污染物后不要在继续穿堂通风.夏季进行穿堂通风消除污染物后在条件允许的情况下可继续保持穿堂通风.过渡季节风速较高且不稳定,风速较大时穿堂通风会给室内居民带来强烈的吹风感.

参考文献

[1] 朱晓明. 基于连续在线监测的西安市住宅室内空气品质及居民开窗行为研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学,2018.  
(ZHU Xiaoming. Research on indoor air quality of Xi'an residential buildings and residents'

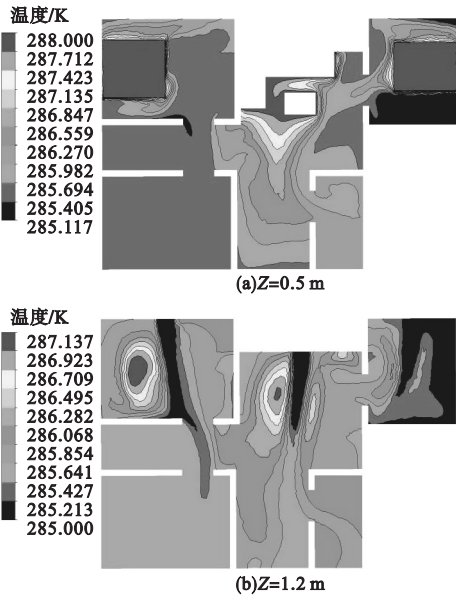


图 15 风速为 3 m/s,不同高度下 900 s 时温度云图

Fig. 15 When wind speed is 3 m/s, temperature cloud diagram at 900 s at different heights

根据模拟结果可得,过渡季风速为 3 m/s,穿堂通风 200s 时室内甲醛质量浓度已经基本稳定,甲醛质量浓度保持在 0.06 mg/m<sup>3</sup>,穿堂通风 150 s 左右室内温度达到稳定.室内温度稳定在 285.7 K. 由于过渡季节风速较高,会给居民造成强烈的吹风感,当污染物水平稳定之后可不再继续穿堂通风(见图 16).



- window switching behavior based on continuous online monitoring[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. )
- [2] 王焯. 北方地区住宅冬季自然通风对室内热环境的影响研究[J]. 暖通空调, 2008(7): 125-129.  
(WANG Ye. Study on the influence of natural ventilation on indoor thermal environment in north China in winter[J]. Heating ventilating and airconditioning, 2008(7): 125-129. )
- [3] 谭冰, 闫晓煜, 许丽颖. 室内装修污染物的调查及净化的研究[J]. 科技展望, 2015, 25(11): 254.  
(TAN Bing, YAN Xiaoyu, XU Liying. Investigation and purification of indoor decoration pollutants[J]. Technology outlook, 2015, 25(11): 254. )
- [4] 肖楚璠. 自然通风条件下室内甲醛扩散模拟研究[J]. 洁净与空调技术, 2013(1): 15-18.  
(XIAO Chufan. Study on formaldehyde diffusion simulation under natural ventilation[J]. Clean and air conditioning technology, 2013(1): 15-18. )
- [5] HUANG Kailiang, FENG Guohui, LI Huixing, et al. Opening window issue of residential buildings in winter in north China: a case study in Shenyang[J]. Energy and buildings 2014, 84, 567-574.
- [6] 李元铭, 强天伟. 现行新风处理方式存在的瓶颈及应对策略分析[J]. 制冷与空调, 2015, 15(12): 6-9.  
(LI Yuanming, QIANG Tianwei. Analysis of the bottlenecks and countermeasures of the current fresh air treatment methods[J]. Refrigeration and air conditioning, 2015, 15(12): 6-9. )
- [7] 黄凯良. 北方住宅冬季通风与高效储能新风系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
(HUANG Kailiang. Study on ventilation and efficient energy storage fresh air system in north residential buildings in winter[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. )
- [8] 张浩, 张吉光, 祝波, 等. 室内空气质量的评价[J]. 能源技术, 2003, 24(6): 251-254.  
(ZHANG Hao, ZHANG Jiguang, ZHU Bo, et al. Indoor air quality evaluation[J]. Energy technology, 2003, 24(6): 251-254. )
- [9] GALVIN R. Impediments to energy-efficient ventilation of German dwellings: a case study in Aachen[J]. Energy and buildings, 2013, 56: 32-40.
- [10] 梁传志, 冯国会, 徐硕, 等. 单体建筑高度对风压作用下自然通风的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007(4): 625-630.  
(LIANG Chuazhi, FENG Guohui, XU Shuo, et al. Influence of single building height on natural ventilation under wind pressure[J]. Journal of Shenyang jianzhu university( natural science), 2007(4): 625-630. )
- [11] 陈雨, 许志浩, 马国川. 关于自然通风 CFD 算法几点探讨[J]. 制冷与空调, 2011(1): 78-81.  
(CHEN Yu, XU Zhihao, MA Guochuan. Discussion on CFD algorithm of natural ventilation[J]. Refrigeration and air conditioning, 2011(1): 78-81. )
- [12] 冯国会, 明月, 兰信颖, 等. 室内3种送风方式下人体气溶胶颗粒数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(1): 131-136.  
(FENG Guohui, MING Yue, LAN Xinying, et al. Numerical simulation of human aerosol particles in three indoor air supply modes[J]. Journal of Shenyang jianzhu university( natural science), 2014, 30(1): 131-136. )
- [13] 夏侯炳, 申君, 姜娅. 自然通风下室内甲醛浓度数值模拟与试验研究[J]. 科技创新与应用, 2019(4): 45-46.  
(XIA Houbing, SHEN Jun, JIANG Ya. Numerical simulation and experimental study of indoor formaldehyde concentration under natural ventilation[J]. Technological innovation and application, 2019(4): 45-46. )
- [14] 黄凯良, 苒群鹏, 宋嘉森, 等. 同心管束式空气型相变蓄热器换热影响因素分析[J]. 流体机械, 2018, 46(11): 74-78.  
(HUANG Kailiang, CHANG Qunpeng, SONG Jiasen, et al. Analysis of factors affecting heat transfer of concentric tube bundle air phase change accumulator[J]. Fluid machinery, 2018, 46(11): 74-78. )
- [15] 关莹. 基于寒地重工业城市住宅建筑雾霾颗粒物浓度扩散规律研究分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2017.  
(GUAN Ying. Study and analysis on the diffusion law of haze particle concentration based on residential buildings in heavy industry in cold region[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017. )
- [16] 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. Method for estimating formaldehyde emission rate in residential buildings[J]. Journal of Nanchang university( engineering edition), 2016, 38(1): 32-38. )
- [17] 冯国会, 姜编, 黄凯良, 等. 严寒地区通风房间内甲醛污染物浓度分布规律研究[J]. 流体机械, 2017, 45(11): 79-84.  
(FENG Guohui, JIANG Bian, HUANG Kailiang, et al. Study on the concentration distribution of HCHO pollutants in ventilation rooms in cold regions[J]. Fluid machinery, 2017, 45(11): 79-84. )
- [18] 王芳, 王鹏浩, 徐洪发. 冬季东北地区室内甲醛扩散的数值模拟[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(6): 29-34.  
(WANG Fang, WANG Penghao, XU Hongxiang. Numerical simulation of indoor formaldehyde diffusion in northeast China in winter[J]. Journal of Harbin university of science and technology, 2018, 23(6): 29-34. )
- [19] HUANG Kailiang, SONG Jiasen, FENG Guohui, et al. Indoor air quality analysis of residential buildings in northeast China based on field measurements and longtime monitoring[J]. Building and environment, 2018, 144: 171-183. )
- [20] 李京美, 付林, 狄洪发. 供暖住宅房间开窗热损失的测试与分析[J]. 暖通空调, 2008, 38(3): 111-113.  
(LI Jingmei, FU Lin, DI Hongfa. Test and analysis of heat loss in heating window of heating house[J]. Heating ventilating and airconditioning, 2008, 38(3): 111-113. )
- (责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)