文章编号：1008－8857(2023)02－0095－09　**DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2023.02.004

装修板材承载率及通风方式对室内甲醛质量浓度的影响

王海东，朱杰克，孙婵娟
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘　要：为探究住宅建筑中装修板材承载率及通风方式对室内甲醛质量浓度的影响，采用 EnergyPlus 软件建立上海地区典型住宅计算模型，进行室内全年甲醛质量浓度模拟。根据上海地区全年室内甲醛质量浓度的实测数据验证模拟结果的准确性，并采用该模型在 3 种通风方式(渗透通风、自然通风、机械通风)下检验现行标准中承载率限值及计算方法的可靠性。结果表明，按照现行标准中的板材承载率限值进行装修，在 3 种通风工况下，上海地区典型住宅室内甲醛质量浓度超标率分别为 14.37% ～ 18.30%、8.36% ～ 14.93%、1.92% ～ 7.63%。自然通风和机械通风均能改善超标情况，其中机械通风的改善效果更明显。因此，亟需修正现行标准中板材承载率限值及计算方法，以便更加准确地指导上海地区住宅室内装修。

关键词：住宅建筑通风；甲醛污染；全年模拟；甲醛质量浓度标准
中图分类号：TU504　　**文献标志码**：A

Effect of the loading rate of decorative boards and ventilation modes on indoor formaldehyde concentration

WANG Haidong，ZHU Jieke，SUN Chanjuan
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To explore the effects of loading rate of decorative boards and ventilation on indoor formaldehyde concentration, the calculation model of a typical residential department in Shanghai was established by EnergyPlus simulation software to simulate the indoor annual formaldehyde concentration. The accuracy of simulated data was verified by the measured results. The calculation model was used to test the reliability of limitation and calculation methods of loading rate in the present decoration standard under three ventilating modes such as infiltration ventilation, natural ventilation, and mechanical ventilation. The results show that the exceeding-standard rate of indoor formaldehyde concentration in a typical residential department in Shanghai was 14.37%~18.30%, 8.36%~14.93%, 1.92%~7.63% under three different ventilation modes, respectively when decoration was performed according to this standard. It was found that using natural ventilation and mechanical ventilation could reduce the exceeding-standard rate. The improvement caused by

收稿日期：2022－03－24
第一作者：王海东(1982—)，男，副教授。研究方向：建筑节能与通风。E-mail：whd@usst.edu.cn

mechanical ventilation was more obvious. It proved that the limitation and calculation method in the present standard couldn't accurately guide the indoor decoration in Shanghai and the revision was required.

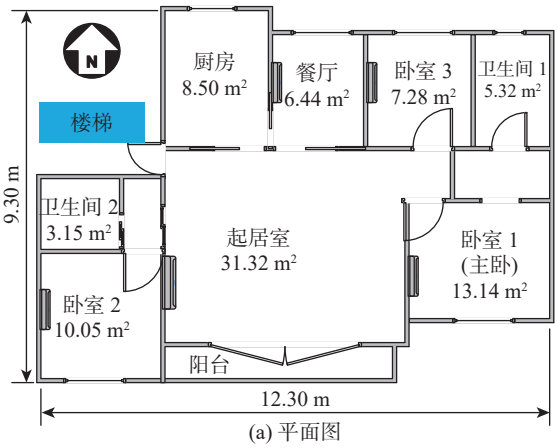
Keywords: ventilation of residential building; formaldehyde pollution; annual simulation; formaldehyde mass concentration standard

人有 80%～90% 的时间[1]在室内度过，因此室内空气品质对于人员健康非常重要。已有检测表明，室内可被检测到的污染物种类有 300 多种[2]。近年来，对部分建筑采取的节能措施增强了房间的气密性，减少了室内换气次数，导致室内化学物质残留浓度较高[3–5]。甲醛是住宅室内空气中的首要污染物，因此研究室内甲醛污染控制策略对于保证人员健康以及提高室内空气品质均具有重要意义[6–7]。室内污染物会使长期在室内生活、学习和工作的人员产生不适，从而引起病态建筑综合症(sick building syndrome, SBS)[8–9]。室内装修所用人造板材是甲醛污染物的主要来源之一[10–11]。因此，控制室内装修所用人造板材的用量对于控制室内甲醛污染至关重要，而承载率是衡量室内板材用量的重要指标，其定义为暴露在空气中的材料表面积与房间面积的比值。

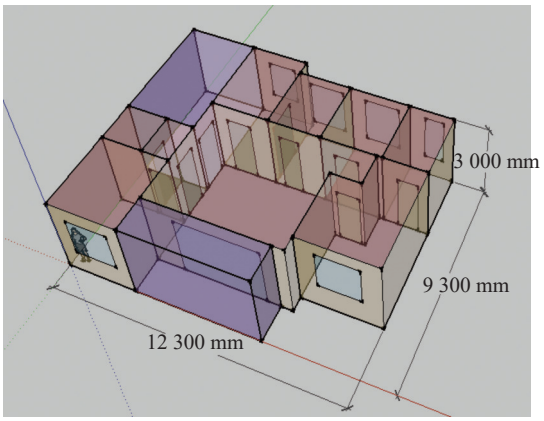
我国指导室内装修的《住宅建筑室内装修污染控制技术标准》(JGJ/T 436—2018)[12]中对住宅建筑室内装修所用人造板材按照甲醛散发强度进行了等级划分，不同等级的人造板材承载率限值不同，甲醛散发强度也不同。通风换气是减轻室内空气污染的主要方法之一，但 JGJ/T 436—2018 中仅将换气次数设置为 0.45 次·h^{-1}。通风不足时化学物质可长时间滞留在室内，从而增加了人员接触化学物质的风险[13–14]。法国某研究[15]表明学校建筑中使用机械通风可使室内甲醛浓度始终保持在较低水平。考虑到目前甲醛检测耗时、耗力，且费用较高、准确度不高等缺点[16–18]，利用 EnergyPlus 软件建立上海地区典型住宅计算模型并模拟全年室内甲醛质量浓度能很好地解决这些问题。为研究 JGJ/T 436—2018 中板材承载率、甲醛散发强度及通风方式对室内甲醛质量浓度的影响，本文分别进行模拟和实测分析，以便为指导装修、确保室内甲醛质量浓度达标提供依据。

1 上海地区典型住宅计算模型建立

本文选取上海某典型高层住宅中的一户为参照建筑开展模拟研究。该住宅位于标准层 6 层，层高 3.0 m。基于 EnergyPlus 软件建立上海地区典型住宅计算模型。图 1 为上海地区典型住宅户型图。



(a) 平面图



(b) 3D 模型图

图 1 上海地区典型住宅户型图

Fig. 1 Layout of a typical residential department in Shanghai

模拟过程中的已知参数为室外气象数据和室外全年 $PM_{2.5}$ 质量浓度，其余输入条件的设置如下。

1.1　人员 CO_2 散发强度

本文以上海工薪阶层的四口之家为典型案例，参考文献 [19] 设置全年逐时住宅模型中室内人员数量及停留时间，结果如表 1 所示。

表 1　室内人员数量及停留时间

Tab. 1　Number and residence time of indoor occupant

房间	人员数量/人	停留时间	
		工作日	周末
起居室	0～4	18:00～22:00	11:00～22:00
卧室1	3	22:00～07:00	22:00～07:00
卧室2	1	22:00～07:00	22:00～07:00
卧室3	1	19:00～21:00	19:00～21:00

住宅内 CO_2 来源于室内人员散发和室外大气。根据实测，室外 CO_2 体积分数为 0.04%；室内 CO_2 来源主要为室内人员散发。在上海地区典型住宅计算模型中基于美国采暖、制冷与空调工程师学会（ASHRAE）标准第 62.1 条的规定[20]，设置人均 CO_2 散发强度 V_a 为 $3.82\times10^{-8}\ m^3\cdot s^{-1}\cdot W^{-1}$。室内人员 CO_2 总散发量为

$$V_t = PTMV_a \tag{1}$$

式中：V_t 为室内人员 CO_2 总散发量，m^3；P 为人员数量，人；T 为人员室内停留时间，s；M 为人员新陈代谢量，W。

人员数量 P 和停留时间 T 按表 1 设置。本文主要研究对象为住宅中的卧室，在夜间卧室内人员均处于睡眠状态，此时室内人员新陈代谢量的设置参考 ASHRAE 标准第 55 条规定[21]。

1.2　通风方式

1.2.1　渗透通风

住宅内门窗关闭，仅靠门窗缝隙的渗透新风稀释室内污染物。本文模型中建筑的气密性参考室内环境与儿童健康研究上海地区课题（CCHH）[22] 中的实测数据进行设置。

1.2.2　自然通风

上海大多数住宅均采用自然通风，窗户的开启情况会对室内空气质量和能耗产生影响。居住者的开窗行为与室外温度及污染情况有关。为贴合实际情况，在此对比两种开、关窗模式。

模式一，依据 Lai 等[23] 对全国 5 个不同气候区的检测结果，设置夏热冬冷地区住宅内卧室的开、关窗时间。

模式二，自然通风的开、关窗规则根据室外温度及 $PM_{2.5}$ 质量浓度设定。室外温度过高或过低都会影响人员的开窗行为。文献 [19] 中以室内设计温度 18、26 ℃ 为开窗依据。本文考虑到人员对温度的可接受度，参照文献 [24] 对夏热冬冷地区舒适区温度进行取值，最终确定室外适宜的开窗温度为 16 ～ 28 ℃。同样，室外 $PM_{2.5}$ 质量浓度亦会影响人员的开窗行为[21]。当室外 $PM_{2.5}$ 质量浓度小于 35 $\mu g\cdot m^{-3}$ 时，空气质量达到优，则开窗。综上，室外温度在 16 ～ 28 ℃，$PM_{2.5}$ 质量浓度小于 35 $\mu g\cdot m^{-3}$ 时，室内人员开窗并关闭室内空调进行自然通风，开窗面积为窗户最大可开启面积的 1/4。

将两种自然通风的开、关窗模式输入上海地区典型住宅计算模型中，模拟得到全年逐时 CO_2 体积分数，并将其与实测值进行对比，结果如表 2 所示。可见，模拟值和实测值区间分布相似，但模式二下 CO_2 体积分数（中位数）更贴合 CCHH 实测值。因此，本文选取模式二的开、关窗规则用于模拟分析。

表 2　室内 CO_2 体积分数的模拟值与实测值

Tab. 2　Measured and simulated values of indoor CO_2 volume fraction

测定方法	室内CO_2体积分数（中位数）/%
实测法	0.062
模拟法（模式一）	0.047
模拟法（模式二）	0.051

1.2.3　机械通风

在一些较高档的住宅中，居民为了获得更好的室内空气品质选择机械通风。本文是针对我国上海地区住宅的研究，因此采用我国设计标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB

50736—2012）[25]中计算居住建筑室内设计新风量的方法，根据各房间面积和所对应的每小时换气次数计算风量，得到设计新风量，结果如表 3 所示。

表 3 各房间设计新风量

Tab. 3 Designed fresh air flow in each room

房间名称	房间面积/m^2	设计新风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
卧室1	13.14	27.59
卧室2	10.05	18.09
卧室3	7.28	15.29
起居室	31.32	65.77

2 上海地区典型住宅计算模型验证

对上海地区典型住宅计算模型的可靠性进行验证。关窗时渗透通风换气次数代表房间的气密性，通过实测获得渗透通风换气次数可对模型的气密性参数进行有效验证。住宅中若人员数量相对固定，房间换气次数可通过室内 CO_2 体积分数的变化来计算。

2.1 换气次数的计算方法

根据被测室内示踪气体的稀释和累积情况，检测其浓度变化，并基于该变化趋势通过质量守恒原理进行求解，即可得到房间换气次数。本文中认为室内人员为 CO_2 的释放源头，即

$$V\frac{dC_i}{d\tau} = Q(C_o - C_i) + R \quad (2)$$

式中：V 为房间的体积，m^3；τ 为时间，s；Q 为通风量，$m^3 \cdot s^{-1}$；C_o 为室外示踪气体的体积分数，$mL \cdot m^{-3}$；C_i 为 τ 时刻室内示踪气体的体积分数，$mL \cdot m^{-3}$；R 为单位时间内示踪气体的散发量，$m^3 \cdot s^{-1}$。

在使用 CO_2 作为示踪气体时，C_o 为室外 CO_2 体积分数，C_i 为室内逐时 CO_2 体积分数，R 为室内人员 CO_2 散发量，其值可根据室内人员的身高、体重进行计算。

2.2 验证结果

为了计算全年实测换气次数，采用 CCHH 于 2014 年 1 月—12 月入户检测得到的全年数据，并选取其中 104 户夜间 23 点至次日早上 6 点卧室内逐时 CO_2 体积分数。该时段内人员处于相对稳定的睡眠状态，CO_2 散发源稳定。该时段内房间门窗关闭，房间的气密性未发生明显改变。但由于部分时段数据不完整，最终选取每户全年中 1 860 h 的逐时 CO_2 体积分数，并结合实测得到的室外逐时 CO_2 体积分数及房间体积，计算夜间实测逐时换气次数。

模拟时通风工况为根据实测设置的门窗完全关闭时的渗透通风，室外参数根据实测值设置，室内人员 CO_2 散发情况按照 1.1 节设置。对上海地区典型住宅计算模型中卧室 1 全年 8 760 h 逐时 CO_2 体积分数进行模拟，并选取与实测值对应的 1 860 h 逐时 CO_2 体积分数的模拟值。基于 CO_2 体积分数的变化，根据三角形质心迭代的定位算法（point-in-triangulation，PIT）并借助 EXCEL 软件计算夜间 23 点至次日早上 6 点卧室内的换气次数，将实测值与模拟值分布情况进行对比，结果如图 2 所示。从图中可以发现，卧室内夜间换气次数的模拟值分布与实测值分布接近，尤其是两者的中位数相差不大，证明根据 CO_2 体积分数变化模拟得到的换气次数较为准确。由此说明模型中室内、室外大气之间的气体交换情况与实际情况相近。由于本文需获得室内甲醛质量浓度数据，且室内甲醛质量浓度与甲醛散发源和房间通风方式有关，在甲醛散发源不变时影响甲醛质量浓度的只有通风方式，因此，只要模型中室内、室外大气之间的气体交换情况较为精准，就可采用该模型来计算室内甲醛质量浓度。

3 承载率验证

3.1 标准依据

参照 JGJ/T 436—2018 中对室内空气等级Ⅲ（室内甲醛质量浓度不大于 80 $\mu g \cdot m^{-3}$）的要求，计算得到不同等级板材的承载率，并结合板材的甲醛散发强度上、下限模拟得到全年室内甲醛质量浓度。考虑到目前对室内空气品质要求的提升以及新标准 GB/T 18883—2022[26] 中对室内

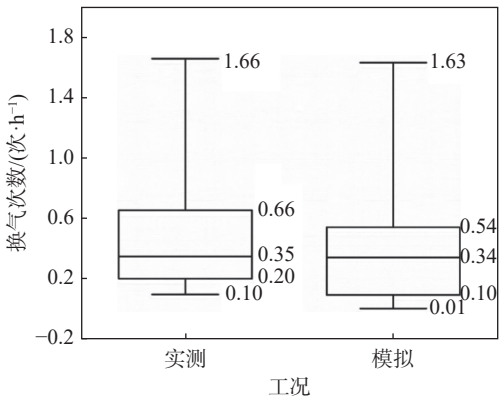


图 2　卧室内夜间实测与模拟换气次数分布

Fig. 2　Distribution of measured and simulated ventilation times in the bedroom at night

甲醛质量浓度要求(不超过 80 μg·m^{-3}，这与 JGJ/T 436—2018 中对室内空气等级Ⅲ的要求一致)的降低，为使本研究成果更具代表性，将 80 μg·m^{-3} 作为室内甲醛质量浓度是否超标的参照标准。

JGJ/T 436—2018 中规定，在住宅装修设计前期应对室内材料的用量进行控制，其中板材的用量按照其暴露在空气中的面积计算，并将同等释放率的板材面积相加。本文假设室内均使用同等释放率的板材，且各板材均满足该标准的散发强度要求，在此根据 JGJ/T 436—2018 中的材料污染物释放率控制法进行分析，具体计算方法见式(3)～(4)。考虑到等级 F1 板材的甲醛散发强度较低，故对等级 F1 板材的使用不设置限制。

$$\frac{1}{5}N_{F2}+\frac{2}{5}N_{F3}+\frac{4}{5}N_{F4}\leqslant\frac{1}{\alpha} \tag{3}$$

$$N_{Fi}=\frac{S_{Fi}}{A} \tag{4}$$

式中：N_{Fi} 为污染物释放等级为 Fi 的板材承载率标准限值；S_{Fi} 为污染物释放等级为 Fi 的板材面积限值，m^2；A 为房间面积，m^2；i 为板材的污染物释放率等级，取 2、3、4；α 为温度修正系数，在此取 1。

3.2　板材承载率和甲醛散发强度计算

根据上海地区典型住宅计算模型和式(3)～(4)计算各房间内不同污染物释放等级板材的承载率标准限值 N_{Fi}、板材面积限值 S_{Fi} 和单位时间内的甲醛散发强度 E_{Fi}。各等级板材单位面积的甲醛散发强度是一个范围值，分别计算其上限、下限，结果如表 4 所示。

4　模拟结果

将表 4 中的参数输入上海地区典型住宅计算模型中，动态模拟全年室内甲醛质量浓度，并计算室内甲醛质量浓度超标率，结果如表 5 所示。根据表 5 分析可得，3 种不同等级(F2、F3、F4)板材甲醛散发强度取下限值时，室内甲醛质量浓度在全年不保证 5 天原则下(超标率不超过 1.37%)，室内甲醛质量浓度均不超标，超标率最高为 1.21%。因此，下文只分析 9 种工况中取板材甲醛散发强度上限值时的室内甲醛超标情况。按照表 5 绘制各房间室内甲醛质量浓度超标率随板材等级的变化图，结果如图 3 所示。可见，当选取保证室内空气质量等级Ⅲ级板材承载率标准限值，且选用 3 种等级板材的甲醛散发强度上限时，对住宅模型中 4 个房间全年室内甲醛质量浓度进行模拟，结果表明，在全年不保证 5 天原则下(超标率不超过 1.37%)，室内甲醛质量浓度(大于 80 μg·m^{-3})均超标。

4.1　板材等级及板材承载率对室内甲醛质量浓度超标率的影响

在分析单个房间室内甲醛质量浓度超标率时发现，相同通风方式下随着板材等级上升(F2<F3<F4)，板材的甲醛散发强度增强，室内甲醛质量浓度超标率略有上升。4 个房间的 36 种工况中变化最显著的工况为卧室 2 的自然通风工况，如图 3(b)所示，即板材等级为 F2 时，超标率为 12.63%；板材等级为 F3 时，超标率为 12.71%；板材等级为 F4 时，超标率为 13.66%。板材等级上升时，超标率最大变化值为 0.96%，即超标率上升并不显著。这是因为随着板材等级上升(F2<F3<F4)，甲醛散发强度上升，但板材承载率限值会相应降低，即单位面积房间所使用的暴露在空气中的板材面积减少，这将导致室内甲醛质量浓度保持在一个相对恒定的水平，导致超标率变化不大。相同通风工况下卧室 1、卧室

表 4 板材承载率标准限值、板材面积限值及甲醛散发强度

Tab. 4 Limitation of loading rate, surface area, and formaldehyde emission intensity of wooden boards

板材等级	参数	卧室1	卧室2	卧室3	起居室
F2	N_{F2}	5.00	5.00	5.00	5.00
	S_{F2}/m^2	65.70	50.25	36.40	156.60
	E_{F2}(上限)/(μg·h^{-1})	1 971.00	1 507.50	1 092.00	4 698.00
	E_{F2}(下限)/(μg·h^{-1})	657.00	502.50	364.00	1 566.00
F3	N_{F3}	2.50	2.50	2.50	2.50
	S_{F3}/m^2	32.85	25.13	18.20	78.30
	E_{F3}(上限)/(μg·h^{-1})	1 971.00	1 507.50	1 092.00	4 698.00
	E_{F3}(下限)/(μg·h^{-1})	985.50	753.80	546.00	2 349.00
F4	N_{F4}	1.25	1.25	1.25	1.25
	S_{F4}/m^2	16.43	12.56	9.10	39.15
	E_{F4}(上限)/(μg·h^{-1})	1 971.00	1 507.50	1 092.00	4 698.00
	E_{F4}(下限)/(μg·h^{-1})	985.50	753.80	546.00	2 349.00

表 5 室内甲醛质量浓度超标率模拟结果

Tab. 5 Simulated values of the exceeding-standard rate of indoor formaldehyde mass concentration

通风方式	房间	不同等级板材室内甲醛质量浓度超标率/%					
		上限			下限		
		F2	F3	F4	F2	F3	F4
渗透通风	卧室1	17.50	18.14	18.30	0.06	1.13	1.21
	卧室2	16.28	16.85	17.26	0.03	0.97	1.11
	卧室3	15.55	15.83	16.08	0	0.83	0.92
	起居室	14.37	14.94	14.97	0	0.71	0.75
自然通风	卧室1	13.88	14.47	14.93	0	0.61	0.78
	卧室2	12.63	12.71	13.66	0	0.46	0.58
	卧室3	10.96	11.13	11.52	0	0.37	0.49
	起居室	8.36	9.17	9.77	0	0.18	0.30
机械通风	卧室1	6.91	7.11	7.63	0	0.26	0.37
	卧室2	4.91	5.25	5.66	0	0.18	0.24
	卧室3	3.87	4.19	4.91	0	0.10	0.18
	起居室	1.92	2.24	2.43	0	0.02	0.05

3、起居室的甲醛质量浓度超标率随板材等级上升的趋势与卧室 2 的类似，即超标率略有上升，但变化不显著。

4.2 通风方式对室内甲醛质量浓度超标率的影响

表 6 为通风方式对室内甲醛质量浓度超标率的影响。可见，在板材等级相同时，在渗透通风

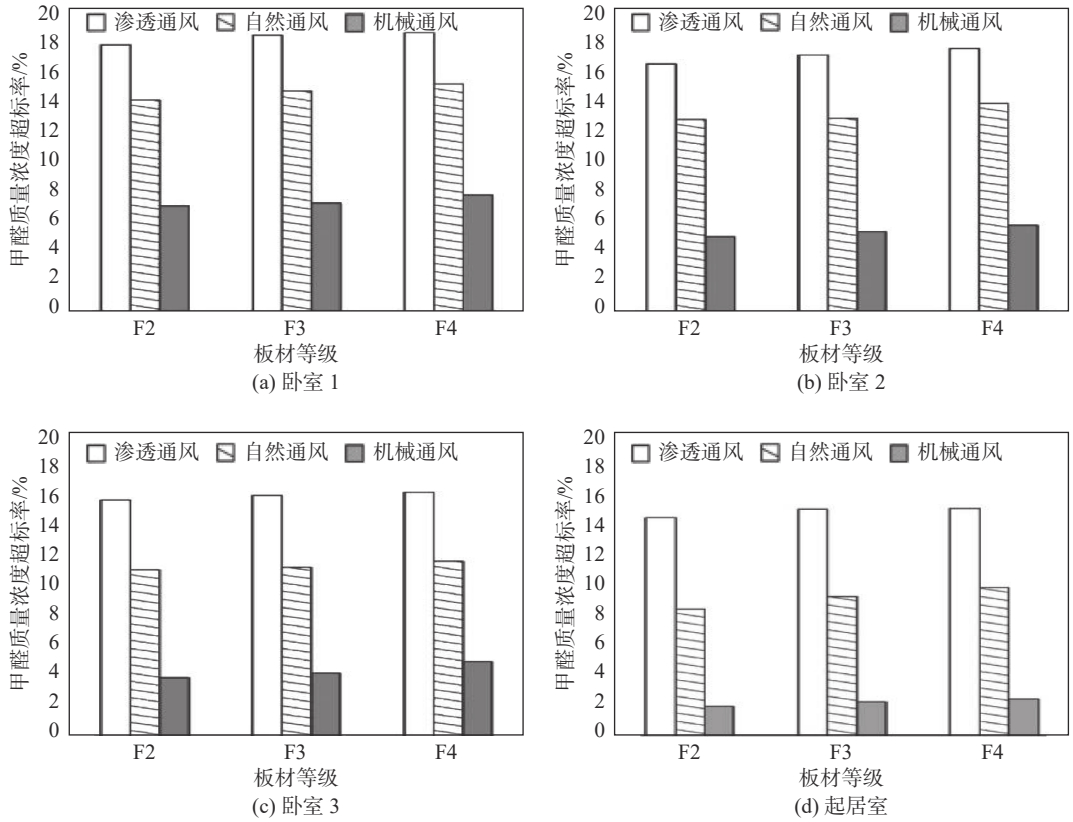


图 3　室内甲醛质量浓度超标率

Fig. 3　Exceeding-standard rate of indoor formaldehyde mass concentration

表 6　通风方式对室内甲醛质量浓度超标率的影响

Tab. 6　Effect of ventilation modes on exceeding-standard rate of indoor formaldehyde mass concentration

房间名称	板材等级	甲醛质量浓度超标率差值/%	
		渗透通风 自然通风	渗透通风 机械通风
卧室1	F2	3.62	10.59
	F3	3.66	11.03
	F4	3.37	10.67
卧室2	F2	3.65	11.37
	F3	4.14	11.60
	F4	3.60	11.60
卧室3	F2	4.59	11.68
	F3	4.70	11.64
	F4	4.57	11.18
起居室	F2	6.02	12.45
	F3	5.78	12.71
	F4	5.19	12.53

工况下室内甲醛质量浓度超标率最大。以渗透通风工况为基础，自然通风使卧室 1 的甲醛质量浓度超标率最多减少 3.66%，使卧室 2 的最多减少 4.14%，使卧室 3 的最多减少 4.59%，使起居室的最多减少 6.02%；机械通风能使卧室 1 的甲醛质量浓度超标率最多减少 11.03%，使卧室 2 的最多减少 11.60%，使卧室 3 的最多减少 11.68%，使起居室的最多减少 12.71%。这是因为机械通风量大于自然通风量，室内换气频率提高导致室内甲醛质量浓度超标率下降。

5　结 论

本文利用 EnergyPlus 软件建立上海地区典型住宅计算模型，在 3 种通风方式（渗透通风、自然通风、机械通风）下对采用 JGJ/T 436—2018 中的 3 种等级板材（F2、F3、F4）装修的 4 个房间（卧室 1、卧室 2、卧室 3、起居室）进行模

拟，得到全年室内甲醛质量浓度超标情况。主要结论为：

（1）在 3 种通风方式下，当选取保证室内空气质量等级Ⅲ级的板材承载率标准限值，且选用 3 种等级板材（F2、F3、F4）的甲醛散发强度上限时，在全年不保证 5 天原则下（超标率不超过 1.37%），4 个房间（卧室 1、卧室 2、卧室 3、起居室）的全年室内甲醛质量浓度（大于 80 $\mu g \cdot m^{-3}$）均超标，且超标率在 1.92%～18.30% 之间；3 种等级板材的甲醛散发强度取下限值时，在全年不保证 5 天原则下，各房间室内甲醛质量浓度均不超标。

（2）相同通风方式下随着板材等级上升，4 个房间室内甲醛质量浓度超标率变化趋势一致，即超标率上升不显著，最大上升幅度为 0.96%。这表明按照 JGJ/T 436—2018 进行装修时，板材等级及板材承载率标准限值的同步变化对室内甲醛质量浓度超标的影响较小。

（3）板材等级相同时，增大室内通风量能降低室内甲醛质量浓度超标率。与渗透通风相比，自然通风能使室内甲醛质量浓度超标率降低 3.37%～6.02%；机械通风能使室内甲醛质量浓度超标率降低 10.59% ～ 12.71%。可见，机械通风能显著改善室内甲醛质量浓度超标情况。

（4）按照 JGJ/T 436—2018 中推荐的方法计算得到的 3 种等级板材承载率限值，无法满足 3 种通风方式下甲醛污染浓度限值的要求。建议将标准中板材承载率限值降低，或在承载率限值不变的情况下将对应的板材甲醛散发强度上限降低，并根据通风情况分类规定。

参考文献：

[1] KIM Y M, HARRAD S, HARRISON R M. Concentrations and sources of VOCs in urban domestic and public microenvironments[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(6): 997 – 1004.

[2] 彭玉丹. 室内空气环境甲醛污染的数值模拟和风险评价 [D]. 天津: 天津大学, 2010.

[3] WANG Z, BAI Z, YU H, et al. Regulatory standards related to building energy conservation and indoor-air-quality during rapid urbanization in China[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(12): 1299 – 1308.

[4] MCGILL G, OYEDELE L O, MCALLISTER K. An investigation of indoor air quality, thermal comfort and sick building syndrome symptoms in UK energy efficient homes[J]. Smart and Sustainable Built Environment, 2015, 4(3): 329 – 348.

[5] BIRMILI W, DANIELS A, BETHKE R, et al. Formaldehyde, aliphatic aldehydes (C_2–C_{11}), furfural, and benzaldehyde in the residential indoor air of children and adolescents during the German Environmental Survey 2014–2017 (GerES V)[J]. Indoor Air, 2022, 32(1): e12927.

[6] SALTHAMMER T. The formaldehyde dilemma[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2015, 218(4): 433 – 436.

[7] BLONDEL A, PLAISANCE H. Screening of formaldehyde indoor sources and quantification of their emission using a passive sampler[J]. Building and Environment, 2011, 46(6): 1284 – 1291.

[8] SUN Y X, HOU J, CHENG R S, et al. Indoor air quality, ventilation and their associations with sick building syndrome in Chinese homes[J]. Energy and Buildings, 2019, 197: 112 – 119.

[9] NAKAOKA H, TODAKA E, SETO H, et al. Correlating the symptoms of sick-building syndrome to indoor VOCs concentration levels and odour[J]. Indoor and Built Environment, 2014, 23(6): 804 – 813.

[10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑工程室内环境污染控制标准: GB 50325—2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.

[11] 李蒙蒙, 任绳凤, 常茹, 等. 板式家具甲醛浓度散发实测 [J]. 环境化学, 2017, 36(5): 960 – 966.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住宅建筑室内装修污染控制技术标准: JGJ/T 436—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[13] ENGVALL K, WICKMAN P, NORBÄCK D. Sick building syndrome and perceived indoor environment in relation to energy saving by reduced ventilation flow during heating season: a 1 year intervention study in dwellings[J]. Indoor Air, 2005, 15(2): 120 – 126.

[14] SEPPĘNEN O. Ventilation strategies for good indoor air quality and energy efficiency[J]. International Journal of Ventilation, 2008, 6(4): 297 – 306.

[15] LIAUD C, CHOUVENC S, LE CALVÉ S. Simultaneous monitoring of particle-bound PAHs inside

a low-energy school building and outdoors over two weeks in France[J]. Atmosphere, 2021, 12(1): 108.

[16] ROCHA F R, COELHO L H G, LOPES M L A, et al. Environmental formaldehyde analysis by active diffusive sampling with a bundle of polypropylene porous capillaries followed by capillary zone electrophoretic separation and contactless conductivity detection[J]. Talanta, 2008, 76(2): 271 − 275.

[17] SALTHAMMER T, MENTESE S, MARUTZKY R. Formaldehyde in the indoor environment[J]. Chemical Reviews, 2010, 110(4): 2536 − 2572.

[18] DANNEMILLER K C, MURPHY J S, DIXON S L, et al. Formaldehyde concentrations in household air of asthma patients determined using colorimetric detector tubes[J]. Indoor Air, 2013, 23(4): 285 − 294.

[19] 苏州. 华北地区住宅通风与空气净化性能评估 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.

[20] ANSI/ASHRAE 62.1-2016 Ventilation for acceptable indoor air quality[S]. Atlanta: ASHRAE, 2016.

[21] ANSI/ASHRAE 55-2017 Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta: ASHRAE, 2017.

[22] HUANG C, LIU W, CAI J, et al. Household formal dehyde exposure and its associations with dwelling characteristics, lifestyle behaviours, and childhood health outcomes in Shanghai, China[J]. Building and Environment, 2017, 125: 143 − 152.

[23] LAI D Y, JIA S S, QI Y, et al. Window-opening behavior in Chinese residential buildings across different climate zones[J]. Building and Environment, 2018, 142: 234 − 243.

[24] 茅艳. 人体热舒适气候适应性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.

[25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化委员会. 室内空气质量标准:GB/T 18883—2022 [EB/OL]. [2022−07−11]. https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=E3C42FB7AC9F2086E05397BE0A0A19F0.

(上接第 94 页)

[5] MING R S, PAN J, NORTON M P, et al. The sound-field characterisation of a power transformer[J]. Applied Acoustics, 1999, 56(4): 257 − 272.

[6] ZAWIESKA W M. Power transformer as a source of noise[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2007, 13(4): 381 − 389.

[7] 董志刚. 变压器的噪声 (2)[J]. 变压器, 1995(11): 27 − 31.

[8] 谭闻, 张小武. 电力变压器噪声研究与控制 [J]. 华东电力, 2012, 4(4): 687 − 688.

[9] 王常平, 林云志, 王国伟, 等. 如何降低变压器噪声 [J]. 变压器, 2004, 41(6): 29 − 30.

[10] GIRGIS R S, GARNER K, BERNESJO M, et al. Measuring no-load and load noise of power transformers using the sound pressure and sound Intensity methods-Part-I: outdoors measurements[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1 − 8.

[11] 李诚理. 配电房干式变压器噪声分析及减振降噪处理 [J]. 机电信息, 2020(2): 70 − 71.

[12] 江世云. 降低电力变压器噪声的设计探讨 [J]. 大众用电, 2020, 35(6): 33 − 34.

[13] 田昊洋, 胡敏, 彭伟, 等. 表面振速法在干式变压器噪声测量中的应用 [J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(5): 196 − 200.

[14] 胡静竹, 王延召, 周兵, 等. 油浸式变压器声辐射效率分析 [J]. 变压器, 2020, 57(10): 76 − 82.

[15] 于梅, 杨丽峰, 刘爱东, 等. 激光测振仪在振动标准装置校准中的应用研究 [J]. 计量技术, 2009(2): 52 − 55.