

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-175-07

# 自然通风策略对高校宿舍室内空气品质的影响

杨云春 彭 贇 漆晨宇 易 浩 肖紫薇 刚文杰

(华中科技大学环境科学与工程学院 武汉 430074)

**【摘 要】** 高校宿舍的室内空气品质与学生的舒适健康和工作效率关系密切, 当前我国高校宿舍空气品质的改善主要依靠自然通风。通过长期监测武汉某高校一宿舍室内的 PM<sub>2.5</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度, 分析了不同自然通风策略和室内人员对室内空气品质的影响。结果表明, 室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度主要与室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度和自然通风策略有关, 不通风时室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度仅为室外的 70%, 加强自然通风会使室内外 PM<sub>2.5</sub> 浓度不断接近。室内 CO<sub>2</sub> 浓度与自然通风策略和人员数量均有密切联系, 较低的门窗开度即可有效的降低夜间室内的 CO<sub>2</sub> 浓度。

**【关键词】** 室内空气品质; 自然通风; 人员; 高校宿舍; CO<sub>2</sub>; PM<sub>2.5</sub>

中图分类号 TU834 文献标识码 A

## The Influence of Natural Ventilation Strategy on Indoor Air Quality of the College Dormitory

Yang Yunchun Peng Yun Qi Chenyu Yi Hao Xiao Ziwei Gang Wenjie

(School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

**【Abstract】** Indoor air quality (IAQ) of college dormitories is closely related to comfort, health and work efficiency of students. The improvement of IAQ mainly depends on natural ventilation. In order to analyze the impact of different natural ventilation strategies and personnel on IAQ, we monitored PM<sub>2.5</sub> and CO<sub>2</sub> concentration in a college dormitory in Wuhan during a long period. The result shows that the indoor PM<sub>2.5</sub> concentration is mainly related to the outdoor PM<sub>2.5</sub> concentration and natural ventilation strategy. The indoor PM<sub>2.5</sub> concentration is only 70% of that of the outdoor without ventilation, and will be continuously close to that of the outdoor with the increase of ventilation to outside. Indoor CO<sub>2</sub> concentration is closely related to the natural ventilation strategy and the amount of personnel. A narrow opening of the door or window can effectively reduce indoor CO<sub>2</sub> concentration at night.

**【Keywords】** indoor air quality; natural ventilation; personnel; college dormitories; CO<sub>2</sub>; PM<sub>2.5</sub>

基金项目: 华中科技大学大学生创新创业训练计划项目 (2019A0182)

作者简介: 杨云春 (1999.6-), 男, 在读本科生, E-mail: yangyunchun@hust.edu.cn

通讯作者: 刚文杰 (1988.5-), 女, 博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: gangwenjie@hust.edu.cn

收稿日期: 2020-07-23

## 0 引言

人们平均有 80~90% 的时间用于室内工作和居住<sup>[1]</sup>, 而高校宿舍作为学习生活的重要场所, 学生每天大多数时间都停留在宿舍中。良好的室内空气品质可以保证室内人员的身体健康并提高其工作效率, 低劣的室内空气品质则可能会导致“病态建筑综合征 (SBS)”甚至哮喘及癌症<sup>[2]</sup>。当前我国

每年有超过 4000 万大学生<sup>[3]</sup>, 因此研究高校学生宿舍室内空气品质具有重要意义。

学生宿舍构造简单且少有机机械通风系统, 室内空气品质大多依靠自然通风进行调节。自然通风能改善室内空气品质并降低建筑能耗<sup>[4]</sup>, 设计恰当也可保证其比机械通风系统达到更高的通风率<sup>[5]</sup>。相关研究表明, 外窗的大小、数量和位置、通风策略、

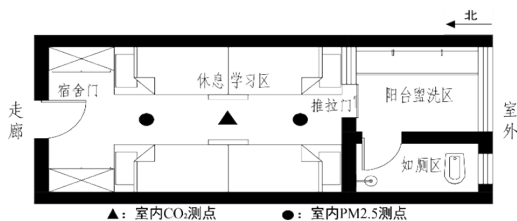
室内外空气品质等均会对自然通风效果产生较大影响。对侧自然通风（窗户分别位于两面相对的外墙，形成穿堂风）与单侧自然通风的效果在不同情况下呈现出较大差异，但通风时间较长时两者在夜间的通风效果相似<sup>[6]</sup>。室外空气较好时，有效的自然通风策略可以快速消除住宅内的污染物<sup>[7]</sup>；但室外污染物较多时，自然通风也让室内人员的健康问题日益严重<sup>[8]</sup>。此外，室内人员也对室内空气品质产生较大影响。一方面，室内 CO<sub>2</sub> 几乎完全由人的呼吸作用产生，室内人员的数量和活动状态均会对 CO<sub>2</sub> 浓度产生影响；另一方面，细颗粒物的浓度也会受到室内人员的影响<sup>[9]</sup>。室内 PM<sub>2.5</sub> 与 CO<sub>2</sub> 浓度通常被用作室内空气质量评价的监测参数，这是因为 PM<sub>2.5</sub> 对人体伤害较大，可以穿透肺泡进入血液，破坏器官的细胞结构和功能<sup>[10]</sup>；CO<sub>2</sub> 的浓度则会影响室内人员的健康与工作效率，特别是认知能力和注意力<sup>[11]</sup>。

为研究自然通风策略与人员对室内空气质量的影响，本文对武汉某高校宿舍内 PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 浓度实施长期监测，分析不同自然通风策略、室内人员情况对宿舍内 PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 浓度的影响，为改善高校宿舍的室内空气质量提供一定的方法和依据。

## 1 测试方法

### 1.1 测试对象

本文选取武汉某高校一四人间男生宿舍为测试房间，测试房间朝南，位于第四层（共六层）。如图 1 所示，该宿舍在休息学习区有一扇通往走廊的宿舍门，通风面积为 1.716m<sup>2</sup>（1.95m × 0.88m），其上方的平开窗处于常闭状态；休息学习区与阳台盥洗区之间有一扇推拉门，通风面积为 1.56m<sup>2</sup>（1.95m × 0.80m）；阳台盥洗区的外窗为推拉窗，处于常开状态；如厕区的平开门处于常闭状态，外窗为平开窗，处于常开状态。测试时间为 2019 年 9 月至 2019 年 12 月，监测参数为室内外 PM<sub>2.5</sub> 浓度与 CO<sub>2</sub> 浓度。



(a) 平面图



(b) 实景图

图 1 测试房间

Fig.1 The test room

### 1.2 测试仪器

本次监测的参数为 PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 及风速，所用仪器如表 1 所示。

表 1 测试仪器相关参数

Table 1 Parameters of test instrument

仪器型号	监测参数	量程	测量精度
美国 TSI 公司 DUSTTRAK II 8532 型 颗粒物监测仪	PM <sub>2.5</sub>	0.001~150mg/m <sup>3</sup> (粒径范围为 0.1~10μm)	分辨率为 ±0.1%读数、 0.001mg/m <sup>3</sup> 取 大值 ±(75ppm+3% 测量值),
德国 Testo 公司 480 型多功能测 量仪 (搭配 IAQ 室内空气质量 探头)	CO <sub>2</sub>	0~+5000ppm  5001~+10000ppm	分辨率为 1ppm ±(150ppm+5% 测量值), 分辨率为 1ppm ±(0.1m/s+5% 测量值),
德国 Testo 公司 405i 型无线迷 你热线式风速 测量仪	风速	0~2m/s  2~15m/s	分辨率为 0.01m/s ±(0.3m/s+5% 测量值), 分辨率为 0.01m/s

### 1.3 测量方案

为了分析室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度及 CO<sub>2</sub> 浓度受自然通风策略及人员的影响程度，本文根据宿舍的实际构造，分析可能的自然通风策略，针对不同的测试

参数制定了不同的测试方案, 具体如下:

1.3.1 考察影响室内 PM2.5 浓度因素的测试方案

表 2 影响室内 PM2.5 浓度的四种自然通风策略

Table 2 Four natural ventilation strategies impacting indoor PM2.5 concentration

工况	描述
不通风	宿舍门、与外窗连通的推拉门均关闭
走廊单侧通风	宿舍门全开, 与外窗连通的推拉门关
室外单侧通风	宿舍门关, 与外窗连通的推拉门全开
对侧通风	宿舍门、与外窗连通的推拉门均全开

由于阳台的外窗处于常开状态且阳台面积较小, 因此与阳台通风可近似等同于与室外通风。由此得到如表 2 所示的四种自然通风策略, 人工记录

表 3 所示的七种工况, 测量房间处于不同通风程度的单侧自然通风情景下室内 CO<sub>2</sub> 浓度变化。测量时段为 22:00 至次日 9:30, 时间步长为 10 秒, 室内人数为 4 人。在 22:00 时将推拉门置于全开状态, 室内 4 人处于极轻活动强度; 23:00 时将推

表 3 影响室内 CO<sub>2</sub> 浓度的七种自然通风策略

Table 3 Seven natural ventilation strategies impacting indoor CO<sub>2</sub> concentration

工况	0cm	2cm	5cm	10cm	20cm	40cm	80cm
对应的通风面积	0m <sup>2</sup>	0.039m <sup>2</sup>	0.0975m <sup>2</sup>	0.195m <sup>2</sup>	0.39m <sup>2</sup>	0.78m <sup>2</sup>	1.56m <sup>2</sup>

(2) 不同室内人员数量时室内 CO<sub>2</sub> 浓度的测量。本测量在日间和夜间分别进行, 分析日间人员数量对室内 CO<sub>2</sub> 浓度的影响时, 测量时段为 2019 年 11 月 11 日至 2019 年 11 月 18 日, 测量步长为 60 秒, 宿舍门处于关闭状态, 与外窗连通的推拉门开度为 40cm (半开), 人工记录室内人数变化。由于室内外空气交换充分, 人数变化较快, 室内 CO<sub>2</sub> 浓度达到稳定值需要较长时间, 因此通过计算室内 CO<sub>2</sub> 浓度的变化率来分析人数对宿舍内 CO<sub>2</sub> 浓度的影响。任意时刻的室内 CO<sub>2</sub> 浓度变化率由式 (1) 求取:

$$G = \frac{3600(y_2 - y_1)}{\tau} \quad (1)$$

式中,  $G$  代表某一时刻的 CO<sub>2</sub> 浓度变化率, ppm/h;  $y_1$  为该时刻 CO<sub>2</sub> 的浓度, ppm;  $y_2$  为下一时刻 CO<sub>2</sub> 的浓度, ppm;  $\tau$  为测量步长, 此处为 60s。

室内人数变化。测量室内 PM2.5 浓度时, 将仪器置于如图 1 所示 (黑色圆点) 的两个测点, 测点高度均为 1.1m, 取两个测点的平均值代表室内 PM2.5 浓度。测量室外 PM2.5 浓度时, 手持仪器伸出阳台盥洗区的外窗, 测量两次取平均值代表室外 PM2.5 浓度。

1.3.2 考察影响室内 CO<sub>2</sub> 浓度因素的测试方案

连续测量室内 CO<sub>2</sub> 浓度时, 将探头放置于该区域中心 (图 1 所示的黑色三角形), 距地面 1.1m 处, 代表室内 CO<sub>2</sub> 浓度, 分别测量不同通风策略及人员工况的室内 CO<sub>2</sub> 浓度。

(1) 不同通风策略时室内 CO<sub>2</sub> 浓度的测量。宿舍门通常处于关闭状态且外窗处于常开状态, 因此针对与外窗连通的推拉门的开启程度进行研究。将推拉门置于如

拉门置于不同的设定工况后, 室内 4 人上床入睡; 次日 7:30, 4 人起床, 将推拉门置于全开状态, 使室内充分通风, 4 人洗漱完毕后离开宿舍。每种工况测量两次, 选择扰动较小的一组进行分析。

以上为室内 CO<sub>2</sub> 浓度变化率, 去掉负值后可得到室内 CO<sub>2</sub> 浓度增长率, 下文仅对增长率进行分析。为了与增长率形成对照, 需求出室内的 CO<sub>2</sub> 发生率, 即单位时间内室内人员 CO<sub>2</sub> 的呼出量。因此需要分别测量不同人数工况下, 室内 CO<sub>2</sub> 浓度的变化与门窗缝隙的渗透风量, 由式 (2) 计算得到室内 CO<sub>2</sub> 的发生率:

$$x = \frac{\frac{1}{2} \sum s_i v_i \tau \left( \frac{y_1 + y_2}{2} y_w \right) + (y_2 - y_1) V_f}{\tau} \quad (2)$$

式中,  $x$  代表室内 CO<sub>2</sub> 的发生率, m<sup>3</sup>/h;  $s_i$  为各个缝隙的面积, m<sup>2</sup>;  $v_i$  为各个缝隙处的平均风速, m/s;  $\tau$  为表测量时间, 此处为 3600s;  $y_1$  为室内 CO<sub>2</sub> 浓度起始值, ppm;  $y_2$  为室内 CO<sub>2</sub> 浓度结束值, ppm;  $y_w$  为室外 CO<sub>2</sub> 浓度, 该值变化较小, 可当作定值, ppm;  $V_f$  为除去家具等物体后的房间体积,

约为 48m<sup>3</sup>。

分析夜间人员数量对 CO<sub>2</sub> 浓度的影响时,室内处于不通风状态。室内人员的作息时间与上述相同,测量不同人数工况下夜间室内 CO<sub>2</sub> 浓度的变化,每种工况测量两次,选择外界干扰较小的一组分析。

## 2 测试结果及分析

### 2.1 自然通风策略对室内 PM2.5 浓度的影响

不同自然通风策略时室内外 PM2.5 浓度的关系如图 2 所示。不通风、走廊单侧通风、室外单侧通风和对侧通风四种策略的线性回归方程决定系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.9431、0.9765、0.9813、0.9971。可看出, R<sup>2</sup> 随着与室外通风程度的增加而增加,在对侧通风时已非常接近于 1,说明室内 PM2.5 浓度几乎只受室外影响。不通风场景对应的曲线斜率最小(0.7084),说明四种策略中不通风时室内 PM2.5 浓度最低,约为室外的 70%。与走廊单侧通风时,曲线斜率有所提高(0.8237)。室外单侧和对侧通风时,曲线斜率相似(分别为 0.9117 和 0.9152)且显著高于其他两种通风策略,表明这两种通风策略会大幅提高室内 PM2.5 浓度,达到室外浓度的 90%以上。以上分析得出,只要存在与室外通风的情况,室内 PM2.5 浓度就会接近但略低于室外。

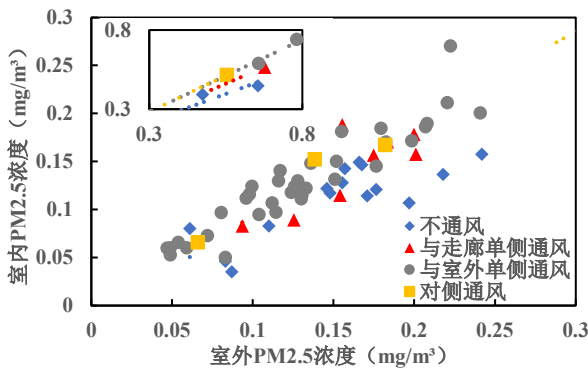


图 2 四种自然通风策略下室内外 PM2.5 浓度的关系

Fig.2 The relationship between indoor and outdoor PM2.5 concentrations under four natural ventilation strategies

由于该宿舍无诸如烹饪、吸烟等室内 PM2.5 源,因此室内的 PM2.5 浓度主要受室外影响。图 2 表明,室外 PM2.5 浓度主要集中在 0.25mg/m<sup>3</sup> 以下,这是由于该宿舍楼栋附近无工业排放源且机动车较少。另外测试房间位于夏热冬冷地区长江流域附

近,测试期间湿度较大,室外空气质量较好,同时室内无污染源,这导致不同的自然通风策略下室内 PM2.5 浓度差异较小。若宿舍有人吸烟时,室内 PM2.5 浓度可以达到 1.28mg/m<sup>3</sup>,烹饪则会使室内 PM2.5 浓度超过 3mg/m<sup>3</sup>,打开门窗彻底通风可以使室内 PM2.5 浓度大幅度降低<sup>[12]</sup>。

### 2.2 人员对室内 PM2.5 浓度的影响

不同人数工况下室内外 PM2.5 浓度关系如图 3 所示。线性拟合得到 1 - 4 人工况下曲线的斜率分别为: 0.9019、0.7858、0.8219、0.8901,决定系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.8192、0.9873、0.9527、0.9360。其中工况为 1 人时的 R<sup>2</sup> 较小,拟合程度显著低于其他工况,这可能是由于该类别数据较少导致的,因此在分析中不纳入考虑。其余工况的分析结果表明,随着人数的增加,斜率有所增加,而决定系数 R<sup>2</sup> 不断减小。意味着室外 PM2.5 浓度相同时,人数越多,室内 PM2.5 浓度越大,但室内外 PM2.5 浓度的线性相关性降低,其他因素影响的占比增加。

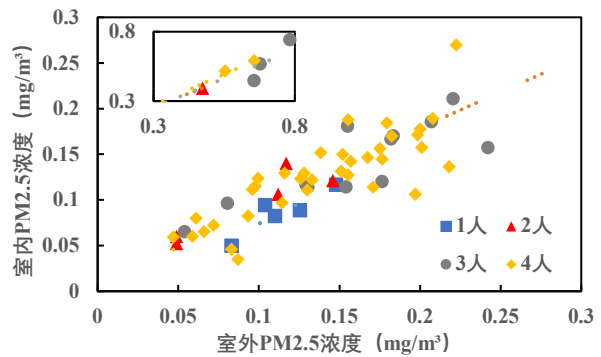


图 3 不同人数下室内外 PM2.5 浓度的关系

Fig.3 The relationship between indoor and outdoor PM2.5 concentrations under different number of people

室内人员诸如走动、穿衣服、扫地等行为会将地面、衣服上粘附的细微颗粒物扬起,称为二次扬尘,一个成年人的居家活动会使室内 PM2.5 浓度升高约 33%<sup>[13]</sup>。人数增加会引起二次扬尘增加,进而导致室内 PM2.5 浓度上升。此外,人体在呼吸过程中将部分 PM2.5 颗粒吸入体内,在住宅中人体的平均吸入量为 0.5018 μg/min<sup>[14]</sup>,但因吸入量很少,对室内 PM2.5 浓度影响较小。

对比分析以上结果可知,自然通风策略对高校宿舍室内 PM2.5 浓度的影响比人员数量更为显著,且室外空气品质依然是影响室内 PM2.5 浓度的最主要因素。

### 2.3 自然通风策略对室内 CO<sub>2</sub> 浓度的影响

与外窗连通的推拉门在不同开度工况下室内 CO<sub>2</sub> 浓度随时间的变化如图 4 所示。除了 0cm (全关) 的工况下 CO<sub>2</sub> 浓度达到 2000ppm 外, 其余工况的 CO<sub>2</sub> 浓度均满足日平均值小于 1000ppm 的要求<sup>[15]</sup>。23:00 前, 各工况对应的曲线波动幅度均较小; 23:00 后, 推拉门的开度变为设定工况, 由于室内 4 人依然处于极轻活动强度, 因此除 80cm 工况 (推拉门开度未改变, 为全开) 曲线的趋势无较大变化外, 其他工况的曲线均有明显升高; 室内 4 人进入睡眠状态后, CO<sub>2</sub> 呼出量有所下降, 因此 0cm 工况的曲线上升放缓, 其他曲线均有所下降; 较长时间后, 除 0cm 工况时室内 CO<sub>2</sub> 浓度还在缓慢增长, 其他工况均已达到稳定状态; 次日 7:30 室内 4 人起床, 由睡眠状态转变为极轻活动强度, 各曲线均有所升高; 起床洗漱完毕后 4 人离开宿舍且推拉门处于全开状态, 室内 CO<sub>2</sub> 浓度骤降。

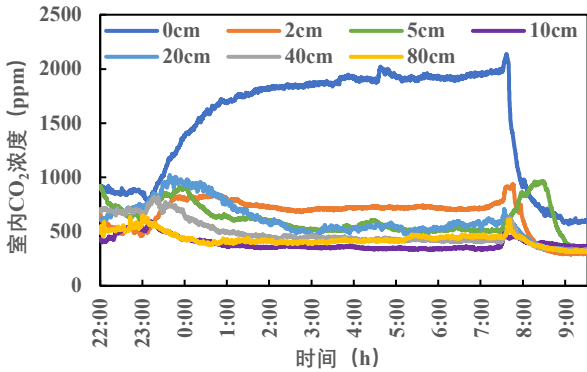


图 4 不同拉门开度下室内 CO<sub>2</sub> 浓度随时间的变化

Fig.4 Changes of indoor CO<sub>2</sub> concentration with time under different sliding door openings

将各工况下的室内 CO<sub>2</sub> 浓度分解为三个阶段的平均值进行分析: 起始值 (推拉门全开、室内 4 人均处于极轻活动强度时的 CO<sub>2</sub> 浓度, 取 22:40-22:50 间的平均值), 稳定值 (推拉门置于测试工况、室内 4 人均处于睡眠状态时的 CO<sub>2</sub> 浓度, 取次日 7:00-7:10 间的平均值), 末尾值 (推拉门全开、室内无人时的 CO<sub>2</sub> 浓度, 取次日 9:20-9:30 间平均值)。如果稳定值大于起始值, 说明通风情况较差。末尾值用作参考对照, 体现了当天室外 CO<sub>2</sub> 浓度水平。由图 5 可知, 只有在 0cm 和 2cm 工况下稳定值大于起始值, 说明推拉门开度小于 2cm 时通风较差。在推拉门开度大于 2cm 时最终效果

是相同的, 这是因为夜间通风时间足够长。由图 4 可知, 推拉门开度越大, CO<sub>2</sub> 浓度达到稳定值的速度越快, 说明通风效率越高。此外, 在次日 7:30 推拉门全开充分通风时, 降到最低值的时间都约为一个半小时, 且前半小时下降最快。综上建议, 当宿舍人员都在时, 应保持推拉门开度大于 2cm (通风面积为 0.039m<sup>2</sup>), 以保证室内 CO<sub>2</sub> 浓度处于较低水平。

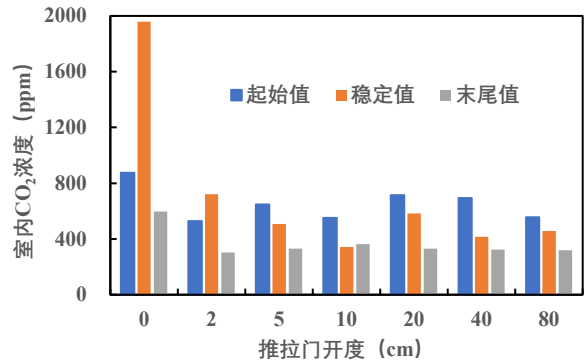


图 5 不同拉门开度下室内 CO<sub>2</sub> 浓度的各项参数

Fig.5 Parameters of indoor CO<sub>2</sub> concentration under different sliding door openings

### 2.4 人员对室内 CO<sub>2</sub> 浓度的影响

首先分析日间人员对室内 CO<sub>2</sub> 浓度的影响。连续一周测量室内 CO<sub>2</sub> 浓度后, 选取每天 8:00-23:00 中的数据 (大部分时间室内人员处于极轻活动强度), 运用式 (1) 求取不同室内人数场景下的 CO<sub>2</sub> 浓度增长率。为了淡化室外风速等无关变量的干扰, 将所求得的速率求平均值, 并利用式 (2) 求取人处于极轻活动强度的 CO<sub>2</sub> 发生率对比结果如图 6 所示。随着人数的增加, 室内 CO<sub>2</sub> 浓度的增长率与发生率均在增加。室内仅有 1 人时室内 CO<sub>2</sub> 浓度的增长率与发生率均接近 400 ppm/h, 但室内有 4 人时增长率仅约为 700ppm/h, 发生率则高达 1500ppm/h。该宿舍每增加 1 人, 室内 CO<sub>2</sub> 浓度的增长率就要增加约 116ppm/h, 发生率增加约 375ppm/h。

由图 6 可看出, 随着人数增加, 室内 CO<sub>2</sub> 增长率与发生率的差值越来越大, 原因是随着室内 CO<sub>2</sub> 浓度增高, 室内外 CO<sub>2</sub> 浓度差增大导致 CO<sub>2</sub> 向室外的扩散率增大, 直到与室内 CO<sub>2</sub> 发生率达到平衡状态, 室内 CO<sub>2</sub> 浓度稳定。在测量期间保持单侧室外自然通风的情况下 (通风面积为 0.78m<sup>2</sup>), 大部

分时间室内 CO<sub>2</sub> 浓度均在 1000ppm 以下，以满足室内 CO<sub>2</sub> 浓度的要求。增长率与发生率的差值代表了由于自然通风而稀释的 CO<sub>2</sub> 浓度，差值越大，说明通风效率越高。

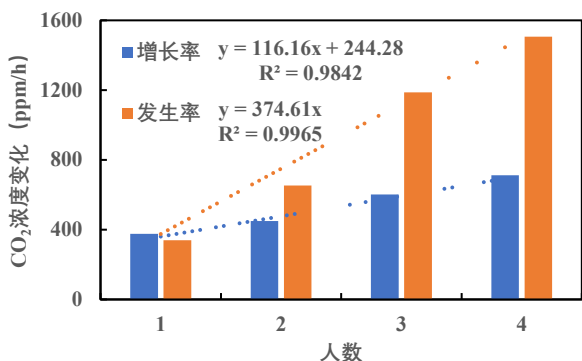


图 6 不同人数下室内 CO<sub>2</sub> 浓度变化与发生率变化

Fig.6 Changes of indoor CO<sub>2</sub> concentration and incidence under different number of people

夜间人员对室内 CO<sub>2</sub> 浓度的具体影响如

图 7 所示不通风时所有工况夜间室内 CO<sub>2</sub> 浓度均超过了 1000ppm。随着人数增加，室内 CO<sub>2</sub> 浓度趋于稳定时的数值也在增加。4 人工况曲线前半部分几乎与 3 人工况重叠，原因可能是由于 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致扩散速度加快。在室内人员进入睡眠状态后，室内 CO<sub>2</sub> 浓度呈现稳定的规律性差异。取次日 7:00 至 7:10 CO<sub>2</sub> 浓度的平均值代表稳定值，1~4 人工况的稳定值分别为 1116ppm、1612ppm、1935ppm、2118ppm，呈对数增长趋势。

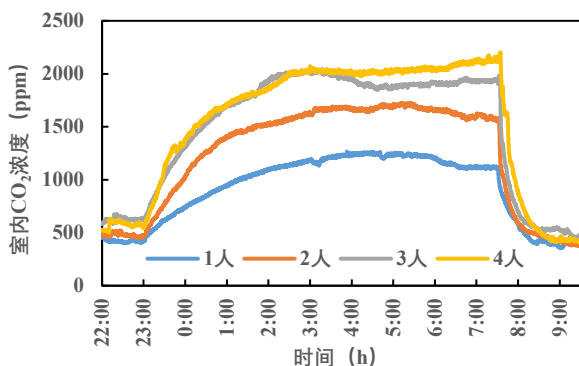


图 7 夜间不同人数下室内 CO<sub>2</sub> 浓度的变化

Fig.7 Changes of indoor CO<sub>2</sub> concentration under different number of people at night

由

图 7 可看出，随着时间的推移，各条曲线的上升趋势逐渐平缓。一方面是由于 CO<sub>2</sub> 向室外的渗透速

率不断增加；另一方面，人员的活动状态也由极轻活动强度进入睡眠状态。本文通过实测并利用式 (2) 计算得到，在极轻活动强度下，CO<sub>2</sub> 的发生量为 0.018m<sup>3</sup>/(h·人)，这与其他文献中推荐的数值 0.017m<sup>3</sup>/(h·人)<sup>[16]</sup> 非常接近。室内有 4 人时 CO<sub>2</sub> 浓度略高于 2000ppm，但北京某 4 人和 6 人宿舍夜间的室内 CO<sub>2</sub> 浓度可分别达到 4000ppm 与 5000ppm<sup>[17]</sup>，这主要是由于北方地区宿舍建筑围护结构的气密性要好于南方，因此空气渗透速率更小。

### 3 结论

本文通过对武汉某高校男生宿舍内 PM<sub>2.5</sub>、CO<sub>2</sub> 浓度的长期监测，分析了不同的自然通风策略与人员对室内空气品质的影响，结论如下：

(1) 室内无污染源时，室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度随着与室外通风程度的增加而变大，且受室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响程度也在变大。不通风时，室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度约为室外的 70%；在对侧通风时，室内 PM<sub>2.5</sub> 可达室外的 90% 以上，且室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度几乎是其唯一影响因素。

(2) 人员数量对室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响小于自然通风策略。人数的增加会导致室内 PM<sub>2.5</sub> 浓度变大，同时减小室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度对室内的影响程度。

(3) 随着通风面积的增加，通风效率也在提高。不通风时夜间室内 CO<sub>2</sub> 浓度会超过 2000ppm，但只要将与外窗连通的推拉门打开一个 2cm 的缝隙（通风面积为 0.039m<sup>2</sup>），室内 CO<sub>2</sub> 浓度就会显著降低。夜间在推拉门开度大于 5cm（通风面积为 0.0975m<sup>2</sup>）时所获得的最终通风效果是一致的。

(4) 人员数量的增加与活动强度的提高均会导致室内 CO<sub>2</sub> 浓度增加，在极轻活动强度下，本文实测 CO<sub>2</sub> 的发生量为 0.018m<sup>3</sup>/(h·人)。

### 参考文献：

[1] B Chenari, J Dias Carrilho, M Gameiro da Silva. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: a review[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2016,(59):1426-1447.  
 [2] Yousef Al Horr, Mohammed Arif, Amit Kaushik, et al. Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature[J]. Building and

- Environment, 2016,(105):369-389.
- [3] 2019 年全国教育事业发展统计公报[1][EB/OL]. [http://www.moe.gov.cn/jyb\\_sjzl/sjzl\\_fztjgb/202005/t20200520\\_456751.html](http://www.moe.gov.cn/jyb_sjzl/sjzl_fztjgb/202005/t20200520_456751.html), 2020-05-29.
- [4] 陈翠, 陈小明, 殷维, 等. 庭院通风对湘北农宅室内微气候的影响[J]. 制冷与空调, 2016, 30(3): 300-308.
- [5] Tobias Schulze, Ursula Eicker. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings[J]. Energy and Buildings, 2013, (56): 221-232.
- [6] W Richter, J Seifert, R Gritzki, et al. Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht[J]. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003.
- [7] 骆伟, 刘荣华, 邱汉峰. 自然通风作用下室内甲醛浓度分布数值模拟分析[J]. 制冷与空调, 2013, 27(5): 504-508.
- [8] S M Dutton, D Banks, S L Brunswick, et al. Health and economic implications of natural ventilation in California offices[J]. Build Environment, 2013, (67): 34-45.
- [9] J Qian, J Peccia, A R Ferro. Walking-induced particle resuspension in indoor environments[J]. Atmos. Environ., 2014, (89): 464-481.
- [10] S Feng, D Gao, F Liao, et al. The health effects of ambient PM<sub>2.5</sub> and potential mechanisms[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, (128): 67-74.
- [11] D G Shendell, R Prill, W J Fisk, et al. Associations between classroom CO<sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho[J]. Indoor Air, 2004, 14(5): 333-341.
- [12] Zhihua Zhou, Yurong Liu, Jianjuan Yuan, et al. Indoor PM<sub>2.5</sub> concentrations in residential buildings during a severely polluted winter: A case study in Tianjin, China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, (64): 372-381.
- [13] 张吉. 居住建筑室内 PM<sub>2.5</sub> 来源及其影响因素的研究 [C]. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集, 2017: 1292-1299.
- [14] 付高平. 成都市微细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 形成机理及对人类健康危害研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 77-79.
- [15] GB/T 18883-2002, 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国质检出版社, 2003.
- [16] 朱颖心. 建筑环境学 (第 4 版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [17] Zhangping Lei, Chuanping Liu, Li Wang, et al. Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter[J]. Building and Environment, 2017, (125): 240-247.