

不同通风形式下住宅内细颗粒物质量浓度及室内暴露量的模拟及比较*

清华大学 施珊珊[☆] 纪文静 赵彬[△]

摘要 大气中的细颗粒物(PM_{2.5})可穿透围护结构进入室内环境中,和室内产生的细颗粒物一起作用,导致人体在室内暴露在细颗粒物中。不同的住宅通风方式会导致不同的室内细颗粒物质量浓度水平和室内暴露量。模拟计算了北京地区在过渡季、夏季、春季典型工况下,采用自然通风和机械通风的住宅的室内细颗粒物浓度水平和室内暴露量,并计算了相关通风形式所对应的能源消耗量。结果表明,对于较密闭的住宅,采用自然通风且室内开启空气净化器时,与采用机械通风的住宅均可获得较低的细颗粒物室内暴露量。在所研究的情况下,自然通风的能源消耗量略低于机械通风。

关键词 细颗粒物 室内环境 暴露 自然通风 机械通风

Comparison of indoor concentration of and exposure to PM_{2.5} between residences with different ventilation modes based on simulation

By Shi Shanshan[☆], Ji Wenjing and Zhao Bin

Abstract Atmospheric PM_{2.5} can penetrate into indoor environment through building envelopes. It can lead to indoor exposure of human beings to PM_{2.5} combined with indoor PM_{2.5} sources. Different ventilation modes result in different PM_{2.5} indoor concentrations and exposure. Simulates and calculates the PM_{2.5} indoor concentrations and exposure of residences with natural ventilation and mechanical ventilation in transient seasons, summer and winter as well as the corresponding energy consumption. The results show that residence of natural ventilation with an air cleaner and the residence of mechanical ventilation corresponded to relative lower indoor exposure to PM_{2.5}. The energy consumption of natural ventilation is little smaller than that of mechanical ventilation.

Keywords PM_{2.5}, indoor environment, exposure, natural ventilation, mechanical ventilation

★ Tsinghua University, Beijing, China

0 引言

随着人口的增加,能源消耗的增长,我国大气中细颗粒物(PM_{2.5},空气动力学直径 $d_a < 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物)的污染问题日益严峻。大气中的细颗粒物可以穿透建筑的围护结构进入到室内环境中,同时室内的烹饪、抽烟及部分人体活动也会产生一定量的细颗粒物。因此,无论是在室外环境还是在室内环境,人体无时无刻不暴露在细颗粒物中。人体对细颗粒物的暴露会引起一系列的健康危害,如短期暴露会引起下呼吸道疾病、哮喘加重以及咳嗽等

症状^[1],长期暴露会增加人群因心血管疾病而造成的死亡率^[2]。

在相同的细颗粒物浓度下,不同的住宅通风形式会导致不同的室内细颗粒物污染水平。西方发达国家的住宅多采用机械通风的形式,室外空气通过风机进入室内,通风通路上安装有过滤装置,对

[☆] 施珊珊,女,1989年6月生,在读博士研究生

[△] 赵彬(通信作者)

100084 北京清华大学建筑技术科学系
(010) 62779995

E-mail: binzhao@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2013-09-06

修回日期:2013-09-21

* 国家自然科学基金资助项目(编号:51078216)

细颗粒物具有一定的过滤效果。而我国大部分的住宅采用的是自然通风的形式。居民根据室内外的温湿度自行决定开、关窗时间。关窗时,大气中的细颗粒物通过门、窗等缝隙进入室内,此过程大气中的细颗粒物由于在门窗缝隙内沉积造成一定的损失;开窗时,大气中的细颗粒物直接进入室内,此过程不存在损失。

在机械通风形式下,风机 24 h 开启,有较大的能源消耗量。随着大气污染问题的日益加重,国内越来越多的家庭在自然通风的形式下,选择在家庭内放置空气净化器,对室内空气进行循环净化,空气净化器的运行也消耗了能源。本文计

$$V \frac{dC}{dt} = Q_v \eta_1 C_o - Q_v C + Q_n P_p C_o - Q_n C - Q_c \eta_2 C - v_d A C \quad (1)$$

式中 V 为住宅体积, m^3 ; C 为室内细颗粒物的质量浓度, $\mu g/m^3$; t 为时间, h ; Q_v 为机械通风量, m^3/h ; η_1 为机械通风系统中过滤装置对细颗粒物的过滤效率; C_o 为大气中细颗粒物质量浓度, $\mu g/m^3$; Q_n 为自然通风量, m^3/h ; P_p 为细颗粒物的穿透系数,关窗时 $P_p = 0.8$,开窗时 $P_p = 1$ ^[3]; Q_c 为空气净化器风量, m^3/h ; η_2 为空气净化器对细颗粒物的一次过滤效率; v_d 为颗粒物的沉积速度,对于细颗粒物而言,一般室内的颗粒物沉积率 $K = v_d A / V = 0.09 h^{-1}$ ^[4-5]; A 为住宅内表面积, m^2 。

式(1)等号右侧第 1,2 项表示机械通风引起的室内细颗粒物的浓度变化;第 3,4 项表示自然通风引起的室内细颗粒物的浓度变化;第 5 项表示室内空气净化器运行引起的室内细颗粒物的浓度变化;第 6 项表示颗粒物沉积引起的室内细颗粒物的浓度变化。

1.2 计算工况设计

一般而言,室外细颗粒物质量浓度冬季最高、过渡季其次、夏季最低。本文将美国领事馆 2012 年 7 月 31 日,10 月 24 日及 2013 年 1 月 11 日这 3 天的细颗粒物质量浓度 24 h 报告值^①分别作为夏季、过渡季及冬季 3 种典型工况下的大气质量浓度输入值,如图 1 所示。

本文建立了北京市一户三口之家的典型住宅模型,利用 MATLAB(R2010a)软件来计算不同工况下的细颗粒物室内质量浓度。根据 2010 年北京市城镇居民人均居住面积^[6],该户的住宅面积为 $65 m^2$,体积为 $182 m^3$,其中厨房面积为 $6 m^2$ 。

算了机械通风和自然通风 2 种通风形式下,过渡季、夏季及冬季 3 种典型工况下不同住宅内的细颗粒物浓度水平以及对应的室内暴露情况,并计算了 2 种通风形式风机所消耗的能源。希望对不同大气污染水平下适宜的住宅通风形式的选择有所指导。

1 方法

1.1 数学模型

室内的细颗粒物遵循质量守恒的原则,同时本文还考虑颗粒物的动力学特性,包括穿透(penetration)和沉积(deposition),具体的数学表达式如下:

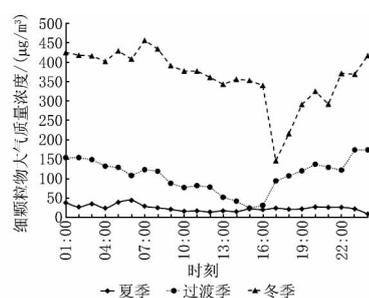


图 1 不同季节细颗粒物大气质量浓度输入值

本文中烹饪是细颗粒物唯一的室内散发源,源强为 $1.59 mg/min$ ^[7]。工作日(周一~周五)为早餐和晚餐 2 个烹饪时间段,分别是 07:00—07:20 及 18:00—18:40。休息日(周六、周日)为早餐、午餐和晚餐 3 个烹饪时间段,分别是 07:00—07:20, 11:00—11:30 及 18:00—18:40。为了模拟更加真实的细颗粒物的室内浓度水平,当有烹饪源存在时,住宅分为厨房和非厨房 2 个计算区域。烹饪时,厨房区域开启抽油烟机,抽油烟机风量为 $15 m^3/min$,向室外排气。当没有烹饪源存在时,整个住宅被当作单区模型。

1.2.1 机械通风

部分西方发达国家的住宅以及我国新建的高档住宅多采用机械通风的形式。在本文中,设定新风机 24 h 开启,无回风,住宅平均换气次数为 $0.5 h^{-1}$ 。风机内装有过滤装置,本文中考虑了 2 种过滤效率不同的机械通风系统,其过滤效率分别与 ASHRAE 40%,ASHRAE 85%商业过滤器相同,

① <http://twitter.com/beijingair>

对细颗粒物的一次过滤效率分别为 25% 和 50%^[5]。

1.2.2 自然通风

为满足建筑节能的要求,新建建筑密闭性逐渐增强,渗风换气次数小于老式的居住建筑。为了考虑不同密闭性的住宅在不同换气形式下细颗粒物浓度水平及室内暴露量,考虑了平均渗风换气次数为 0.2, 0.3, 0.4 h⁻¹ 的 3 种密闭性不同的住宅。开窗换气次数统一设定为 8 h⁻¹。

段晓丽对我国各地区人们开关窗的行为模式进行了大规模的调查^[8],其中对华北地区开关窗行为模式的调查结果作为本文模拟时的输入参数,如表 1 所示。

表 1 实验工况

	过渡季	夏季	冬季
开窗时间/(min/d)	334	741	138

根据一般居民的日常生活习惯,对于不同季节的工作日、休息日设置了不同的开关窗时间段。过渡季和冬季,烹饪时开启窗户;夏季考虑到白天室外温度较高,日晒严重,故开窗时间安排在夜间至凌晨。各个季节的住宅开关窗时间安排如图 2 所示。

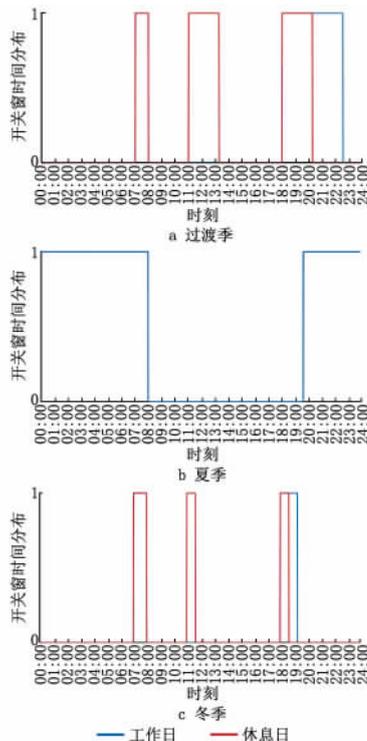


图 2 各季节住宅开关窗时间

随着大气污染的日益加重,越来越多的家庭选择使用室内空气净化器,因此,计算时也考虑了空

气净化器对室内细颗粒物质量浓度的影响。本文通过市场调研选取了某品牌的空气净化器产品,风量为 15 m³/min,功率为 40 W。相关测试表明,一般净化器对细颗粒物的一次过滤效率为 40%~50%,循环过滤效率可以达到 90%以上,故此处认为该净化器对细颗粒物的一次过滤效率为 50%。住宅中有人时净化器开启。

2 计算结果及分析

2.1 室内细颗粒物质量浓度

过渡季室内细颗粒物质量浓度计算结果如图 3 所示。

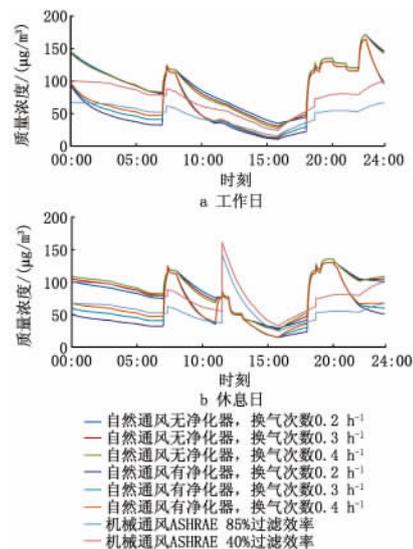


图 3 过渡季室内细颗粒物质量浓度

由图 3 可以看出,在过渡季时,当住宅为自然通风且室内没有空气净化器工作时,室内细颗粒物的质量浓度最高;当住宅为自然通风且室内有空气净化器工作时,室内细颗粒物的质量浓度其次;当住宅为机械通风,且采用与 ASHRAE 85% 等效的过滤装置时,室内细颗粒物的质量浓度最低。而在相同的通风形式下,不同密闭性的建筑类型对室内细颗粒物的质量浓度影响不大。当室内没有烹饪源时,室内细颗粒物质量浓度的变化趋势与大气中细颗粒物质量浓度的变化趋势相同。室内细颗粒物质量浓度的较高值均出现在室内存在烹饪源的时间段。

夏季室内细颗粒物的质量浓度计算结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出,在夏季时,当无室内烹饪源作用时,自然通风且室内没有空气净化器工作时的

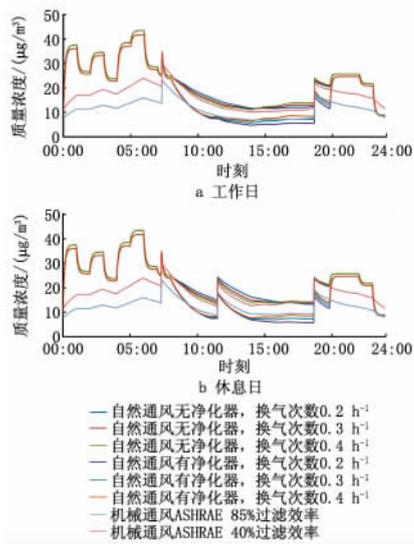


图4 夏季室内细颗粒物质量浓度

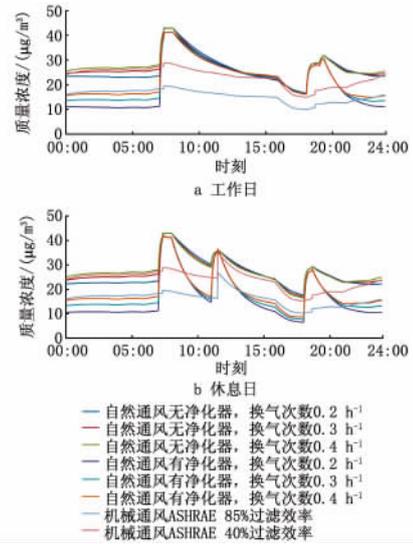


图5 冬季室内细颗粒物质量浓度

细颗粒物的质量浓度,与自然通风且室内有空气净化器工作时的质量浓度基本相当。当有室内烹饪源作用时,自然通风且室内有空气净化器工作的住宅细颗粒物的质量浓度可较快地恢复到一个较低值。当住宅为机械通风,且采用与ASHRAE 85%等效的过滤装置时,室内细颗粒物的质量浓度最低。同样,在相同的通风形式下,不同密闭性的建筑类型对室内细颗粒物的质量浓度影响不大。

冬季室内细颗粒物的质量浓度计算结果如图5所示。

由图5可以看出,在冬季时,无室内烹饪源作用时,当住宅为自然通风且室内没有空气净化器工作时,室内细颗粒物的质量浓度最高;当住宅为机械通风形式时,室内细颗粒物的质量浓度其次;当住宅为自然通风且室内有空气净化器工作时,室内细颗粒物的质量浓度最低。这是因为冬季大气中

细颗粒物的质量浓度较高,室外温度较低,开窗时间短。当门窗密闭时,密闭性较好的建筑对应较小的换气次数,可以减少室外细颗粒物对室内的影响。有室内烹饪源作用时,当住宅为自然通风且室内没有空气净化器工作时,室内细颗粒物的质量浓度最高;当住宅为自然通风且室内有空气净化器工作时,室内细颗粒物的质量浓度其次;当住宅为机械通风形式时,室内细颗粒物的质量浓度最低。这是因为机械通风对应的较大换气量可以尽快排出室内烹饪产生的细颗粒物。

2.2 细颗粒物室内暴露量

本文认为工作日时,居民从18:00到次日08:00在家中,休息日时,居民全天24h在家中。结合模拟计算出来的非厨房区细颗粒物的质量浓度,可以得出居民在各个计算工况下在室内的细颗粒物的暴露量,如表2所示。

	自然通风无净化器, 换气次数 $0.2 h^{-1}$	自然通风无净化器, 换气次数 $0.3 h^{-1}$	自然通风无净化器, 换气次数 $0.4 h^{-1}$	自然通风有净化器, 换气次数 $0.2 h^{-1}$
过渡季工作日	100.52	100.37	100.28	71.39
过渡季休息日	120.48	121.67	122.57	80.54
夏季工作日	22.67	22.77	22.84	21.06
夏季休息日	33.31	32.91	32.69	26.82
冬季工作日	220.81	227.62	232.81	138.86
冬季休息日	384.17	390.04	394.41	240.18
	自然通风有净化器, 换气次数 $0.3 h^{-1}$	自然通风有净化器, 换气次数 $0.4 h^{-1}$	机械通风 ASHRAE 85% 过滤效率	机械通风 ASHRAE 40% 过滤效率
过渡季工作日	74.28	76.61	52.19	72.57
过渡季休息日	85.21	89.09	82.76	112.67
夏季工作日	21.22	21.34	10.78	15.15
夏季休息日	27.30	27.69	17.71	24.72
冬季工作日	151.97	162.74	139.89	197.11
冬季休息日	258.56	273.70	232.59	335.25

由表 2 可以看出,住宅内的细颗粒物暴露量工作日要低于休息日,这是因为休息日有早餐、午餐和晚餐 3 个阶段的烹饪源,且休息日在住宅内的暴露时间要长于工作日。

过渡季工作日,当住宅采用自然通风且室内没有空气净化器工作时,住宅内细颗粒物暴露量最高;当住宅采用自然通风且室内有空气净化器工作时,住宅内细颗粒物暴露量其次;当住宅采用机械通风且采用与 ASHRAE 85% 等效的过滤装置时,住宅内细颗粒物暴露量最低。过渡季休息日,当住宅采用自然通风且室内没有空气净化器工作时,住宅内细颗粒物暴露量最高;当住宅采用自然通风且室内有空气净化器、采用机械通风与 ASHRAE 85% 等效的过滤装置时,住宅内细颗粒物暴露量均相对较低。这是因为休息日时,室内源影响增大,室内空气净化器的作用可以降低室内细颗粒物的质量浓度。

在夏季,当住宅采用自然通风时,室内有无空气净化器工作对住宅内细颗粒物暴露量的影响不大。与上述通风形式相比,当住宅采用机械通风时,住宅内的细颗粒物暴露量显著降低。但由于夏季室内细颗粒物的质量浓度较低,故自然通风和机械通风的住宅内细颗粒物暴露量均保持在较低水平。

冬季各工况下住宅内细颗粒物暴露量的相对大小关系与过渡季基本相同。

2.3 不同通风方式风机耗电量

当住宅采用机械通风方式时,风机 24 h 开启。此处住宅体积为 182 m^3 ,换气次数为 0.5 h^{-1} ,选择市场上带有细颗粒物过滤装置的风量为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 的新风机组,功率为 30 W(此处未考虑不同过滤效率造成的新风机组功率区别),则机械通风全年的耗电量为 $262.8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

当住宅采用自然通风方式时,家中有人时开启所选的空气净化器,功率为 40 W,则空气净化器全年的耗电量为 $248 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。因此,在本文所研究的情况下,自然通风时的耗电量略低于机械通风时的耗电量。

3 结论与展望

建立了一户北京市典型的三口之家的住宅模型,计算了不同工况下、不同通风形式所对应的细颗粒物的质量浓度、室内暴露量以及相关装置耗电量,得出以下结论:

1) 过渡季和冬季时,对于密闭性较好的住宅,采用自然通风并开启室内空气净化器与采用机械通风均能得到较低的细颗粒物室内暴露量。空气净化器耗电量略低于新风机耗电量。但综合考虑其他室内空气污染物,自然通风可以获得更好的室内空气质量。

2) 夏季时,采用自然通风的住宅,无论是否开启室内净化器,细颗粒物室内暴露量基本相同。采用机械通风的住宅细颗粒物室内暴露量较低。但由于夏季室外细颗粒物的质量浓度较低,故无论何种通风形式,均能得到较低的细颗粒物室内暴露量。

本文仅对两种通风方式的风机电耗进行了初步比较,而更全面的能耗比较还涉及到对室内温湿度进行控制需要的能耗分析计算,这部分工作有望在下一步开展。

参考文献:

- [1] Pope C A. Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: biologic mechanisms and who's at risk? [J]. Environmental Health Perspectives, 2000,108(S4):713
- [2] Pope C A, Burnett R T, Thurston G D, et al. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease[J]. Circulation, 2004, 109(1):71-77
- [3] Chen C, Zhao B, Zhou W, et al. A methodology for predicting particle penetration factor through cracks of windows and doors for actual engineering application[J]. Building and Environment, 2012,47(1): 339-348
- [4] Chen C, Zhao B, Weschler C J. Indoor exposure to "outdoor PM10": assessing its influence on the relationship between PM10 and short-term mortality in US cities[J]. Epidemiology, 2012, 23(6): 870-878
- [5] Riley W J, McKone T E, Lai A C, et al. Indoor particulate matter of outdoor origin: importance of size-dependent removal mechanisms [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(2): 200-207
- [6] 北京市统计局.北京市统计年鉴 2011[M].北京:中国统计出版社,2011
- [7] He C, Morawska L, Hitchins J, et al. Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(21):3405-3415
- [8] 段晓丽.暴露参数的研究方法及其在环境健康风险评估中的应用[M].北京:科学出版社,2012