

室内 PM2.5 浓度变化研究

杜涛^{1, 2} 周志华¹ 袁建娟¹

(1. 天津大学, 天津 300072; 2. 天津生态城建设投资有限公司, 天津 300480)

【摘要】中国雾霾天气的频发和 PM2.5 质量浓度的严重超标已引发民众的广泛关注。天津作为受雾霾影响最严重的城市之一, 其恶劣的室外环境已严重影响了人民的日常生活。本文选择天津市具有代表性的住宅建筑, 测试窗户不同密封条件下室内外 PM2.5 质量浓度, 并对其相关性进行研究。结果表明当室内无污染源, 门窗关闭时室内外 PM2.5 质量浓度的相关性在 0.8 以上。且风速越大, 相关性越大。门窗密闭, 不管室外 PM2.5 浓度如何, 室内在无污染和扰动的情况下, 均以沉降为主。所以, 室外污染物浓度高时, 正常的关闭门窗仍然不能是室内达到卫生要求, 需采取净化措施。

【关键词】PM2.5; 浓度变化; 门窗密封程度

0 引言

近年来中国的雾霾天气引起了全世界的关注, PM2.5 是加重雾霾天气污染的罪魁祸首^[1-4], 中国环境保护部发布的《2013 年京津冀、长三角、珠三角等重点区域及直辖市和省会城市空气质量报告》首次对自 2013 年实施环境空气质量新标准的 74 个城市进行了评价, 结果表明 74 个城市细颗粒物 (PM2.5) 年均浓度为 $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 仅拉萨、海口、舟山 3 个城市达二级标准 (年二级标准限值为 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 达标城市比例仅为 4.1%。大量研究表明, PM2.5 质量浓度的变化与人体健康息息相关^[5-9]。

随着人们生活方式的变化, 人们 80-90% 以上的时间都停留在室内, 尤其是老人、小孩和病人停留在室内的时间更长^[10]。因此室内 PM2.5 浓度超标比室外对人体健康的影响更直接。室内 PM2.5 质量浓度的变化与室外颗粒物的渗入、室内污染源和室内人员活动有关^[11]。本文以居住建筑为研究对象, 研究室内无污染源情况下, 室外 PM2.5 浓度对室内的影响。

1 研究方法

1.1 研究对象

研究对象为一 18 层的住宅建筑, 测试地点位于 8 层的住户内。选择一建筑面积为 17.3m^2 、窗洞面积为 3.8m^2 、可开启窗扇面积为 1.085m^2 的北向卧室。本卧室只有一面墙与室外直接接触, 其他三面墙都是

内墙, 窗口朝向正北。与卧室相连接的是起居室, 起居室南侧为窗户。

1.2 测试设备

室内 PM2.5 的数据采集采用美国 TSI 公司生产的型号为 TSI8530 大气粉尘测试仪, 此监测仪采用光散射法, 结合 Mie 散射理论和颗粒物的相关参数来反推颗粒物质量浓度。实验过程中测试仪每 1 分钟采一次样, 每 10min 记录一次数据, 所记录数据是 10min 内测试结果的平均值。

1.3 室外参数

室外 PM2.5 的背景浓度采用距实验地点 500 米处的天津市环保局采样点公开公布的数据。气象资料从天津市官方网站公布的数据下载, 包括风速、风向、温度等气象资料。

2 研究结果

测试期间卧室内无人员活动, 采样仪器放置在离地面高度为 1.2 米, 距离窗户正中央 0.5 米处。为减少实验误差, 选取实验开始后 2 小时和结束前 2 小时之间最有代表性的数据。

2.1 门窗关闭时室内 PM2.5 的变化趋势

关闭门窗, 测试房间和起居室均无 PM2.5 污染源。有效测试数据的时间段为 2014 年 2 月 7 日 21:58 到 2 月 9 日 17:18, 测试期间室外气象参数如表 1 所示, 室内外 PM2.5 质量浓度变化见图 1。

表 1 测试期间室外气象参数

时间	风向	风速 (m/s)	最高气温 (°C)	最低气温 (°C)
2月7日	东北风	3.4-7.9	1	-3
2月8日	东北风	3.4-7.9 (18:00前) 5.5-10.7 (18:00后)	-1	-5
2月9日	北风	5.5-10.7	0	-7

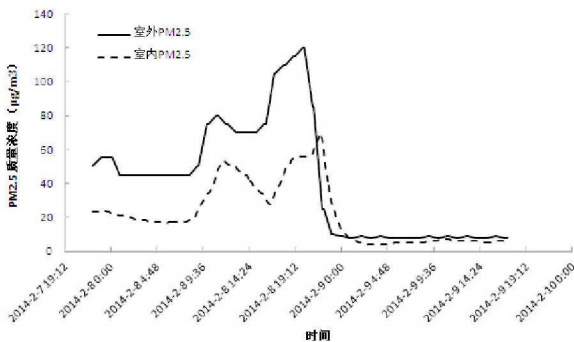


图 1 房间门窗关闭情况下室内外 PM2.5 质量浓度变化图

从图 1 可以看出，在室内无污染源且无人员扰动情况下，室内外 PM2.5 浓度变化趋势一致。只是室内污染物浓度峰值和谷值出现的时间稍慢于室外，而且室内浓度总是比室外低。2月8日 19:00 之前，室外 PM2.5 浓度在 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间波动，室内浓度几乎是室外的一半。2月8日 19:00 后，风速增大，室外 PM2.5 迅速下降至 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。室内颗粒物紧随其后也快速降低至 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下，低于室外浓度。利用 Pearson 函数计算得到室内外 PM2.5 质量浓度变化的相关系数是 0.837663。Pearson 函数 r 是一个范围在 -1.0 到 1.0 之间的无量纲指数，它反映了两个数据集合之间的线性相关程度（负表示两者负相关，正表示两者正相关），数值越大，相关性越强。

从图 1 观察到的另外一个现象是室外 PM2.5 质量浓度达到高峰之前，室内外 PM2.5 质量浓度差较大，而高峰之后质量浓度差迅速变小。PM2.5 浓度降低的主要原因是室外风力加大。风力大，窗户内外的压力就大，通过窗户缝隙的渗透风量随之加大。窗户缝隙内外的压差是颗粒物通过缝隙的净驱动力。Mosley^[12] 等研究表明室内外压差为 2Pa 时，仅有 2% 粒径为 $2 \mu\text{m}$ 的颗粒物和 0.1% 的粒径为 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒物穿过宽度为 0.508mm 的缝隙；压差为 5Pa 时，40% 粒径为 $2 \mu\text{m}$ 和小于 1% 粒径为 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒物穿过缝隙；

当压差为 20Pa 时，90% 粒径为 $2 \mu\text{m}$ 和 9% 粒径为 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒物穿过缝隙。图 1 中室外 PM2.5 质量浓度达到高峰之前室内外温差和风压并不大，颗粒物的净驱动力也不大，所以室内浓度只是室外的一半左右。而室外风速突然增大时，室内外空气压差增大，大量空气进入室内。这时空气的洁净度对室内空气质量的影响较大，短时间内可置换掉室内的原有空气。所以，室外空气质量对室内有着至关重要的影响。特别是在风力大时，影响更大。

2.2 密封门窗时室内 PM2.5 的变化规律

前文提到，窗户缝隙是室外 PM2.5 对室内影响的主要因素。如果门窗密封较好，室内 PM2.5 如何变化？研究表明，室内 PM2.5 的沉降是降低颗粒物浓度的主要方式之一^[13]。布朗扩散是超细颗粒物 ($<0.1 \mu\text{m}$) 最重要的沉降机理^[14]，对于粒径大于 $0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒物，重力沉降是影响其沉降的主要因素^[15]。沉降率可以表征颗粒物在某一物体表面沉降快慢^[16]。本文将门窗用密封条封住，研究室内 PM2.5 质量浓度的变化规律。

沉降实验在与渗透实验同一个卧室内进行，实验数据的选取仍然是取实验开始后 2 小时和实验结束前 2 小时之间的结果。有效数据时间段为 2014 年 2 月 15 日 07:25-17:25，室内外 PM2.5 的质量浓度测试结果如图 2 所示。

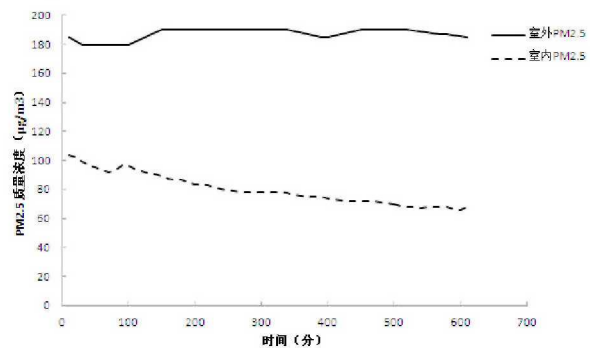


图 2 房间密闭情况下室内外 PM2.5 质量浓度变化图

从图 2 可以看出，这段时间室外 PM2.5 质量浓度在 $185 \sim 190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间变动。室内开始时是 $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，随着时间的推移，浓度缓慢下降，10 个小时由 $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 变化到 $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。设 PM2.5 质量浓度随时间变化的关系式为：

$$C = -at + b \quad (1)$$

式中 t ——时间，min； C ——PM2.5 质量浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ； a ——衰减速率 $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$ ； b 为常数， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由图 2 拟合公式 (1) 为 $C = -0.057t + 97.409$ ，

相关性为 0.9427。对比没密封时室内外 PM_{2.5} 质量浓度的变化趋势,并参考图 1 和图 2 室内外 PM_{2.5} 质量浓度的变化情况,可以认为房间在完全密封、无人员走动和无 PM_{2.5} 污染源时,尽管室外 PM_{2.5} 质量浓度居高不下,但室内浓度却在不断下降。可见,密闭性好的房间在阻止室外污染物进入室内方面具有积极的作用。

3 结论

中国雾霾天气的频发和室外 PM_{2.5} 质量浓度的居高不下,引发了人们的广泛关注,恶劣的室外环境对室内微环境到底产生多大的影响是人们关注的重点。

本文通过研究不同密封条件下在无污染源和人员扰动时室内 PM_{2.5} 的变化规律,得出如下结论。

(1) 当门窗关闭、无污染源时,空气渗透使得室内 PM_{2.5} 质量浓度与室外 PM_{2.5} 质量浓度的变化呈现相似的趋势。风速越大,室内外 PM_{2.5} 浓度相关性越大。

(2) 门窗密封时,不管室外 PM_{2.5} 浓度如何变化,室内细颗粒物的运动以沉降为主。

所以,室外空气质量差时,尽量关闭门窗,减少通风。室外空气质量好时,通风可降低室内污染物浓度。

【参考文献】

- [1] Zhi-mei Xiao, Yu-fen Zhang, Sheng-mao Hong, Xiao-hui Bi, Li Jiao, Yin-chang Feng, Yu-qiu Wang. Estimation of the Main Factors Influencing Haze, Based on a Long-term Monitoring Campaign in Hangzhou, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(2011): 873-882.
- [2] Kang, C.M., Lee, H.S., Kang, B.W., Lee, S.K. and Sun woo, Y.. Chemical Characteristics of Acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 38(2004): 4749-4760.
- [3] Deng, X.J., Tie, X.X., Wu, D., Zhou, X.J., Bi, X.Y., Tan, H.B., Li, F. and Jiang, C.L.. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta (PRD) Region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 42(2008): 1424-1435.
- [4] Fu, Q.Y., Zhuang, G.S., Wang, J., Xu, C., Huang, K., Li, J., Hou, B., Lu, T. and Streets, D.G.. Mechanism of formation of the heaviest pollution episode ever recorded in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 42(2008): 2023-2036.
- [5] Dockery D.W., Pope C.A., Xu X.P., et al. An association between air pollution and mortality in six United-States cities [J]. *New England Journal of Medicine*, 24(1993): 753-759.
- [6] Wallace, L.. Correlations of personal exposure to particles with outdoor air measurements: A review of recent studies [J]. *Aerosol Science And Technology*, 32(2000): 15-25.
- [7] Dockery, D.W. and Pope, C.A.. Acute respiratory effects of particulate air pollution [J] *Annual Review of Public Health*, 15(1994): 107-132.
- [8] Seaton, A., MacNee, W., Donaldson, K. and Godden, D.. Particulate air pollution and acute health effects [J]. *The Lancet*, 345(1995): 176-178.
- [9] Costa D.L.. Particulate matter and cardiopulmonary health: A perspective [J]. *Inhalation toxicology*, 12(2000): 35-44.
- [10] Klepeis, N.E., Neilson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., Englemann, W.H.. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants [J]. *Journal Of Exposure Analysis And Environmental Epidemiology*, 11(2001): 231-252.
- [11] Gehin, E., Ramalho, O., Kirchner, S.. Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities [J]. *Atmospheric Environment*, 42(2008): 8341-8352.
- [12] Mosley R.B., Greenwell D.J., et al. Penetration of ambient fine particles into the indoor Environment [J]. *Aerosol Science and Technology*, 34(2001): 127-136.
- [13] Riley W.J., McKone T.E., Lai A.C.K., et al. Indoor particulate matter of outdoor origin: importance of size-dependent removal mechanisms [J]. *Environmental Science and Technology*, 36(2002): 200-207.
- [14] Nazaroff W.W. Indoor particle dynamics [J]. *Indoor Air*, 14 (2004): 175-183.
- [15] C.Y.H. Chao, T.C. Tung. An empirical model for outdoor contaminant transmission into residential buildings and experimental verification [J]. *Atmospheric Environment*, 35 (2001): 1585-1596.
- [16] Thatcher T.L., Layton D.W. Deposition, resuspension and penetration of particles within a residence [J]. *Atmospheric Environment*, 29(1995): 1487-1497.

The Study of Indoor Pm2.5 Concentrations

DU Tao, ZHOU Zhihua, YUAN Jianjuan

【 Abstract 】 The haze pollution and high PM2.5 concentrations in china have attracted worldwide attention. Tianjin is one of the most severe haze pollution city, the harsh outdoor environments has seriously affected the daily life of people. This paper selected a representative residential buildings in Tianjin, and tested indoor and outdoor PM2.5 concentrations when the windows was in different sealed conditions, the correlation of indoor and outdoor PM2.5 concentrations also been studied. The results showed that correlation coefficient of indoor and outdoor PM2.5 concentrations is more than 0.8 when indoor windows and doors closed, no human activities and particle pollutants. What' s more, the correlation coefficient is relatively large when the speed is high. When the windows and doors closed are well sealed and no human activities and particle pollutants in room, no matter how the outdoor PM2.5 concentrations are changing, indoor PM2.5 concentrations are settlement. Therefore, it is difficult to meet a health indoor environment through closing doors and windows, when the outdoor PM2.5 concentrations are high.

【 Keywords 】 PM2.5; Variation; Sealing of Windows and Doors