

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.017

上海地区冬季住宅室内外颗粒物浓度的相关性

高 军^{1a}, 房艳兵^{1a}, 江畅兴², 徐 斌^{1b}, 宋天珩^{1a}, 曹昌盛^{1a}

(1. 同济大学 a. 机械与能源工程学院; b. 环境科学与工程学院, 上海 201804;

2. 上海市杨浦区环境监测站, 上海 200093)

摘 要:对上海市某住宅建筑室内外PM10、PM2.5、PM1的浓度进行了测量,研究了最小通风量(外门窗关闭)条件下3种天气时颗粒浓度随时间变化的规律以及相关关系,分析了颗粒物浓度与环境温湿度参数之间的关系。研究结果显示,测试期间,室内外空气中细颗粒(PM2.5)占可吸入颗粒(PM10)浓度比例分别达65%和87%以上;无明显室内源时,I/O比值小于1且随粒径减小而减小;室内外颗粒浓度相关性与粒径大小有关系,PM1、PM2.5的浓度相关性大于PM10。研究还表明,颗粒物浓度的关联性与天气状况有关系,多云、雨天和阴天时浓度关联性有显著差别;颗粒物的浓度受到室内外温湿度的影响,且受天气状况影响而呈现复杂性。

关键词:住宅建筑;空气污染;颗粒物;温湿度;相关性

中图分类号:TU834.6 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)02-0110-05

Relationship between Indoor and Outdoor Particulate Matter Concentrations in a Residential Building in Winter of Shanghai

Gao Jun^{1a}, Fang Yanbing^{1a}, Jiang Changxing², Xu Bin^{1b}, Song Tianheng^{1a}, Cao Changsheng^{1a}

(1a. School of Mechanical Engineering;

1b. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China;

2. Environmental Monitoring Station, Yangpu District, Shanghai 200093, P. R. China)

Abstract: In this study, the concentrations of PM10, PM2.5 and PM1 in a residential building in Shanghai were measured under minimum ventilation rate (external doors and windows closed), and the relationship between the indoor and outdoor PM concentrations (I/O ratio) and the influence of temperature and relative humidity were analyzed as well. Results showed that, the percentages of the concentrations of fine particles (PM2.5) of the indoor and outdoor air were 65% and 87% of the inhalable particulate (PM10) concentration during the test respectively. The I/O ratio was less than 1 without significant indoor sources. Meanwhile, the figure decreased as the size of particles decreased. Results also indicated that, the correlation between indoor and outdoor PM concentrations, PM1 and PM2.5 were more obvious than PM10, and the correlations showed obvious differences according to the weather conditions. The PM concentration was influenced by temperature and relative humidity, which was presented to be complex when affected by weather conditions.

Key words: residential building; air pollution; particulate matter; temperature and relative humidity; correlation

收稿日期:2013-05-27

基金项目:上海市科委青年科技启明星计划(11QA1406800)

作者简介:高 军(1977-),男,副教授,博士,主要从事建筑环境与室内空气品质研究,(E-mail)gaojun-hvac@tongji.edu.cn。

流行病学研究表明,人体死亡率和发病率的增加与颗粒物(Particulate Matter, PM)暴露有显著性关系^[1-4]。室外颗粒物可通过通风和渗透的方式进入室内^[5-7],使得室内外颗粒物存在相关性。现代社会中,人们有大约90%的时间在室内度过^[8],室内空气品质越来越受到关注,研究颗粒物室内外相关性成为近年来暴露研究的重点,不仅可以评估室内外颗粒物的浓度水平,还可以反映影响室内颗粒物浓度变化的来源。

目前,虽然一些学者对颗粒物的室内外相关性研究进行了研究^[5, 9-11],但针对颗粒物浓度与天气条件关系的研究则较少。上海是一个人口稠密的城市,其气候、建筑结构等都有自己的特点,因此有必要对该地室内外颗粒物浓度的关联性及其与天气条件的关系进行研究,了解人体在室内外颗粒物中的暴露情况。

笔者对无明显室内污染源条件下的某住宅室内外颗粒物浓度的关系进行了研究,并针对不同天气类型对颗粒物关联性的影响进行了分析。

1 实验方法

实验采用入户采样监测的方式,在2012年12月份对上海市某住宅进行了测试。该住宅位于一栋6层建筑的6楼,除卫生间外,其余房间均有一个面向室外的窗户。建筑周围没有明显污染源,且在建筑周围存在绿色植物区域。测试时室内仅有1人(测试者)且人员活动量较小。测试过程中,室内空调关闭,无采暖,同时住宅外门窗紧闭,只有通过门窗缝隙进行的自然通风。该实验主要研究室内外颗粒物的关联性,因此在测试前一周,厨房停止使用,保证无油烟污染,同时室内也无吸烟现象以及任何形式的卫生打扫。

采样点布置根据人体呼吸区高度确定,测点高度为1.5 m,根据测点布置原则,分别在客厅、主卧室、次卧室各布置一个测点,厨房和卫生间不进行测试并关闭门窗(减小干扰因素)。室外测点布置在同一高度的阳台上,距离建筑外墙约1 m。

研究的颗粒物对象为PM₁₀、PM_{2.5}和PM₁。测试时,采用美国TSI公司生产的8534型Dust-Trak™ DRX气溶胶监测仪,该仪器可以同时监测PM₁、PM_{2.5}、呼吸性颗粒物(PM₄)、PM₁₀和总PM(<15 μm)等浓度,并可测量瞬时值和平均值,其测量范围为0.001~150 mg/m³,精度为±0.1%或±0.001 mg/m³。温度和相对湿度的测量采用国产WSZY-1型温湿度自记录仪,其温度测量精度为±0.1℃,湿度为±0.1%RH。

采样时间安排在8:30—18:30,每15 min记录一次数据,单次采样时间为2 min,取平均值作为该时刻采样点的颗粒物浓度。

2 实验结果与分析

实验测试安排在2012年12月份。在实验测试时间内室外风速均为东南风3~4级。房间的换气次数在0.4~1.0 h⁻¹之间(实验在房间门窗全部关闭的情况下进行,在测量换气次数时,示踪气体浓度衰减较慢,不易测出,因此采用软件模拟计算值作为参考估计值)。选取其中3个典型天分析,天气分别为晴到多云(D1)、小雨(D2)、阴天并伴有雾(D3)。采样所处室外环境的温湿度变化范围如表1所示。

表1 室外温湿度变化值

时间	温度/℃	相对湿度/%RH
D1	10.1(6.4~14.5)	50.0(34.6~70.5)
D2	8.4(7.5~9.0)	91.8(81.0~95.5)
D3	7.8(7.4~8.4)	90.9(86.5~92.8)

2.1 室内外颗粒物浓度随时间变化的关系

从图1可以看出,在同一测试条件下,室内客厅、主卧室、次卧室内PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀的对应均值浓度差异较小,处于同一水平。原因可能是室内房门开启,空气可以自由流通,造成各房间颗粒物进行了有效的混合。但是雨天室内颗粒物的浓度值与多云和阴天(有雾)天气相差较大。

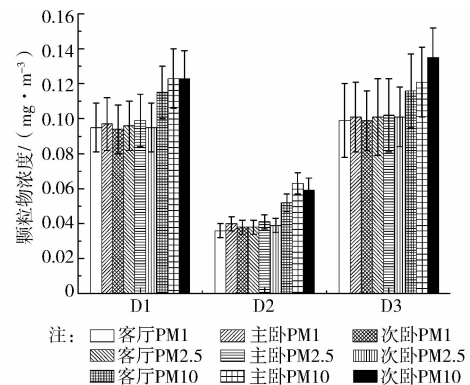


图1 室内不同房间颗粒物浓度

从图1也可以看出室内PM₁、PM_{2.5}的均值浓度接近于PM₁₀的浓度。表2给出了更直观的数据。室内细粒子(PM_{2.5})在可吸入粒子(PM₁₀)中占有的比重较大,最大达到87%,最小为65%。而室外细粒子所占的比重更大(大于87%)。因此,可以认为室内外空气中的颗粒物主要是细颗粒。

表2 室内外颗粒物浓度的平均比值

时间	PM ₁ /PM ₁₀				PM _{2.5} /PM ₁₀			
	客厅	主卧	次卧	室外	客厅	主卧	次卧	室外
D1	0.826	0.789	0.764	0.859	0.835	0.805	0.772	0.873
D2	0.692	0.635	0.644	0.867	0.731	0.651	0.661	0.889
D3	0.853	0.835	0.733	0.931	0.871	0.843	0.748	0.953

图2为室内外颗粒物浓度随时间变化的情况。从图2可以看出,在同一测试条件下,室内各房间之

间的颗粒物浓度逐时变化规律一致,并且室内或室外同一时刻PM1、PM2.5、PM10也呈一致性变化。

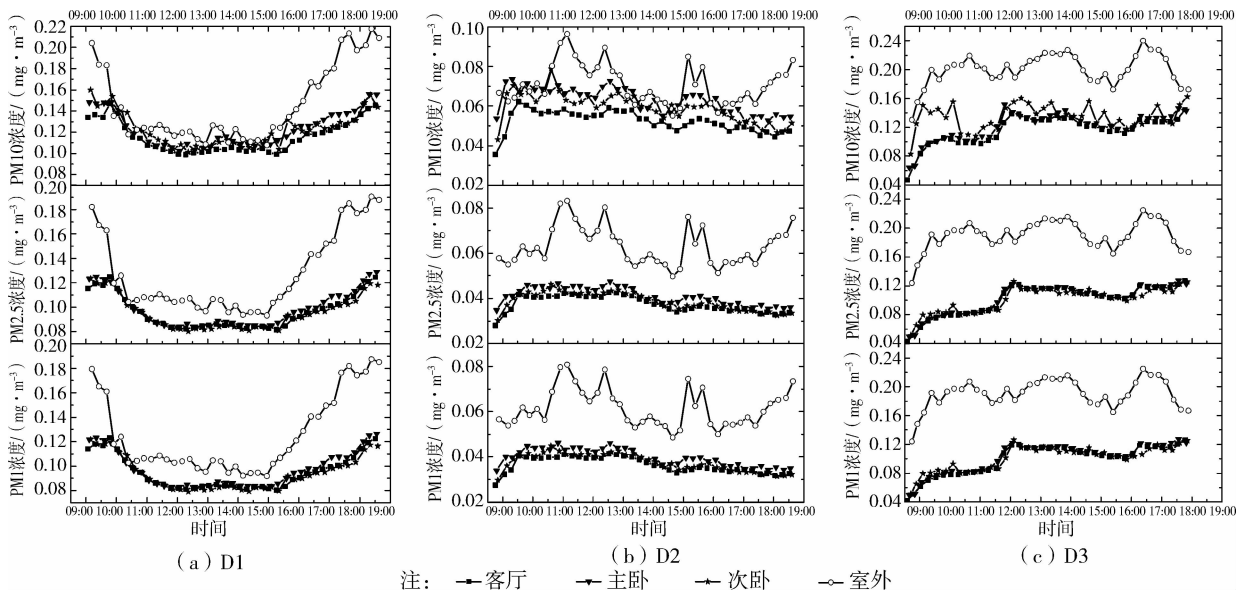


图2 室内外颗粒物浓度随时间变化情况

对比图2中(a)、(b)、(c)3图可以发现,小雨天气的室内外颗粒物浓度明显低于多云和阴天(有雾)。这是因为小雨对室外颗粒物的沉降过程起到促进作用^[12-14],对室外空气有一定的净化能力。受室外浓度影响,在无明显室内源的情况下,室内颗粒物浓度也较低。而阴天有雾时,会导致室外颗粒浓度升高^[15],同时这些颗粒又通过围护结构缝隙进入室内,导致室内浓度升高。

总体上看,3种天气条件下,室外颗粒物的浓度均大于室内。但是,不同天气条件下,室内外颗粒物的浓度不呈规律性变化。多云天气室内浓度早晚较高。小雨天气室内颗粒物浓度呈现缓慢下降趋势,阴天(有雾)时室内浓度呈现缓慢上升趋势。

现行标准《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)中规定的室内可吸入颗粒物(PM10)日平均最高容许浓度0.15 mg/m³,《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中规定的PM2.5日均浓度限值0.075 mg/m³。从图2中可以看出,3种天气下室内PM10浓度绝大多数时刻低于限值。而室内PM2.5浓度却超过限值,除小雨天外。

2.2 室内外颗粒物浓度相关性及其天气因素影响

为了解室内外颗粒物浓度的关系,利用线性拟合的方法研究其相关性。由于室内各房间之间颗粒物浓度的变化规律的一致性,且数值差异较小,故只讨论室内主卧室颗粒物浓度与室外的关系,见图3。

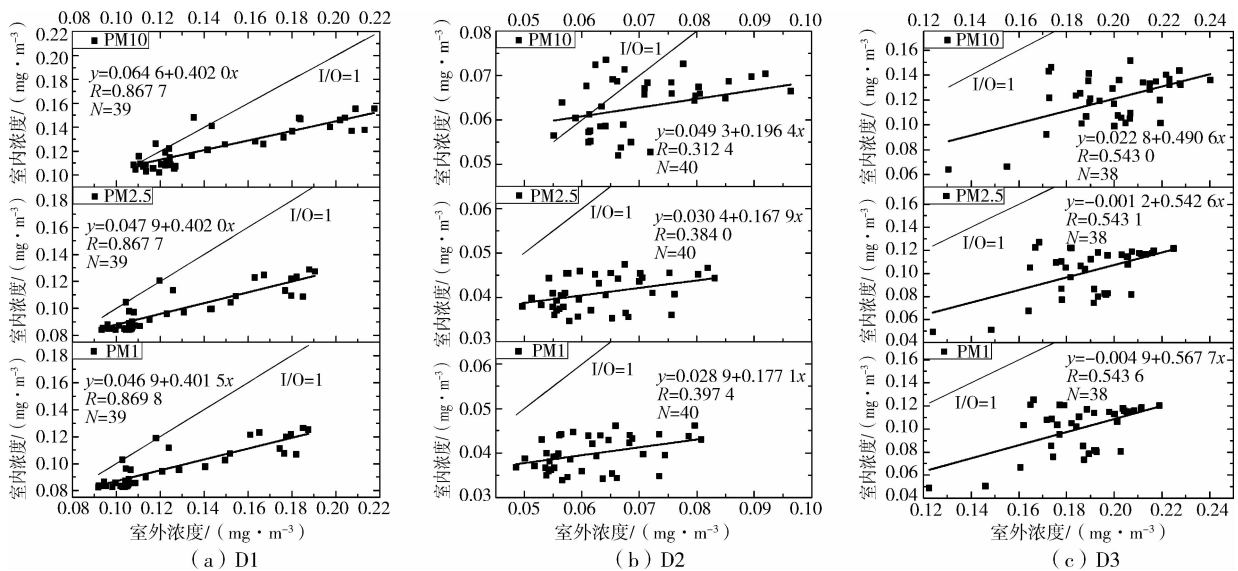


图3 室内外颗粒物浓度关系的回归分析

从图3可以看出,线性拟合曲线位于I/O比等于1的直线下,表明室内外颗粒物平均I/O比小于1,按图所列顺序其I/O比计算结果分别为:0.848±0.113、0.779±0.103、0.778±0.103;0.900±0.131、0.658±0.085、0.654±0.083;0.606±0.093、0.546±0.098、0.541±0.099。I/O比值随粒径的减小而减小,这与文献[10]的研究结果相反。图3也显示了室内外空气中PM1和PM2.5的相关性均大于PM10,这与文献[16]中的报道相一致。并且,多云天气的室内外相关性显著($R=0.8677$ 、 0.8707 、 0.8698),阴天(有雾)次之($R=0.5430$ 、 0.5431 、 0.5436),雨天相关性最差($R=0.3124$ 、 0.3840 、 0.3974)。

图2(a)和图3(a)表明,在多云天气时,室外颗粒浓度直接决定了室内颗粒浓度,在室外浓度出现变化时,室内浓度也呈现相应的变化状态,无明显时间延迟现象。而观察图2和图3中的(b)、(c)图,却无类似情况。这可能是因为在小雨天和阴天的天气条件下,室内颗粒浓度一部分受到室外影响,同时也受到室内粗颗粒的影响。因此,可以认为天气条件是影响室内外颗粒物相关性的重要因素之一。

2.3 颗粒物浓度与温湿度的关系

为了解颗粒物浓度与温湿度间存在的关系,现利用SPSS软件对其进行相关性分析(以PM10为例)。

表3 PM10浓度与温湿度关系

时间	位置	温度 (室内/室外)		相对湿度 (室内/室外)	
		R	p	R	p
D1	室内	0.698	0.000	0.752	0.000
	室外	0.452	0.004	0.701	0.000
D2	室内	-0.144	0.382	-0.418	0.008
	室外	-0.286	0.078	0.223	0.173
D3	室内	0.641	0.000	0.354	0.031
	室外	0.399	0.014	0.486	0.002

注: R 为相关系数, p 为显著性水平。

从表3可以看出,多云和阴天天气条件下,室内外颗粒物浓度均与其所处环境温湿度有显著性关系($P<0.05$),且为正相关性($R>0$)。雨天时仍存在一定关系,但是整体上这种关系不显著($P>0.05$),可能是雨天雨水等复杂性因素所导致。

3 结论

研究了住宅建筑冬季室内外颗粒物浓度的关联性及其与天气条件的关系。针对人们冬季的生活习

惯,只讨论了最小通风量情况下的颗粒物浓度关系。得到如下结论:

1)在紧闭外门窗的条件下,室内不同房间同种颗粒物浓度随时间变化规律一致,且浓度均值基本相同,同一房间不同粒径颗粒也表现出此特征。

2)无明显室内污染源时,室内颗粒物浓度绝大多数时刻小于室外颗粒浓度,平均I/O比值小于1,且I/O比值随粒径的减小而减小。大气颗粒I/O比总体处于0.5~0.9范围内。

3)不同天气条件下,室内外颗粒物的关联性呈现明显差别,文中相关性排序为: $D1>D3>D2$ 。在同一天气条件下,颗粒物向室内输运过程中,细颗粒物的穿透性较强,PM1、PM2.5的关联性大于PM10。

4)室内外颗粒物浓度受到温度和湿度的显著性影响,雨天除外。雨天也存在一定关联性,但是整体不显著。

由于颗粒物浓度的I/O比受到大量因素制约而存在差异性,即使对于同一地区的不同建筑、不同地理位置或者不同的社会经济区域的居住建筑都存在不同,因此该课题有待更深入的研究。对于室内外颗粒物关联性的物理层面的分析以及不同建筑形式的影响是下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56(6): 709-742.
- [2] Katsouyanni K, Touloumi G, Samoli E, et al. Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: Results from 29 European cities within the APHEA2 project [J]. Epidemiology, 2001, 12(5): 521-531.
- [3] Ostro B, Lipsett M, Reynolds P, et al. Long-term exposure to constituents of fine particulate air pollution and mortality: Results from the California teachers study [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(3): 363-369.
- [4] Cao J, Yang C X, Li J X, et al. Association between long-term exposure to outdoor air pollution and mortality in China: A cohort study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3): 1594-1600.
- [5] Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(2): 275-288.

- [6] 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.
- [7] Madureira J, Paciência I, Fernandes E D O. Levels and indoor-outdoor relationships of size-specific particulate matter in Naturally Ventilated Portuguese Schools [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues*, 2012, 75(22/23): 1423-1436.
- [8] Jenkins P L, Phillips T J, Mulberg E J, et al. Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources [J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26A(12): 2141-2148.
- [9] 张振江, 赵若杰, 曹文文, 等. 天津市可吸入颗粒物及元素室内外相关性[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(2): 357-364.
- Zhang Z J, Zhao R J, Cao W W, et al. Residential indoor-outdoor relationships of PM₁₀ and elements in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2): 357-364.
- [10] Wen Y G, Lian Z W, Ye X J, et al. Relationship between outdoor and indoor PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in apartment and office buildings [J]. *Journal of Donghua University: English Edition*, 2008, 25(3): 334-339.
- [11] Kang Y M, Zhong K, Lee S C. Relative levels of indoor and outdoor particle number concentrations in a residential building in Xi'an [J]. *China Particology*, 2006, 4(6): 342-345.
- [12] 胡敏, 张静, 吴志军. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2005, 35(2): 169-176.
- Hu M, Zhang J, Wu Z J. Chemical Composition of rainfall and its effect on the removal of atmospheric particulate matter in Beijing [J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 2005, 35(2): 169-176.
- [13] Samara C, Tsitouridou R. Fine and coarse ionic aerosol components in relation to wet and dry deposition [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 120(1/2): 71-88.
- [14] 胡敏, 刘尚, 吴志军, 等. 北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响[J]. *环境科学*, 2006, 27(11): 2293-2298.
- Hu M, Liu S, Wu Z J, et al. Effects of high temperature, high relative humidity and rain process on particle size distributions in the summer of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(11): 2293-2298.
- [15] 朱宪春, 乐群. 上海市 PM₁₀ 的时间分布特征及其与气象条件的关系[C]//第八届长三角气象科技发展论坛论文集, 2011: 719-723.
- [16] 文远高. 室内外空气污染物相关性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.

(编辑 胡英奎)

(上接第 67 页)

- [10] Wu P, Fu X Z. Feasibility analysis and tentative plan on sewage source heat pump system in Chongqing [C]// *Proceedings of the 22nd International Congress of Refrigeration, Beijing*, 2007: 1424-1432.
- [11] 钱剑峰, 吴学慧. 污水源热泵软垢厚度对流动换热的影响[J]. *流体机械*, 2007, 25(1): 73-78.
- Qian J F, Wu X H. Effect of fluxion and heat transfer due to the thickness of soft dirt in shell sewage heat exchanger [J]. *Fluid Machinery*, 2007, 25(1): 73-78.
- [12] 张吉礼, 钱剑峰, 孔祥兵, 等. 铜管换热器内污水颗粒状污垢生长特性的试验分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(5): 60-64.
- Zhang J L, Qian J F, Kong X B, et al. Experimental study of granular fouling growth characteristics of sewage in copper pipe heat exchanger [J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2010, 32(5): 60-64.
- [13] 孙德兴. 污水源热泵空调项目推广与应用[J]. *中国科技奖励*, 2008(2): 44.
- Sun D X. Promotion and application on sewage source heat pump project [J]. *Chinese Science and Technology Award*, 2008(2): 44.
- [14] 张吉礼, 马良栋. 污水源热泵空调系统污水侧取水、除污和换热技术研究进展[J]. *暖通空调*, 2009, 39(7): 41-47.
- Zhang J L, Ma L D. Study progress in intaking water, defouling and heat transfer in sewage water source heat pump air conditioning systems [J]. *HVAC*, 2009, 39(7): 41-47.
- [15] 蔡增基. 流体力学泵与风机[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

(编辑 王秀玲)