

Measurement and Analysis of PM_{2.5} Concentration Distribution in One High-Rise Building in Shandong*

Bin Wang¹, Pengfei Yan², Pengyi Cui³

¹Rizhao Steel Holding Group Co., Ltd, Rizhao

²Shandong Xiwang Special Steel Co., Ltd, Zouping

³College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: cuipengyi2005@yahoo.com.cn

Received: Mar. 19th, 2013 revised: Apr. 12th, 2013; accepted: Apr. 21st, 2013

Copyright © 2013 Bin Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Recently, the fog haze weather happened in lots of cities, which had a great harm to people's health. PM_{2.5} and other finer particulate matters caught people's attention as the main reason of causing fog haze weather. In this paper, a series of measurements were conducted on PM_{2.5} distribution inside and outside of one high-rise building in Shandong. The testing work of the PM_{2.5} concentration distributions inside of passageway in different height, and the effect of indoor ventilation and several housework on PM_{2.5} distribution had been done. It was found that the environment wind fields had a great influence on the concentration distribution of PM_{2.5}. In addition, the concentration of PM_{2.5} had a great change with the process of indoor activities.

Keywords: Fog Haze Weather; PM_{2.5}; Concentration Distribution; Ventilation Conditions

山东某高层公寓内外 PM_{2.5} 浓度的检测与分析*

王彬¹, 颜鹏飞², 崔鹏义³

¹日照钢铁集团有限公司, 日照

²山东西王特钢有限公司, 邹平

³同济大学环境科学与工程学院, 上海
Email: cuipengyi2005@yahoo.com.cn

收稿日期: 2013年3月19日; 修回日期: 2013年4月12日; 录用日期: 2013年4月21日

摘要: 最近, 雾霾天气在各大城市多发, 对人体健康产生了极大危害, PM_{2.5}等极细颗粒物作为雾霾天气产生的主因, 备受关注。本文以山东某24层公寓为研究对象, 对不同公寓楼层高度迎风面与背风面楼道两侧以及不同室内通风条件下PM_{2.5}浓度分布进行了检测, 同时对室内各类活动因素(吸烟、烹饪、喷空气清新剂等)对PM_{2.5}浓度变化的影响做了详细分析。研究表明楼道两侧迎风面与背风面PM_{2.5}浓度分布受环境风场影响较大, 低速和涡旋区不利于PM_{2.5}扩散; 室内空调系统有利于减弱PM_{2.5}的影响。另外, 室内各类活动对PM_{2.5}浓度的影响具有过程性, 其浓度随活动过程变化较为明显。

关键词: 雾霾天气; PM_{2.5}; 浓度分布; 通风状况

1. 引言

最近, 北京、石家庄等北方城市备受雾霾天气的

困扰, 人们的身体健康受到极大危害, 生产生活受到很大影响。作为雾霾天气产生的主要因素, PM_{2.5}备受关注。PM_{2.5}是指悬浮在空气中, 动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的一类颗粒物, 又称极细颗粒物或可入肺颗粒

*资助基金: 十二五国家科技支撑计划项目 NO.2012BAJ02B03。

颗粒物。由于 PM_{2.5} 粒径小, 重量轻, 能在空气环境中长时间漂浮、滞留, 并且可随大气环流向远处扩散传递, 造成大范围空气污染^[1]。另外, PM_{2.5} 可随呼吸作用被直接吸入肺部, 在肺部沉积, 是引发各种肺病的元凶。由于 PM_{2.5} 成分复杂, 含有大量重金属及细菌病原微生物, 其进入血液会引起重金属中毒、病原性感染^[2], 因此对人体健康影响较 PM₁₀ 更为严重。研究表明, 雾霾现象的频频发生是空气中 PM_{2.5} 浓度急剧上升的缘故^[3-6]。

城市大气环境内 PM_{2.5} 浓度的升高严重威胁着人体健康, 所造成的雾霾天气等给人们的日常生活带来越来越多的困扰。近年来对 PM_{2.5} 产生机理和控制措施的研究成为研究的热点, 受到广泛关注^[7]。大气内 PM_{2.5} 的浓度指标也越来越严格, 2012 年新修订的《环境空气质量标准》中也已增设 PM_{2.5} 的浓度限值监测指标, 其中将 PM_{2.5} 的年平均和 24 小时平均浓度限值分别定为 35 μg/m³ 和 75 μg/m³。随着人们经济生活水平及安全环保意识的提高, 室内环境健康受到越来越多人群的关注^[8,9]。大量调查研究显示, 人们有超过 80% 的时间是在室内度过, 室内空气质量的的好坏更直接影响到人们的身体健康和工作效率^[4,10]。病态建筑及病态建筑综合症(简称 SBS, WHO 将其定义为因建筑物使用而产生的包括眼睛发红、流鼻涕、嗓子痛、头疼恶心等症状)概念的提出更给人们敲响了警钟^[5,11]。室内空气品质不仅受室内各类活动因素影响, 而且因不同通风条件受室外空气品质影响也较大^[12]。

本文以山东某 24 层高层公寓楼为研究对象, 对不同楼层高度迎风面与背风面楼道两侧以及不同室内通风条件下 PM_{2.5} 浓度分布进行检测, 同时对室内各类活动因素(如吸烟、烹饪、喷空气清新剂等)对 PM_{2.5} 浓度变化的影响做了详细分析。本文对贯通式高层建筑中 PM_{2.5} 分布特点以及如何减轻室内 PM_{2.5} 污染, 提高室内空气品质提供了有价值的参考意见。

2. 检测方法与环境

2.1. 测试仪器及校正

实验中使用美国产 DUSTTRAKTM8520 (TSI) 来测试空气中 PM_{2.5} 的质量浓度。该仪器根据 90 度直角光散射原理, 利用内置气泵将气溶胶微粒吸入光学室中, 再由光的散射量来测量微粒的浓度。该仪器可

即时读数, 测量范围在 0.001~100 mg/m³, 精度为读数的 0.1%。未校正 DUSTTRAK, 利用国标法(HJ 618-2011)规定的重量法测得 PM_{2.5} 的浓度水平, 与 DUSTTRAK 同步测得的数据进行线性相关分析, 得到校正方程为 PM_{2.5}(HJ) = 0.502PM_{2.5}(DT), 其中 PM_{2.5}(HJ) 为国标法测量值, PM_{2.5}(DT) 为 DUSTTRAK 测量值。使用 Q-TRAK Plus (TSI) 测试环境湿度, 其范围在 5%~95% RH。这两种仪器均可自动记录测试时间和瞬时浓度值, 能够自动分析生成数据平均值。

2.2. 测试环境及测样时间

本文以山东某高层公寓楼为研究对象, 分别进行室内和室外 PM_{2.5} 浓度的测量。建筑结构如图 1 所示, 该建筑总体为一规则长方体结构, 长宽高为 L × W × H = 40 m × 12 m × 75 m, 共 24 层, 每层中间为东西走向贯通式楼道, 楼道两端是阳台与外界大气相通, 楼梯及电梯位于楼道两端附近。公寓楼内房间均匀分布在楼道两侧, 如图 2 所示, 单间尺寸为 5 m × 3 m × 2.8 m, 每间公寓均有一门与楼道相通, 有一窗与外界大气环境相通。本研究检测过程中大气环境风场为西风向, 如图 1 所示, 建筑西侧面为迎风面, 东侧面为背风面。

对于不同高度迎风与背风面 PM_{2.5}, 湿度分布以及楼道内 PM_{2.5} 浓度分布采样时间段为 2012 年 8 月

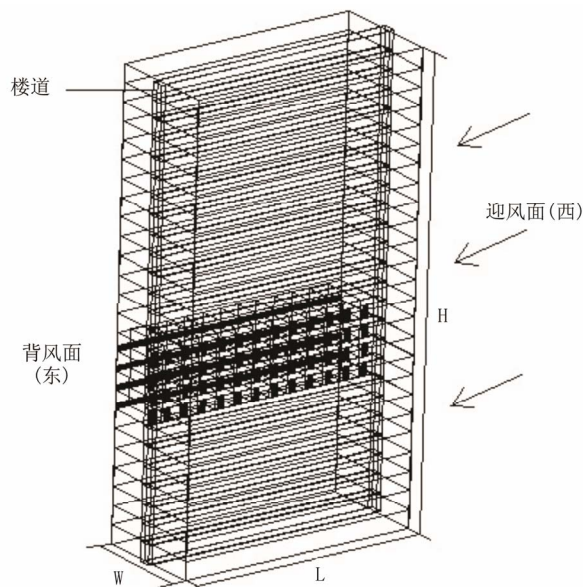


Figure 1. Apartment building structure and layout
图 1. 公寓楼结构及布局

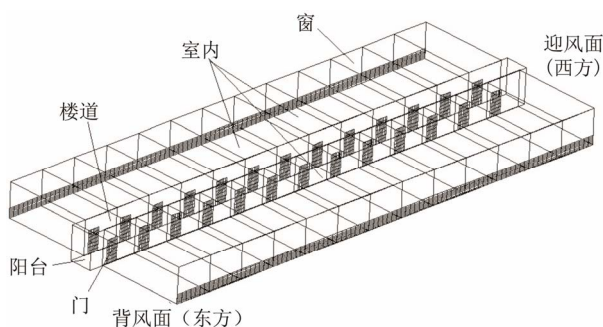


Figure 2. One layout drawing in apartment building
图 2. 公寓楼单层布置图

4 日至 2013 年 2 月 4 日, 采样时间集中在中午 12:00~14:00, 图中所示数据为检测平均值。室内各种活动对室内 PM_{2.5} 的影响所得数据, 是在该活动发生前后一时间段内得到。室内新装空调对室内 PM_{2.5} 影响是新装空调开始使用前后一时间段检测所得数据。

2.3. 采样点布置

检测高层公寓楼迎风面与背风面 PM_{2.5} 浓度随高度变化, 采样点设在每层楼道两端阳台, 距离每层楼面 1.5 m(人呼吸所在截面)处, 每个采样点采样 2 分钟, 取平均值作为该采样点 PM_{2.5} 的浓度值。不同高度楼层内 PM_{2.5} 浓度监测点为整个楼道, 采用从楼道一端阳台携带仪器缓慢移动到另一端阳台移动式采样, 监测 PM_{2.5} 在每层楼道内分布情况。各类生活活动过程对室内 PM_{2.5} 浓度的影响的采样方式为固定式采样, 采样点设置在室内距每层楼面 1.5 m(人呼吸所在截面)处, 采样时间为整个活动过程。

3. 结果与分析

为了研究风场对 PM_{2.5} 分布的影响, 本文利用 CFD 计算对此高层建筑建筑环境风场进行了数值模拟, 如图 3 所示, 高层建筑迎风面底部受到上风向底层建筑尾流的影响, 前面有涡流产生, 不利于气流与外界大气交换, 是污染滞留和高浓度区。随着高度增加, 高层建筑不再受底层建筑尾流的影响, 气流受到迎风面墙面的阻挡, 风速变小, 风向发生剧烈改变, 背离墙面向两侧发散, 可以看出从十一楼开始, 随着建筑高度增加, 迎风面建筑表面风速有一块减小的区域, 直到建筑顶部气流不受建筑阻挡时, 速度迅速变大。高层建筑背风区从高处往下有个明显的涡旋, 随高度降低, 受到后排高层建筑的影响, 涡旋逐渐消失, 建筑表面风速逐渐增大。

3.1. 公寓楼不同高度迎风面、背风面 PM_{2.5} 浓度分布

公寓楼不同高度处 PM_{2.5} 浓度分布如图 4 所示。由图可知, 在所测高度范围内(第 2~24 层)迎风面与背风面环境中 PM_{2.5} 浓度在 116 μg/m³~179 μg/m³, 较国家 PM_{2.5} 质量浓度标准(24 h 平均浓度值 75 μg/m³)高出 1 倍多, 属严重超标。分析 PM_{2.5} 在同侧不同高度的浓度分布, 并无明显规律, 只是在迎风面第 8~13 层 PM_{2.5} 浓度较两侧低。而对比 PM_{2.5} 在同一高度两侧浓度值, 发现背风面 PM_{2.5} 浓度较迎风面高。同时监测到相应位置的湿度值(图 5)也显示同一高度背风面湿度比迎风面高。说明楼道两侧迎风面与背风面浓

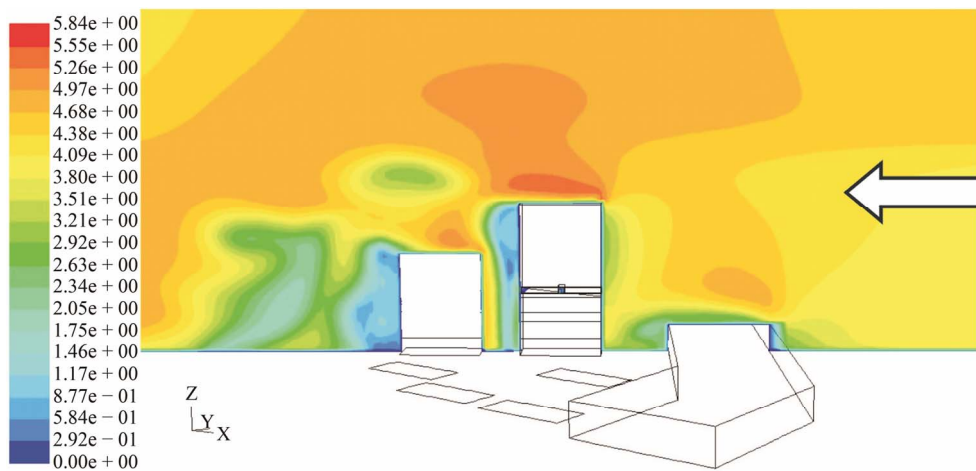


Figure 3. Velocity contour on building facade
图 3. 建筑立面速度云图

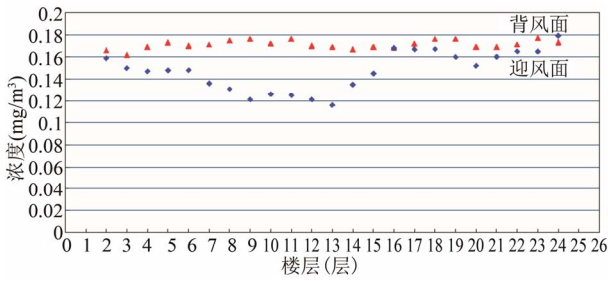


Figure 4. PM_{2.5} concentration distribution at different heights
图 4. 不同高度 PM_{2.5} 浓度分布

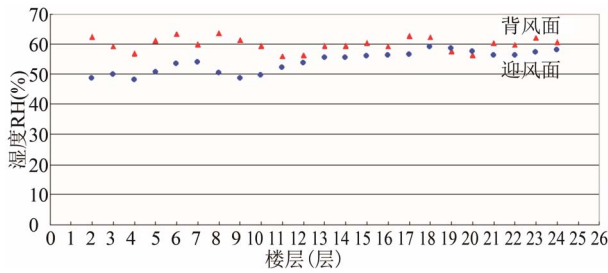


Figure 5. Humidity values at different heights
图 5. 不同高度湿度值

度分布受环境风场作用影响较大，背风面空气流动差，湿度大，污染物不易扩散，导致背风面 PM_{2.5} 浓度相对较高。

3.2. 楼道内 PM_{2.5} 浓度分布规律

测试选在 24 楼至 8 楼的楼道内进行，采用从楼道背风面阳台携带仪器缓慢移动到迎风面阳台的移动式采样方式，检测 PM_{2.5} 在每层楼道内分布情况，迎风面与背风面阳台所得数据即为该高度处外界大气环境值。测量结果如图 6 所示，同一楼层高度背风面阳台 PM_{2.5} 浓度较迎风面高，这与上组测试结果一致。同一楼层，从楼道背风面测到迎风面过程中 PM_{2.5} 浓度呈现先降低后升高的变化过程，且楼道两侧门关闭或开启较小通风状况差时，楼道两端 PM_{2.5} 浓度明显较中间浓度高，楼道两侧门全部打开通风状况较好时，PM_{2.5} 浓度在该楼层变化差值较小，这个测试结果的前提是室外环境 PM_{2.5} 浓度较室内高，室内与室外通风条件好时，室外空气更多进入室内；通风条件不好时，室内空气品质受室外空气品质影响小，所以会出现上述检测结果。

3.3. 室内不同通风条件下 PM_{2.5} 浓度变化

如图 7(a)所示，前一段时间，在开窗关门空气环

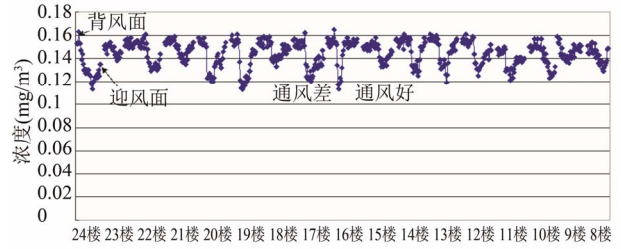
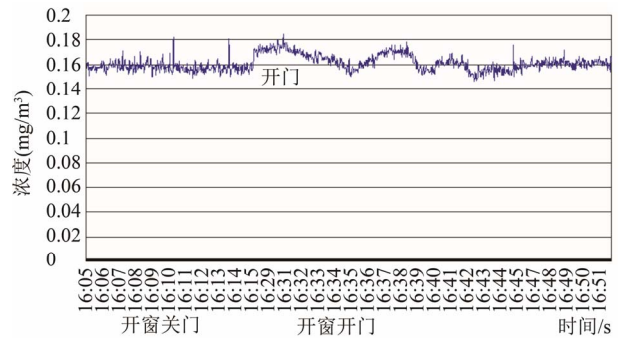
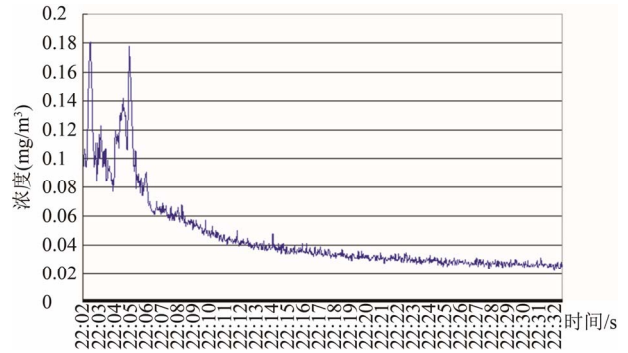


Figure 6. PM_{2.5} concentration distribution in passageways at different heights
图 6. 不同高度楼道内 PM_{2.5} 浓度分布



(a)



(b)

Figure 7. (a) PM_{2.5} concentration change under conditioning of opening and closing; (b) PM_{2.5} concentration change after air condition running

图 7. (a) 宿舍开、关门条件下 PM_{2.5} 浓度变化；
(b) 空调运行后 PM_{2.5} 浓度变化

境流通不畅，不与外界发生交换的条件下，建筑室内 PM_{2.5} 浓度比较稳定，维持在 158 μg/m³ 左右。开门后，由于室内门窗与外界之间形成自然对流通风，空气流通室内 PM_{2.5} 浓度开始发生变化，由于室外 PM_{2.5} 浓度较室内高，造成开门通风后室内平均浓度随时间升高，最高达到 183 μg/m³，之后随着室内外气流不断交换，室内空气环境越来越多的被室外空气所代替，PM_{2.5} 的浓度出现较大波动。由此表明，通过开窗开门通风未必能改善室内空气品质，前提是室外空气品质

要好于室内，否则只会适得其反。

另外，在新安装空调的房间内，开展空调运行对 PM_{2.5} 浓度影响的测试结果如图 7(b)所示，测试从空调运行后开始，从图中曲线可以得知，室内 PM_{2.5} 平均浓度呈波动下降趋势，由于新装空调内过滤网有一定的空气过滤功能，可以对室内 PM_{2.5} 等颗粒物进行有效过滤，因此对室内空气品质的改善有重要作用^[13]。但滤料结构的容尘量是一定的，当空调滤料容尘量饱和时，不仅会增加空调耗能，还可能会增加室内颗粒物污染，更严重的是颗粒物长期在滤料上吸附会由于适宜的环境造成病菌微生物等的繁殖，随着空调出风携带进入室内空气环境，直接对人体健康构成危害，因此建议空调使用一段时间后及时更换内部的滤料^[14]。

3.4. 室内不同活动过程中 PM_{2.5} 浓度的变化

检测结果如图 8 所示，在室内吸烟、整理床铺、烹饪、和喷空气清新剂等活动都会使室内 PM_{2.5} 浓度升高。如图 8(a)和(c)所示，吸烟和烹饪过程中周围空气中 PM_{2.5} 浓度急剧升高，最高达到 8000 μg/m³，这

表明燃烧过程中产生香烟烟雾及油脂燃烧产生的油烟包含大量细小颗粒物，导致室内 PM_{2.5} 浓度升高，大大降低室内空气品质，应该引起人们注意，所以建议不要在居住的室内吸烟，烹饪过程要在有抽油烟机开启条件下进行。室内喷空气清新剂过程 PM_{2.5} 的浓度变化如图 8(d)所示，PM_{2.5} 浓度在喷空气清新剂前平均为 430 μg/m³，喷之后的过程中最高浓度达到 486 μg/m³，之后随着气味的慢慢消减，其浓度也逐渐降低到 435 μg/m³ 左右，表明喷香水的过程湿度对 PM_{2.5} 浓度有一定的贡献。相比之下，在整理床铺过程(图 8(b))中，气流夹带起细小灰尘对 PM₁₀ 贡献较大，但对 PM_{2.5} 贡献较小，PM_{2.5} 的平均浓度在 200 μg/m³ 左右，因室内本底 PM_{2.5} 浓度也已经比较高，所以所测浓度都较高。通过以上分析，室内的各种活动过程对室内 PM_{2.5} 贡献程度以及对空气品质的影响需要引起人们的重视。

4. 讨论

本文研究 PM_{2.5} 浓度分布，采用的仪器是美国产 DUSTTRAKTM8520(TSI)，实现在线实时监测记录数

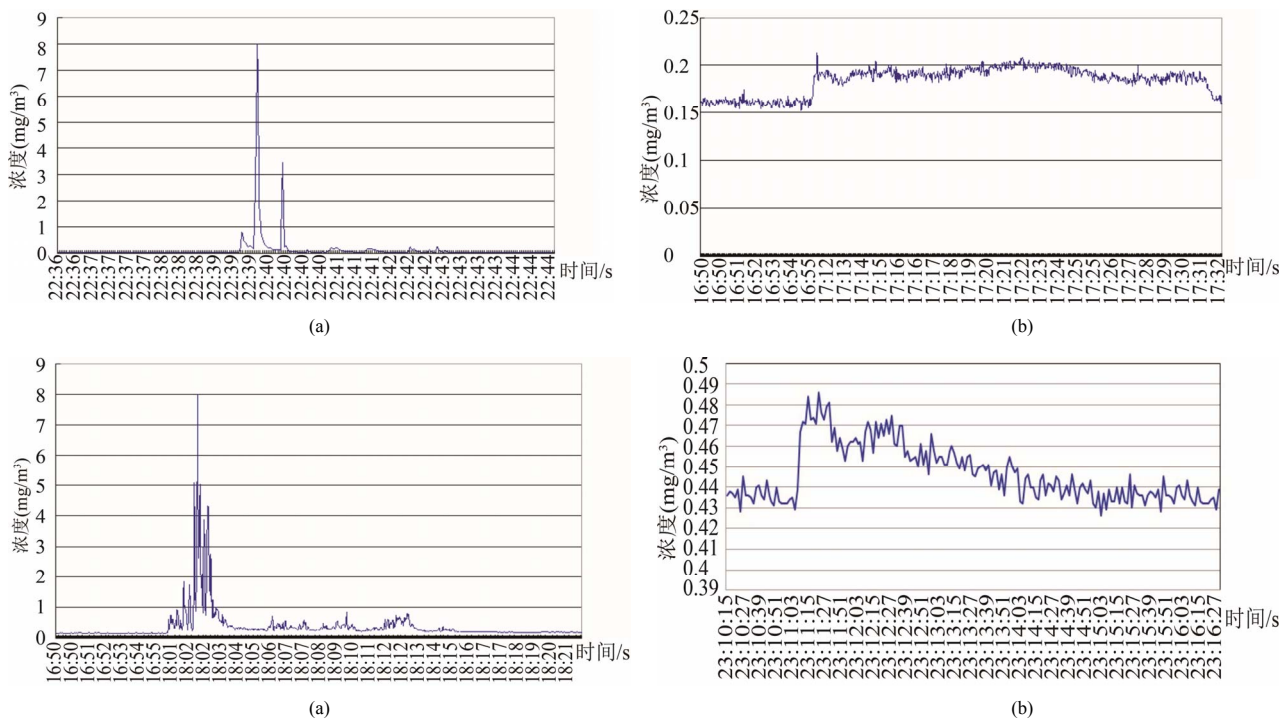


Figure 8. (a) PM_{2.5} concentration change while smoking; (b) PM_{2.5} concentration change while bedmaking; (c) PM_{2.5} concentration change while cooking; (d) PM_{2.5} concentration change while spraying air freshener

图 8. (a) 吸烟过程中 PM_{2.5} 浓度变化; (b) 整理床铺过程中 PM_{2.5} 浓度变化; (c) 烹饪过程中 PM_{2.5} 浓度变化; (d) 喷空气清新剂过程中 PM_{2.5} 浓度变化

据,但该仪器测量 PM_{2.5} 的标准与国家 PM_{2.5} 测试标准方法不同,该仪器根据 90 度直角光散射原理,利用内置气泵将气溶胶微粒吸入光学室中,再由光的散射量来测量微粒的浓度,该方法没有排除湿度对 PM_{2.5} 的贡献。而中国采用的是微震荡天平法(TEOM),标准方法为重力分析法(滤膜采集颗粒物后称量);同时是否除湿或除湿程度不同,是否除去 VOCs 等都会影响测量结果。另外,使用该仪器时,湿度对 PM_{2.5} 浓度有较大影响,其贡献率还需要进一步研究。

5. 结论

本文以山东某高层公寓楼为研究对象,检测了不同楼层高度迎风面与背风面楼道两侧以及不同室内通风条件下 PM_{2.5} 浓度分布,同时对室内各类活动过程(如吸烟、烹饪、喷空气清新剂等)对 PM_{2.5} 浓度变化的影响做了详细分析。研究表明,建筑室内 PM_{2.5} 浓度总体超标,需要引起人们的高度重视。楼道两侧迎风与背风面 PM_{2.5} 的浓度分布受环境风场影响较大,低速和涡旋区不利于 PM_{2.5} 扩散;室内新装空调系统的过滤作用有利于减弱 PM_{2.5} 的影响。另外,室内各类活动(如室内整理床铺、吸烟、烹饪、喷空气清新剂等活动)对 PM_{2.5} 浓度的影响具有过程性,其浓度随活动过程变化较为明显,尤其吸烟、烹饪等燃烧过程会

产生大量的细烟雾颗粒,加大对室内 PM_{2.5} 的浓度贡献率,也大大降低室内空气品质。

参考文献 (References)

- [1] 杨新兴,冯丽华,尉鹏. 大气颗粒物 PM_{2.5} 及其危害[J]. 前沿科学, 2012, 6(21): 22-31.
- [2] 刘勇,罗克强,廖慧彬. PM_{2.5} 的污染现状与多元化控制[J]. 吉林农业, 2012, 4: 148-148.
- [3] 吴兑. 灰霾天气的形成与演化[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 157-161.
- [4] 王圆圆,周连,陈晓东. 灰霾对人体健康影响研究进展[J]. 江苏预防医学, 2012, 23(4): 37-39.
- [5] 丁珏,刘丽颖. 雾霾天气颗粒物污染物的特性及吸收气态污染物过程的分析[J]. 上海环境科学, 2009, 28(1): 11-14.
- [6] 周涛,汝小龙. 北京市雾霾天气成因及治理措施研究[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2012, 4(2): 12-16.
- [7] 肖致美,毕晓辉,冯银厂等. 宁波市环境空气中 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 来源解析[J]. 环境科学研究, 2012, 5(25): 549-555.
- [8] 张懿华,段玉森,高松等. 上海城区典型空气污染过程中细颗粒物污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1115-1121.
- [9] 边海,韩素琴,张裕芬等. 天津市大气能见度与颗粒物污染的关系[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3): 406-410.
- [10] 李先庭,杨建荣,王欣. 室内空气品质研究现状与发展[J]. 科技综述,暖通空调 HV&AC, 2000, 3(3): 36-40.
- [11] WHO. Indoor air pollutants: Exposure and health effects. EURO Reports and Studies 78, WHO, Geneva, 1983.
- [12] 谢伟,樊越胜等. 通风对室内外颗粒物浓度关系的影响分析[J]. 洁净与空调技术 CC&AC, 2012, 12(4): 19-21.
- [13] 柴士君. 空调与非空调房间内颗粒物浓度变化规律的研究[D]. 东华大学, 2006.
- [14] 许琼琳. 空气品质与空调二次污染的对策[D]. 同济大学, 2007.