

# 灰霾天气条件下上海地区冬季居住环境PM<sub>2.5</sub>浓度及呼吸暴露分析

## Analysis of Indoor PM<sub>2.5</sub> Concentration and Inhalation Exposure under the Haze Climate in Winter of Shanghai

高军 房艳兵 张旭 (同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 在灰霾天气条件下, 对上海市某住宅建筑室内外 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行了测量, 研究了最小通风量 (外门窗关闭) 条件下, 室内外 PM<sub>2.5</sub> 浓度随时间变化规律及其相关性。研究结果显示, 无明显室内污染源时, 室内外 PM<sub>2.5</sub> 浓度平均 I/O 比值为  $0.67 \pm 0.17$ 。这表明, 在近期上海冬季灰霾天气下, 即使门窗关闭保持最小换气次数, 室内人员暴露的室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度可能仍然相当高; 进而计算了典型活动模式下人员 PM<sub>2.5</sub> 吸入暴露量。结果表明, 成人的全天总吸入暴露量要高于老人和儿童, 人员室内总吸入暴露量占全日吸入暴露量比重较大, 最大可达 80%。

**关键词:** 霾; 居住环境; 室内外; PM<sub>2.5</sub>; 吸入暴露量

**中图分类号:** TU50      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1674-814X(2014)01-31-04

随着城市化进程的快速发展, 人类活动直接向大气排放大量粒子。这些粒子通过一系列作用转化形成气溶胶粒子, 导致大气气溶胶污染日益严重, 从而产生了灰霾这种污染性天气。灰霾天气是指大量极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中, 使能见度小于 10 km, 空气普遍有混浊现象的天气状况。

灰霾是以细颗粒物为载体, 以气象要素和污染因素共同作用而产生的一种危害型天气现象。霾天气的发生与 PM<sub>2.5</sub> 污染密切相关<sup>[1-2]</sup>, 大气成分中 PM<sub>2.5</sub> 指标超过  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  限值时, 可作为判识霾的参考依据<sup>[3]</sup>。当灰霾发生时, 室外空气中的 PM<sub>2.5</sub> 浓度会显著增加。然而, PM<sub>2.5</sub> 可对人体呼吸、心血管等多个系统造成危害<sup>[4-5]</sup>。Schwartz 等<sup>[6]</sup> 研究认为, PM<sub>2.5</sub> 增加  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 被研究人群的总死亡率增加 1.5%, 同时还发现肺炎、心脏病及其他一些疾病的死亡率上升的效应随着暴露时间的延长而增强。我国多数地区的 PM<sub>2.5</sub> 污染较重, 人体暴露于大气颗粒物中所产生的健康问题也较多。因此, 本文拟对灰霾天气条件下居住环境的 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行分析并进行污染物暴露评价。

### 1 试验方法

本试验采用入户采样监测的方式, 在 2013 年的 12 月份

灰霾天气条件下对上海市某住宅进行了现场测试。该住宅位于一栋五层建筑的顶楼, 除卫生间外, 其余房间均有一个面向室外的窗户。该建筑周围存在绿色植物区域, 在建筑物的背面约 20 m 范围内存在一条公路, 采样点位置如图 1 所示。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。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。



图 1 采样点位置, 图中“■”标记

采样点布置根据人体呼吸区高度确定, 测点高度为 1.5 m, 在卧室布置一个测点, 室外测点布置在同一高度的阳台

上, 距离建筑外墙约1m, 如图2所示。

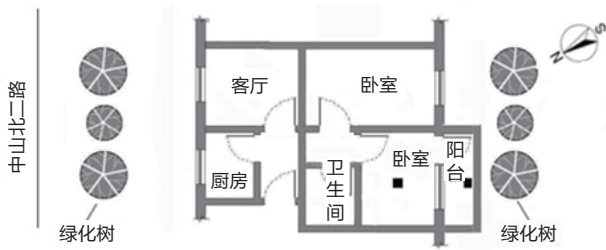


图2 测试房间与采样点布置, 图中“■”标记

本试验所研究的颗粒物对象为PM<sub>2.5</sub>。测试时, 采用美国TSI公司生产的8534型DustTrak™ DRX气溶胶监测仪。该仪器可以同时监测PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、呼吸性颗粒物(PM<sub>4</sub>)、PM<sub>10</sub>和总PM(<15 μm)等浓度, 并可测量瞬时值和平均值, 测量范围为0.001~150 mg/m<sup>3</sup>, 精度为±0.1%或±0.001mg/m<sup>3</sup>。温度和相对湿度的测量采用国产WSZY—1型温湿度自记仪, 温度测量精度为±0.1K, 湿度为±0.1%RH。测试结果经称重法校准。

采样时间为全天每小时进行一次采样, 单次采样时间为2min, 取平均值作为该时刻采样点的颗粒物浓度。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 室内外环境参数

在试验测试时间内室外风速约为4级左右。房间的换气次数在0.4~1.0 h<sup>-1</sup>之间(本试验是在房间门窗全部关闭的情况下进行的, 在利用示踪气体测量换气次数时, 示踪气体浓度衰减较慢, 所需时间较长, 因此采用软件模拟计算值作为参考估计值)。测试时间段内室内外温湿度变化如图3所示, 室内温湿度为12.4±1.0K、62.5±7.1%RH, 其随时间变化相对平缓, 室外温湿度为5.9±2.3K、65.0±14.2%RH, 随时间呈现周期性变化。

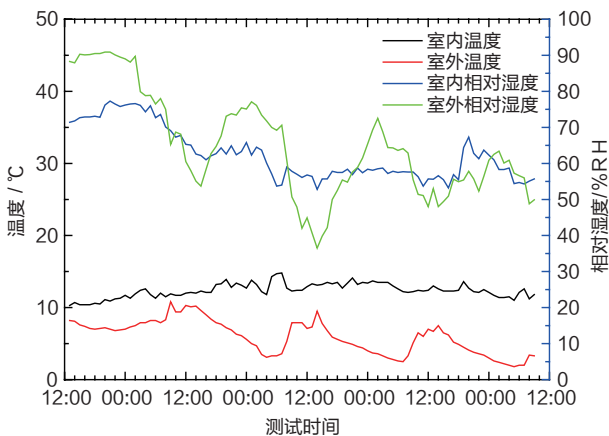


图3 室内外温湿度变化(测试时间为12/17~12/21)

### 2.2 PM<sub>2.5</sub>浓度随时间变化情况

图4为PM<sub>2.5</sub>随时间的变化规律。从图4中可以看出, 室内和室外的PM<sub>2.5</sub>浓度随时间变化规律一致。在测试时间段内, 上海地区发生了连续多日的雾霾天气, 灰霾可以看作室外PM<sub>2.5</sub>的源, 其对室外PM<sub>2.5</sub>的浓度有极大的贡献。现行标准GB 3095—2012《环境空气质量标准》(2016-01-01实施)中规定的PM<sub>2.5</sub>日均浓度限值为75 μg/m<sup>3</sup>, 根据气象行业标准《霾的观测和预报等级》(QX/T 113—2010)的规定, 此指标也可以作为判识霾的参考依据。从图4中可以看出, 在测试时间段内, 除雨天外, PM<sub>2.5</sub>浓度超过此限值的时刻占有较大比例, 受室外影响, 室内PM<sub>2.5</sub>浓度也相对较高甚至超过限值。雨天时室内外PM<sub>2.5</sub>浓度较低, 空气质量良好。这是因为雨水可以对室外空气起到净化作用, 能加速颗粒物的沉降<sup>[7-9]</sup>, 同时由于室外源浓度的降低, 也造成了室内颗粒物浓度的降低。I/O比可以用于计算室外污染源对室内颗粒物浓度贡献比例的多少。本研究中I/O比总体上小于1, 其平均值为0.67±0.17。

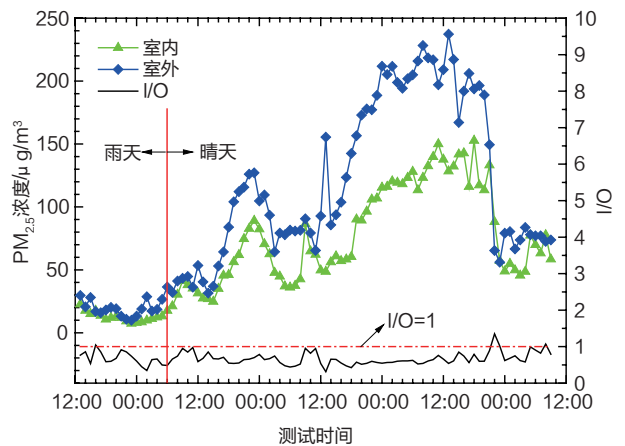


图4 室内外PM<sub>2.5</sub>浓度随时间变化情况及其I/O比

图5为本文作者在2012年12月份雾霾天气时测试所得结果, 该结果可以为图4数据提供一个佐证。

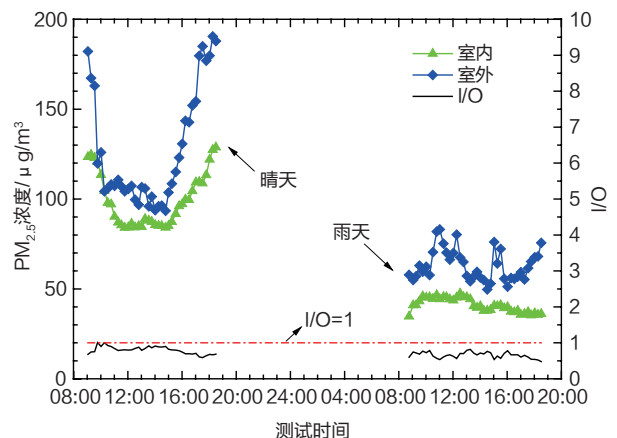


图5 2012年12月(25~26日)灰霾时PM<sub>2.5</sub>浓度变化

### 2.3 PM<sub>2.5</sub>浓度室内外相关性

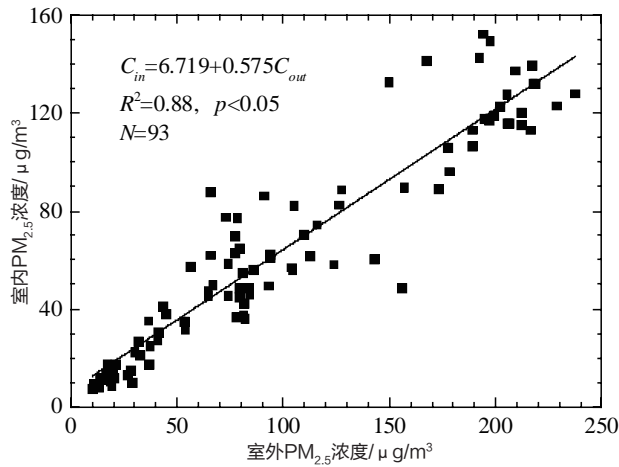


图6 室内外PM<sub>2.5</sub>浓度的回归分析

图6为室内外PM<sub>2.5</sub>浓度的线性回归分析。从图6中可以看出，室内外PM<sub>2.5</sub>浓度之间存在显著相关性(T—检验， $p < 0.05$ )，室内与室外的浓度水平相关系数 $R$ 为0.939( $R^2 = 0.88$ )，说明了室内与室外的PM<sub>2.5</sub>关系紧密，室内PM<sub>2.5</sub>的质量浓度变化中有88%是由室外引起的，在不存在室内污染源的情况下，室内PM<sub>2.5</sub>大部分来源于室外。实际上，室外细颗粒物(如PM<sub>2.5</sub>)对室内影响是十分大的<sup>[10-11]</sup>，主要是因为细颗粒物除了通过门窗随气流进入室内之外，还可以通过建筑围护结构缝隙，包括墙体、门窗上的微细缝隙穿透进入室内。

### 2.4 PM<sub>2.5</sub>吸入暴露评价

暴露是指在一定的时间内，接触一定浓度的污染物的过程<sup>[12]</sup>，是评价空气中污染物迁移和分布对人体影响的重要参数，也为流行病学和健康风险评价研究提供基础参数。对于颗粒物而言，主要是通过人体呼吸进入体内的。根据人体暴露采用的潜在暴露(Potential Dose)<sup>[13]</sup>的概念，可通过计算一定时间内人体所吸收的颗粒物潜在剂量来评价实际的人体暴露状况。因此，颗粒物吸入暴露的评价采用相对暴露浓度、时间以及呼吸量乘积进行积分的办法，即

$$D_{pot} = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot IR(t) dt \quad (1)$$

式中： $C(t)$ ——随时间变化的颗粒物浓度；  
 $IR(t)$ ——随时间变化的人体呼吸率；

$D_{pot}$ ——时间 $t_1 \sim t_2$ 内人体的潜在颗粒物暴露量。

在进行潜在暴露量计算时可以按式(2)计算

$$D_{pot} = \sum_i C_i \cdot IR_i \cdot t_i \quad (2)$$

式中， $C_i$ 、 $IR_i$ 、 $t_i$ ——分别表示不同环境中颗粒物浓度、呼吸率和暴露时间。

对于不同年龄段的人社会分工不同，所处的环境与停留时间会有所差别，因此其呼吸暴露量也会有所不同。表1给出了三种中人员的作息规律。

表1 人员作息时间

时间	时间段	所处环境
老年人	0:00~8:30	室内
	8:30~10:00	户外
	10:00~15:00	室内
	15:00~17:00	户外
	17:00~24:00	室内
成年人	0:00~7:30	室内
	7:30~19:00	户外或办公室
	19:00~24:00	室内
儿童	0:00~7:00	室内
	7:00~17:00	户外或学校
	17:00~24:00	室内

污染物的总潜在暴露量( $D_{pot}$ )由人的呼吸率、污染物浓度及暴露时间等3个因素决定。呼吸率的大小与人的活动方式有关，各年龄层次人员在不同环境中的平均呼吸速率如表2所示<sup>[14]</sup>。

表2 成人(儿童)在各类环境中的呼吸速率 单位: m<sup>3</sup>/h

环境	环境	呼吸速率
成年人(包括老年人)	居室家中	0.5
	办公室	1.0
	途中	1.6
	室外	1.6
儿童	家中	0.4
	学校	1.0
	途中	1.2
	室外	1.2

表3为计算所得人员暴露量。从表3中可以看出，成人的全天暴露量要高于老人和儿童，可能是由于成人要承担较多的社会活动同时成人的呼吸速率较大所致。在灰霾天气条件下，人员的全天吸入暴露量较大，甚至达到2.73 mg，高于限值浓度下吸入暴露量值近一倍，对人体健康有着较大的影响。从表3中同时可以看出，尽管住宅内的颗粒物浓度相对较低，但是人员在室内停留时间较长，人员在室内总暴露量在全日暴露量中仍占较大比重。

表3 人员暴露量

单位: μg

日期编号	老人暴露量			成人暴露量			儿童暴露量/μg		
	室内	全天	比值	室内	全天	比值	室内	全天	比值
1	59.2	131.1	45.1%	118.2	150.5	78.5%	98.8	117.9	83.8%
2	373.9	587.3	63.7%	557.1	789.5	70.6%	465.4	591.9	78.6%
3	675.2	1136.1	59.4%	1013.6	1394.5	72.7%	873.3	1119.2	78.0%
4	1272.0	2196.0	57.9%	2047.4	2727.0	75.1%	1752.0	2273.2	77.1%
5	268.1	386.1	69.4%	287.7	403.9	71.2%	241.9	329.0	73.5%
限值	1147.5			1440			1200		

注：1中为11h数据，5中为10h数据。此外限值是指在限值浓度下计算所得暴露量值。

### 3 结语

本文主要讨论了灰霾天气条件下居住环境冬季室内外PM<sub>2.5</sub>浓度的关联性。针对冬季人们的生活习惯,本文只讨论了最小通风量情况下的颗粒物浓度关系,并得到如下结论:

(1)在紧闭外门窗的条件下,室内外PM<sub>2.5</sub>浓度随时间呈现一致性的变化规律,室内PM<sub>2.5</sub>主要来源于室外,室内外PM<sub>2.5</sub>浓度之间存在显著相关性( $R^2=0.88$ ,  $p<0.05$ )。

(2)无明显室内污染源时,室内PM<sub>2.5</sub>浓度绝大多数时刻小于室外PM<sub>2.5</sub>浓度,平均I/O比值小于1,平均值为0.67 ± 0.17。

(3)天气条件对PM<sub>2.5</sub>浓度有较大影响,雨天时雨水对PM<sub>2.5</sub>有一定的净化作用,可以有效降低PM<sub>2.5</sub>浓度。

(4)人员室内总吸入暴露量占全日吸入暴露量比重较大,最大可达80%。

本文在计算人员暴露量时存在一定的不足之处,在确定人员作息时间时未进行大样本调查,而是选取了小范围人员作息时间作为参考,可能造成计算结果不够准确。本人将会在之后做一个详尽的调查。本文主要研究了灰霾天气条件下室内外PM<sub>2.5</sub>的关联性,以及在此条件下的人员吸入暴露量,该研究成果可以为室内防霾减少人体健康危害提供一个参考。在灰霾发生时,应尽量减少外出,在室内时应尽量紧闭门窗,使用有过滤器的机械通风装置通风,尽可能地减少危害。

#### 参考文献:

[1] 段菁春,毕新慧,谭吉华,等.广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布[J].中国环境科学,2006,26(1):6-10.

[2] 刘攸弘.广州城市灰霾的出现及其警示[J].广州环境科学,2004,19(2):12-14.

[3] 中国气象局. QX/T 113-2010 霾的观测和预报等级[S].北京:气象出版社,2010.

[4] 孟紫强,张剑,杨振华,等.沙尘天气细颗粒物对呼吸及心血管系统疾病日门诊人数的影响[J].环境与职业医学,2008,25(3):225-231.

[5] KAN H D, LONDON S J, CHEN G H, et al. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China[J]. Environment International, 2007, 33(3): 376-384.

[6] SCHWARTZ J, DOCKERY D W, NEAS L M. Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1996, 46(10): 927-939.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 吕琪铭.居民建筑室内外颗粒物浓度水平及相关性研究[D].长沙:中南大学,2007.

[11] 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.

[12] PAUL J L. Assessing total human exposure to contaminants. A multidisciplinary approach[J]. Environmental Science & Technology, 1990, 24(7): 938-945.

[13] U.S. EPA. EPA/600Z-92/001. Guidelines for Exposure Assessment[S]. Washington DC: U.S. EPA, 1992.

[14] 白志鹏,贾纯荣,王宗爽,等.人体对室内外空气污染物的暴露量与潜在剂量的关系[J].环境与健康杂志,2002,19(6):425-428.

收稿日期:2013-12-25

作者简介:高军,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为建筑环境与室内空气品质。作者通讯地址:上海市曹安公路4800号同济大学机械与能源工程学院A314室,邮编:201804。