

采暖季室内外细颗粒物关系的关键影响因素分析

吴亚涛 刘兆荣[†]

北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; [†]通信作者, E-mail: zrlu@pku.edu.cn

摘要 于2014年2—3月和11—12月对室内外环境中细颗粒物进行采集和分析, 研究通风条件、大气污染水平以及温、湿度等因素对细颗粒物室内外关系的影响。研究表明, 通风条件和大气污染水平是影响细颗粒物室内外关系的重要因素, 对细颗粒物的I/O、室内外相关系数、细颗粒物的渗透因子以及大气细颗粒物对室内的贡献率均有影响, 通风条件越好, I/O越高, 室内外相关系数和室外贡献率也越大; 随着大气细颗粒物浓度的升高, 细颗粒物I/O比值有升高的趋势, 且其波动范围逐渐减小, 室内外细颗粒物之间的相关性逐渐增强, 室外贡献率逐渐增大, 但增速逐渐减缓。温、湿度均对细颗粒物室内外关系的影响较小。

关键词 室内外关系; 细颗粒物; 相关系数; I/O; 室外贡献率

中图分类号 X131

Key Factors Analysis of Indoor and Outdoor Fine Particulate Matter in Heating Season

WU Yatao, LIU Zhaorong[†]

College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University;

[†] Corresponding author, E-mail: zrlu@pku.edu.cn

Abstract Indoor and outdoor fine particulate matter were sampled and analyzed in Feb.–Mar. and Nov.–Dec., 2014. The influence of ventilation condition, atmospheric pollution level, the temperature and humidity on relationship between the indoor and outdoor fine particulate matters were studied. Studies showed that ventilation and air pollution levels were two important factors affecting the indoor and outdoor relations of PM_{2.5}, they both had effects on I/O ratio, correlation coefficient of indoor and outdoor particles as well as the contribution rate of the atmospheric PM_{2.5} concentrations on the indoor PM_{2.5} concentrations. With better ventilation condition or higher I/O ratio, indoor and outdoor correlation coefficient would be higher, as well as the outdoor contribution rate. When the atmospheric PM_{2.5} concentration went higher, the I/O ratio, indoor and outdoor correlation coefficient and outdoor contribution rate became higher, while the range of I/O ratio and the growth rate of outdoor contribution went less. The temperature and humidity had little effect on indoor and outdoor relations of PM_{2.5}.

Key words indoor and outdoor relationship; PM_{2.5}; correlation coefficient; I/O; outdoor contribution

细颗粒物是室内外最常见的污染物之一, 来源广泛, 物理、化学性质十分复杂, 如果过量存在于空气中, 会引起一系列的健康危害和腐蚀作用^[1], 可以通过呼吸进入人体的上下呼吸道, 甚至进入血液循环^[2-3], 对人体健康产生危害。此外, PM_{2.5} 对半挥发性有机物、重金属等有毒有害组分有很强的

富集能力^[4], 同时也是细菌、病毒和真菌存活的载体, 对人体健康更具危害性。

颗粒物的人体暴露同时包含室内颗粒物和大气颗粒物的暴露, 而多数空气质量监测系统是基于室外大气环境, 对于室内空气中颗粒物的监测缺乏相应数据。虽然室内污染物浓度在很大程度上受室外

污染物浓度的影响,但是,大气颗粒物环境点位浓度、住宅室内外浓度和个体暴露这 3 个因素两两之间均存在显著的差异^[5-6],因此,将室外污染物浓度直接用来评估室内人员的污染物暴露水平是不可靠的。颗粒物的室内外关系研究有利于加深室内空气质量的研究以及更加准确地评估颗粒物对人体的暴露水平。

针对颗粒物的室内外关系,研究者利用室内外污染物浓度比(I/O 比)模型进行相关研究,主要分析不同时段^[7]、不同密闭性或者通风方式的房间^[8-10]以及不同粒径^[6,10-13]之间的颗粒物 I/O 差异情况,并且根据 I/O 比值的大小初步判断室内颗粒物是由室内源产生还是来自室外^[14-18]。I/O 比在一定程度上能够体现室内外颗粒物浓度之间的关系,但是受到多种因子尤其是室内源的影响,导致不同研究中 I/O 比的差异较大,没有较为一致的结论。有学者利用质量平衡模型研究室内颗粒物浓度评估及室内外穿透、室内沉降机制^[18],如室内源和室外源对室内颗粒物的贡献^[19]。此外,有人利用 I/O 模型和质量平衡模型对污染物的影响因素进行研究,主要包括人为活动^[20]、渗透率^[21]、通风^[9,22]等因素对污染物室内外关系的影响,如谢伟等^[9]通过建立室内颗粒物质量平衡方程,对不同通风过程及不同粒径下的 I/O 比进行理论研究。

以往研究中,对细颗粒物室内外关系影响因素的分析多为理论研究,且较少涉及温湿度等气象条件和不同大气污染水平对室内外关系的影响。本研究结合 I/O 比、室外贡献率以及室内外相关系数等指标,探讨通风条件、大气污染水平以及温湿度对细颗粒物室内外关系的影响,为以后利用大气细颗粒物浓度预测室内浓度的研究提供数据支持。

1 实验方法

1.1 采样点与采样时间的选择

我们选择人员活动和通风条件有一定差别的办公室、实验室和空闲实验室作为室内研究点,3 个采样点的配置情况如表 1 所示,其中,空闲实验室的通风条件最好,实验室次之,办公室通风相对较差。采样时,设备放在桌上,距离地面约 1.1 m,与人的呼吸带接近。室外采样点设置在该室窗外 1 m 远的同高等处。

为了对比年前与年后细颗粒物的室内外相关性差异,选择冬季供暖开始和即将结束的两个时段进行采样,即 2014 年 2 月 21 日—3 月 16 日和 11 月 5 日—12 月 11 日,每日上午 09:00 至次日上午 09:00,采样时长为 24 小时。

1.2 主要仪器

采样装置为特氟龙膜、AirChek XR5000 型个体采样器(配备 PM_{2.5} 采样头),采样头为 PEM 4 Ltr/2.5 μm 型;百万分之一分析天平。

1.3 样品的采集与分析

细颗粒物样品的采集采用 AirChek XR5000 型个体采样器配合 PM_{2.5} 采样头和石英膜进行。个体采样器的流量设定为 4 L/min,采样流量在采样前和采样后用皂泡流量计进行流量校准,以保证采样期间个体采样器的流量值偏差小于 5%;采样时间为 24 小时;采样前后,采样膜均在恒温恒湿条件下平衡 24 小时后称重。

将采集的石英膜样品在恒温恒湿的条件下稳定 24 小时后称重,计算采样前后膜的质量差,结合采样流量和采样时间,计算采样点的日均细颗粒物浓度值。

表 1 室内采样点详情
Table 1 Details of indoor sampling sites

室内采样点	人数	配置	备注
办公室	4~8	办公桌(8)、电脑(8)、书架(1)、冰箱(1)、空调(1)、微波炉(1)、沙发(1)、打印机(2)	在保证人员正常出入的前提下,门尽量关闭;窗户关闭
实验室	0~3	实验桌(4)、冰箱(2)、冰柜(1)、纯水器(1)、通风橱(2)	门白天开启,晚上关闭;窗户开启 2~3 cm 缝隙,用于实验室正常换气
空闲实验室	0	实验桌(3)、大型仪器(2)、抽风机(1)	门保持关闭,但门框上方有通风纱窗;窗户开启 2~3 cm 缝隙,用于实验室正常换气

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 的浓度特征

由图 1 可知, 采样期间室内外 PM_{2.5} 浓度波动范围均较大, 室外 PM_{2.5} 浓度波动范围为 14.05~496.39 μg/m³, 涵盖优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染 6 个污染等级。类似地, 室内(办公室、实验室和空闲实验室)环境 PM_{2.5} 的浓度水平也涵盖多个污染等级, 办公室、实验室和空闲实验室内 PM_{2.5} 浓度的波动范围分别为 44.32~178.42, 80.62~396.74 和 6.66~286.86 μg/m³。

除个别采样日(2 月 27 日和 2 月 28 日, 雨天)外, 室外 PM_{2.5} 浓度值高于室内值, 同时, 在 2 月 27 日和 2 月 28 日出现室外细颗粒物的质量浓度小于室内的情况, 这说明室内外均存在细颗粒物的来源。

采样期间室内细颗粒物浓度与室外有相似的变化趋势, 说明室内细颗粒物受室外影响较大, 且通风状况越好, 影响越大, 通风条件较好的实验室内细颗粒物质量浓度高于办公室内细颗粒物的质量浓度, 表明室内外细颗粒物之间存在一定的联系。

2.2 通风条件

2.2.1 I/O 比情况

I/O 比是忽略室内浓度随室外浓度变化时滞性之后的简化计算方法, 常用于评价室内外污染物的浓度关系。I/O 比是研究污染物室内外关系的重要方法, 也是建立室内外污染物(组分)浓度回归模型的基础。

对比 3 个采样点的 I/O 比基本情况, 如表 2 所示, 办公室、实验室和空闲实验室 3 个采样点细颗

表 2 不同研究场所细颗粒物的 I/O 比值

Table 2 I/O of PM_{2.5} in different research sites

采样点	平均值	中位数	最大值	最小值
办公室	0.56±0.35	0.45	1.57	0.28
实验室	1.03±0.63	0.89	2.85	0.60
空闲实验室	0.71±0.19	0.80	0.97	0.22

粒物的 I/O 均值分别为 0.56±0.35, 1.03±0.63 和 0.71±0.19, 中位数分别为 0.45, 0.89 和 0.80, 呈现实验室>空闲实验室>办公室的规律。同时, 3 个房间的通风状况有所不同, 实验室的通风条件好于空闲实验室, 而办公室的通风状况最差。可以看出, 不同通风条件房间的 I/O 比值存在差异, 通风条件越好, I/O 值越大。

2.2.2 室内外细颗粒物的相关系数

相关系数是衡量两个随机变量之间线性相关程度的统计指标, 用以反映变量之间相关关系的密切程度。污染物的室内外相关系数是衡量室内外污染物浓度水平之间是否存在相关性以及相关性强弱的最简单和最直接的指标之一。

图 2 描述 3 个采样点细颗粒物浓度的室内外相关关系。可以看出, 空闲实验室与室外的相关性最好, 其相关系数为 0.99 ($p<0.01$), 表明空闲实验室与室外的细颗粒物呈显著相关; 办公室与室外的相关系数为 0.89 ($p<0.01$); 实验室的室内外细颗粒物之间也存在明显的正相关关系。3 个采样点室内外细颗粒物之间的相关性体现了室内细颗粒物受室外的影响程度, 总体来看, 通风条件越好, 室内外细颗粒物之间的相关性越强, 室内细颗粒物受室外环

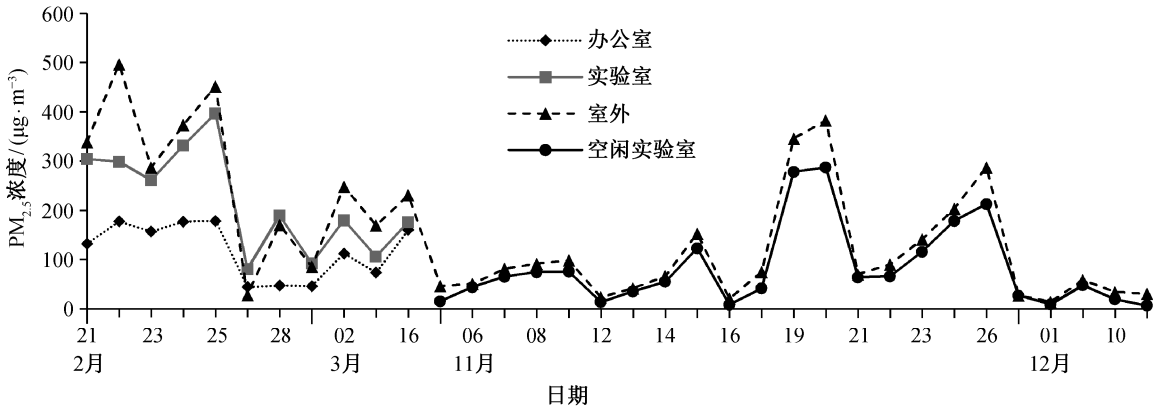


图 1 各采样点细颗粒物质量浓度的变化
Fig. 1 PM_{2.5} concentration change in sampling sites

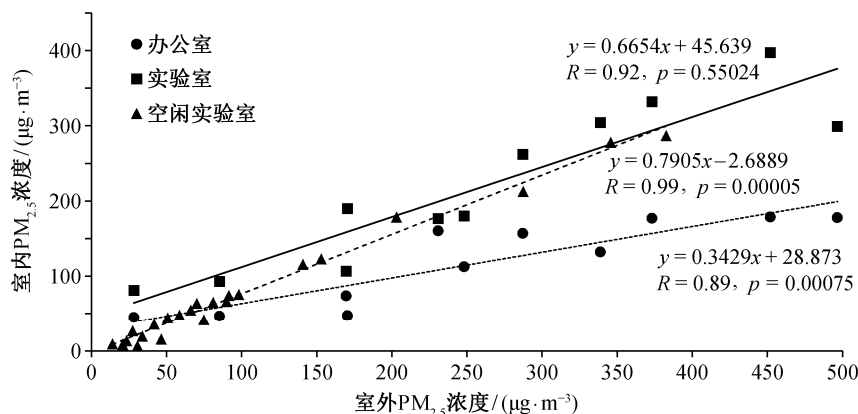


图 2 各采样点细颗粒物的室内外相关性
Fig. 2 Indoor and outdoor correlation of PM_{2.5}

境的影响越明显。

2.2.3 室外贡献率

室内空气质量平衡方程常用于研究室内污染物的浓度变化以及室内外污染物的关系。可以将室内环境看成是放置在大气环境中的、相对独立的环境舱,通过门窗和外围结构缝隙进行污染物和能量的交换。根据质量平衡模型,当假设室内污染物浓度分布均匀且忽略污染物在室内可能发生的相变和化学反应过程时,对于自然通风且没有额外的室内去除设备影响的室内环境,室内外质量平衡模型可转化为下式^[7,18]:

$$C_{in} = \frac{P\alpha C_{out}}{\alpha + k} + \frac{Q_{in}}{V(\alpha + k)} = F_{inf} C_{out} + C_{ig}, \quad (1)$$

其中, C_{in} 和 C_{out} 分别为室内外污染物的质量浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$); F_{inf} 为有效穿透因子(无量纲); C_{ig} 为室内源对室内污染水平的贡献($\mu\text{g}/\text{m}^3$); P 为渗透风对应的穿透因子(无量纲),自然通风对应的 $P=1$; V 为室内空间体积(m^3); α 为空气交换律(h^{-1}); K 为颗粒物沉降速率(h^{-1}); Q_{in} 为室内源强度或室内颗粒物排放速率($\mu\text{m}/\text{h}$)。

室外污染物的贡献率计算公式^[18]为

$$\rho = \frac{F_{inf} \cdot C_{out}}{C_{in}} \times 100\% = \frac{F_{inf} \cdot C_{out}}{F_{inf} \cdot C_{out} + C_{ig}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, ρ 为室外污染物对室内污染物的贡献率。

虽然实际条件不能完全吻合公式假设条件,但在研究颗粒物室内外关系的暴露量中,利用式(1)对实测浓度 C 和 C_0 进行线性回归,通过斜率和截距,可以简单地判断室外源和室内源分别对室内颗粒物的贡献。回归方程中的斜率可以视为颗粒物的有效穿透因子 F_{inf} 值,可以指示室外来源对室内污染水平的影响程度,其值越接近 1,表明室内颗粒物与室外环境越相似,室内外颗粒物均质性越明显; F_{inf} 值越靠近 0,表明颗粒物受室内源的贡献越大,室外穿透进入室内产生的贡献越少;若 F_{inf} 值在 0.5 左右,则表明颗粒物既有室外源贡献,也有明显的室内源贡献。

对室内外采样点细颗粒物浓度按照式(1)进行拟合,同时,根据式(2)计算室外细颗粒物对室内细颗粒物的贡献率,结果如表 3 所示。

办公室、实验室和空闲实验室 3 个采样点的有

表 3 各采样点细颗粒物的质量平衡方程及室外贡献率
Table 3 Mass balance equation and outdoor contribution rate of PM_{2.5}

采样点	回归方程	F_{inf}	$C_{ig}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	室外贡献率/%		
				最大	最小	平均
办公室	$y = 0.3429x + 28.873$	0.3429	28.873	85.50	25.14	69.63
实验室	$y = 0.6654x + 45.639$	0.6654	45.639	86.82	29.19	73.24
空闲实验室	$y = 0.7905x - 2.689$	0.7905	-2.689	131.93	100.90	107.68

效穿透因子分别为 0.3429, 0.6654 和 0.7905, 即办公室<实验室<空闲实验室; 同样, 室外源的贡献率也存在差异, 空闲实验室的室外贡献率最高, 实验室次之, 而办公室细颗粒物的室外贡献率最低。办公室的室外贡献率最低, 但是仍达 69.63%, 表明室外源是室内细颗粒物的重要来源; 空闲实验室由于不存在明显的室内源, 室外贡献率应为 100%, 可以认为室外源是其唯一来源, 但是, 由于室内无风条件下细颗粒物存在沉降作用, 使得计算出的室外贡献率超过 100%。可以看出, 通风条件越好, 有效穿透因子和室外贡献率越高。

综上所述, 通风条件是影响细颗粒物室内外关系的重要因素, 对细颗粒物的 I/O、室内外相关系数、细颗粒物的渗透因子以及大气细颗粒物对室内的贡献率均有影响。通风条件越好, 室外细颗粒物进入室内越容易, 从而导致相对较高的 I/O 比值、更加密切的室内外相关性以及更大的室外贡献。

2.3 大气浓度水平

2.3.1 I/O 比

选取空闲实验室为研究对象, 其 I/O 比与室外大气细颗粒物的浓度之间的关系如图 3 所示。

由图 3 可知, 不同的大气细颗粒物污染情况下, 细颗粒物的 I/O 比呈现不同的分布特征, 根据图 3,

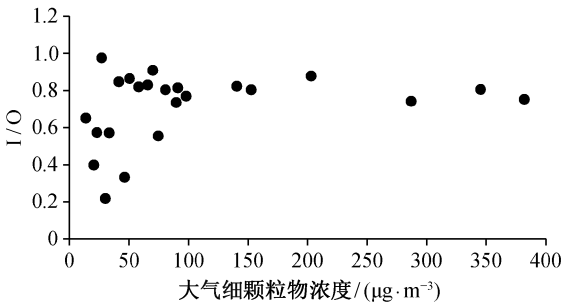


图 3 细颗粒物质量浓度与 I/O 关系
Fig. 3 Relationship between PM_{2.5} concentration and I/O

将大气细颗粒物浓度分为 0~50 µg/m³, 50~100 µg/m³ 和 100 µg/m³ 以上 3 个区间, 对各区间 I/O 比的波动范围、均值及标准差情况、大气细颗粒物与 I/O 间相关性情况进行计算, 结果如表 4 所示。

可以看出, 不同大气细颗粒物浓度区间的细颗粒物 I/O 比的波动范围以及均值情况均存在差异, 一方面, 0~50 µg/m³, 50~100 µg/m³ 和 100 µg/m³ 以上 3 个区间 I/O 比的均值分别为 0.57, 0.79 和 0.80, 表明随着大气细颗粒物浓度的升高, I/O 有变大的趋势; 另一方面, 3 个浓度区间 I/O 比的波动范围分别为 0.22~0.97, 0.55~0.91 和 0.74~0.88, 标准差分别为 0.24, 0.10 和 0.05, 均说明随着大气细颗粒物浓度的升高, 细颗粒物 I/O 比的波动范围逐渐减小。正是由于这一原因, 使得大气细颗粒物浓度与 I/O 比之间没有明显的相关性。

2.3.2 相关系数

对 0~50 µg/m³, 50~100 µg/m³ 和 100 µg/m³ 以上 3 个区间的室内外细颗粒物浓度分别做相关性分析, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 当大气细颗粒物浓度小于 50 µg/m³ 时, 室内外细颗粒物浓度之间的相关性不明显; 当细颗粒物浓度为 50~100 µg/m³ 和大于 100 µg/m³ 时, 室内外细颗粒物间存在明显的相关性, 二者的相关系数分别为 0.830 和 0.990。即, 随着大气细颗粒物浓度水平的升高, 室内外细颗粒物之间的相关系数逐渐增大。

2.3.3 室外贡献率

考虑到室外源是空闲实验室内细颗粒物的唯一来源, 其贡献率理论上为 100%, 不存在变化情况, 故在此不做讨论。实验室和办公室两采样点, 细颗粒物的室外贡献率与室外细颗粒物浓度水平之间的关系如图 5 所示。

由图 5 可知, 两个室内采样点细颗粒物浓度的室外贡献率随着室外细颗粒物浓度的升高而逐渐增

表 4 不同大气细颗粒物浓度区间 I/O 比情况及大气细颗粒物与 I/O 的相关性

Table 4 I/O ratio and the correlation between atmospheric PM_{2.5} and I/O in different atmospheric PM_{2.5} concentration intervals

大气细颗粒物浓度/ (µg·m ⁻³)	I/O			大气 PM _{2.5} 与 I/O 的相关系数	
	波动范围	均值	标准差	<i>r</i>	<i>p</i>
0~50	0.22~0.97	0.57	0.24	-0.090	0.833
50~100	0.55~0.91	0.79	0.10	-0.312	0.414
>100	0.74~0.88	0.80	0.05	-0.576	0.231
总体	0.22~0.97	0.71	0.19	0.279	0.197

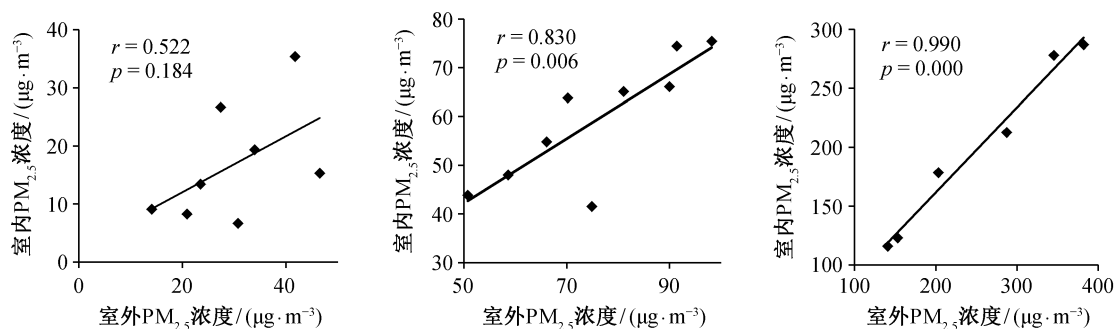


图 4 不同大气细颗粒物浓度区间室内外细颗粒物的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of indoor and outdoor fine particulate matter in different $PM_{2.5}$ intervals

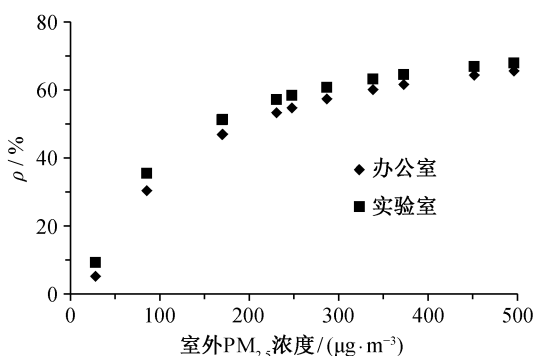


图 5 实验室和办公室 $PM_{2.5}$ 的室外贡献率与室外 $PM_{2.5}$ 浓度水平之间的关系

Fig. 5 Relationship between outdoor $PM_{2.5}$ concentration and outdoor contribution rate of $PM_{2.5}$ in lab and office

大,即室外贡献率与室外细颗粒物的浓度水平正相关。同时,室外贡献率的变化速率与大气细颗粒物的浓度水平有关,当大气细颗粒浓度相对较低时($PM_{2.5}<200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),随着大气细颗粒物浓度的升高,室外贡献率升高较快;当大气细颗粒物浓度较高时,随着大气细颗粒物浓度的升高($PM_{2.5}>200\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$),室外贡献率升高较慢。

综上所述,大气污染水平是影响细颗粒物室内外关系的重要因素,对细颗粒物的 I/O、室内外相关系数和大气细颗粒物对室内的贡献率均有影响。随着大气细颗粒物浓度的升高,细颗粒物 I/O 比值有升高的趋势,且其波动范围逐渐减小,室内外细颗粒物之间的相关性逐渐增强,室外贡献率逐渐增大,但增速逐渐减缓。

2.4 温湿度因素

室外温度和湿度数据列于表 5。

大气温湿度是通过影响大气细颗粒物浓度水平,间接对其室内外关系产生影响。温湿度与细颗

表 5 空闲实验室室外温湿度

Table 5 Outdoor temperature and humidity of idle lab

采样日期	室外湿度/%			室外温度/ $^{\circ}\text{C}$		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均
11-05	42.0	15.0	28.5	18.0	5.0	11.5
11-06	80.0	20.0	50.0	12.0	6.0	9.0
11-07	100.0	41.0	70.5	10.0	2.0	6.0
11-08	100.0	29.0	64.5	12.0	2.0	7.0
11-09	100.0	26.0	63.0	14.0	0.0	7.0
11-12	80.0	25.0	52.5	8.0	-2.0	3.0
11-13	90.0	16.0	53.0	13.0	-1.0	6.0
11-14	63.0	18.0	40.5	13.0	3.0	8.0
11-15	84.0	38.0	61.0	9.0	0.0	4.5
11-16	87.0	30.0	58.5	11.0	1.0	6.0
11-17	96.0	16.0	56.0	11.0	0.0	5.5
11-19	-	-	-	10.0	0.0	5.0
11-20	100.0	56.0	78.0	12.0	0.0	6.0
11-21	85.0	16.0	50.5	12.0	-1.0	5.5
11-22	86.0	20.0	53.0	11.0	0.0	5.5
11-23	-	-	-	8.0	0.0	4.0
11-25	93.0	52.0	72.5	9.0	-2.0	3.5
11-26	-	-	-	8.0	-1.0	3.5
11-30	25.0	11.0	18.0	6.0	2.0	4.0
12-01	70.0	20.0	45.0	-1.0	-6.0	-3.5
12-02	70.0	20.0	45.0	2.0	-7.0	-2.5
12-10	-	-	-	5.0	-3.0	1.0
12-11	37.0	16.0	26.5	3.0	-5.0	-1.0

注: - 表示无可用数据。

颗粒物之间的相关性如表 6 所示。

由表 6 可知,最低湿度和平均湿度与细颗粒物浓度之间正相关,相关系数分别为 0.814 和 0.644

表 6 温湿度与细颗粒物质量浓度之间的相关系数
Table 6 Correlation coefficient between humidity and PM_{2.5} concentration

温湿度	样品个数	相关系数	P
最高湿度	19	0.442	0.058
最低湿度	19	0.814**	0.000
平均湿度	19	0.644**	0.003
最高温度	23	0.162	0.461
最低温度	23	0.042	0.851
平均温度	23	0.117	0.594

注: ** $p \leq 0.01$ 。

($p \leq 0.01$), 而温度和最高湿度与细颗粒物浓度之间没有明显的相关性。这表明, 温度和最高湿度对细颗粒物的室内外关系没有明显影响; 平均湿度和最低湿度条件下, 由于与细颗粒物浓度之间存在一定的相关性, 对细颗粒物的室内外关系可能产生影响。

计算温湿度与室外贡献率之间的相关系数, 结果如表 7 所示。可以看出, 温湿度与室外贡献率之间均没有明显的相关性, 但是最小湿度和平均湿度与室外贡献率的相关系数明显大于其他值, 说明最小湿度和平均湿度与大气细颗粒物浓度之间存在一定的相关性。

表 8 显示温湿度与细颗粒物的 I/O 比之间的相

表 7 温湿度与室外贡献率之间的相关系数
Table 7 Correlation between the temperature/humidity and outdoor contribution rate

采样点	湿度			温度		
	最大	最小	平均	最高	最低	平均
办公室	0.178	0.566	0.524	-0.152	-0.147	-0.161
实验室	0.159	0.549	0.502	-0.140	-0.153	-0.154

表 8 温湿度与细颗粒物 I/O 之间的相关系数
Table 8 Correlation coefficient between humidity and I/O of PM_{2.5}

温湿度	样品个数	相关系数	p
最高湿度	19	0.299	0.213
最低湿度	19	0.176	0.471
平均湿度	19	0.284	0.238
最高温度	23	0.066	0.765
最低温度	23	0.159	0.469
平均温度	23	0.111	0.615

关系数, 可以看出, 温度和湿度均与细颗粒物 I/O 之间没有明显的相关性。

综上所述, 虽然最小湿度和平均湿度与细颗粒物浓度之间存在一定的相关性, 但是, 温、湿度均与细颗粒物的 I/O 以及室外贡献率等没有明显的相关性, 表明温湿度的大小及变化不能用来衡量细颗粒物的室内外相关性的强弱或者变化。

3 结论

1) 通风条件是影响细颗粒物室内外关系的重要因素, 对细颗粒物的 I/O、室内外相关系数、细颗粒物的渗透因子以及大气细颗粒物对室内的贡献率均有影响, 通风条件越好, I/O 越高, 室内外相关系数和室外贡献率也越大。

2) 大气污染水平是影响细颗粒物室内外关系的重要因素, 随着大气细颗粒物浓度的升高, 细颗粒物 I/O 比值有升高的趋势, 且其波动范围逐渐减小, 室内外细颗粒物之间的相关性逐渐增强, 室外贡献率逐渐增大, 但增速逐渐减缓。

3) 最小湿度和平均湿度与细颗粒物浓度之间存在一定的相关性, 但是, 温、湿度均对细颗粒物的 I/O 以及室外贡献率等没有明显的相关性, 表明温湿度因素的大小及变化不能用来衡量细颗粒物的室内外相关性的强弱或者变化。

参考文献

- [1] Mosley R B, Greenwell D J, Sparks L E, et al. Penetrations of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Science and Technology*, 2001, 34(1): 127-136
- [2] Li Y, Leung G M, Tang J W, et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment — a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air*, 2007, 17(1): 2-18
- [3] Zhou D, Zhao C Y, Tian Y. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 2012, 92(4): 593-605
- [4] 何飞, 白志鹏, 张杰峰, 等. 住宅室内外空气中颗粒物及无机元素的分布特征及关系. *环境与健康杂志*, 2012, 29(4): 314-319
- [5] Yeh S, Small M J. Incorporating exposure models in probabilistic assessment of the risks of premature mortality from particulate matter. *J Expo Sci Environ*

- Epidemic, 2002, 12(6): 389–403
- [6] Weisel C P, Zhang J, Turpin B J, et al. Relationships of indoor, outdoor and personal air (RIOPA). Part I. Collection methods and descriptive analyses. Research Report (Health Effects Institute), 2005, 130(Pt 1): 1–107
- [7] 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. 中国环境科学, 2013, 33(2): 357–364
- [8] 陈治清, 林忠平, 朱卫华, 等. 两典型办公室室内颗粒物浓度监测与分析. 建筑热能通风空调, 2014, 33(3): 12–17
- [9] 谢伟, 樊越胜, 李博文, 等. 通风对室内外颗粒物浓度关系的影响分析. 洁净与空调技术, 2012(4): 19–21
- [10] 亢燕铭, 钟珂, 柴士君. 上海地区空调房间夏季室内外颗粒物浓度变化特征. 过程工程学报, 2006, 6(2): 46–50
- [11] 高军, 房艳兵, 江畅兴, 等. 上海地区冬季住宅室内外颗粒物浓度的相关性. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 110–114
- [12] Wen Y G, Lian Z W, Ye X J, et al. Relationship between Outdoor and Indoor PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 in Apartment and Office Buildings. Journal of Donghua University (English Edition), 2008, 25(3): 334–339
- [13] 严丽, 刘亮, 谢伟, 等. 西安市商场建筑室内外颗粒物污染状况调查. 环境工程, 2013(S1): 642–644
- [14] 王媛. $PM_{2.5}$ 的监测技术及现状. 科技致富导向, 2013(17): 52
- [15] 项琳琳, 刘东, 左鑫. 上海某办公建筑 $PM_{2.5}$ 浓度分布及影响因素的实测研究. 建筑节能, 2015(3): 85–91
- [16] 徐亚, 赵金平, 陈进生, 等. 室内空气中颗粒物污染特征研究. 环境污染与防治, 2011, 33(1): 52–56
- [17] 樊景森, 邵龙义, 王静, 等. 云南宣威燃煤室内可吸入颗粒物质量浓度变化特征. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1379–1383
- [18] 张杰峰, 白志鹏, 丁潇, 等. 空气颗粒物室内外关系研究进展. 环境与健康杂志, 2010, 27(8): 737–741
- [19] Hoek G, Kos G, Harrison R, et al. Indoor-outdoor relationships of particle number and mass in four European cities. Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 156–169
- [20] 武辉, 钱志强. 室内外多环芳烃及 PM_{10} 的测量与分析. 太原理工大学学报, 2002, 33(1): 19–22
- [21] Jones N C, Thornton C A, Mark D, et al. Indoor/outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside, urban and rural locations. Atmospheric Environment, 2000, 34(16): 2603–2612
- [22] Lidia M, He C R, Jane H, et al. The relationship between indoor and outdoor airborne particles in the residential environment. Atmospheric Environment, 2001, 35(20): 3463–3472