

长春供暖季室内外 PM_{2.5} 浓度垂直分布与分析^{*}

白 莉^{1,2} 贺梓健^{1,2} 陈琬玥¹

(1. 吉林建筑大学市政与环境工程学院, 吉林 长春 130118;

2. 吉林建筑大学松辽流域水环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130118)

摘要 为研究严寒地区供暖季室内外 PM_{2.5} 浓度的垂直分布, 在供暖季分别对长春某高层居住建筑 1、8、15、24、33 楼层的室内外 PM_{2.5} 浓度进行监测, 研究不同楼层室内外 PM_{2.5} 的浓度与变化特征。采用随机组分重叠模型(RCS)方法研究各楼层 PM_{2.5} 渗透因子, 采用逐步回归分析方法研究室内 PM_{2.5} 浓度的各影响因素。结果表明: 在供暖季, 长春市高层建筑的不同楼层均存在一定的 PM_{2.5} 污染, 室内外 PM_{2.5} 浓度随楼层升高大体呈现减小的趋势, 但差异不显著。室内外 PM_{2.5} 浓度存在显著的相关性($P < 0.05$), 在没有室内污染源时, 室外颗粒物渗透是室内污染的主要来源。室内 PM_{2.5} 浓度与房间面积等没有显著相关性。

关键词 室内空气质量 PM_{2.5} 建筑层高 浓度

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.04.017

Vertical distribution and analysis of indoor and outdoor PM_{2.5} concentration during heating season in Changchun BAI Li^{1,2}, HE Zijian^{1,2}, CHEN Wanyue¹. (1. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun Jilin 130118; 2. Key Laboratory of Songliao Aquatic Environment, Ministry of Education, Jilin Jianzhu University, Changchun Jilin 130118)

Abstract: In order to study the vertical distribution of indoor and outdoor PM_{2.5} concentration in cold area during heating season, the indoor and outdoor PM_{2.5} concentrations of 1, 8, 15, 24 and 33 floors of a high-rise residential building in Changchun were monitored during heating season. The mass concentration and variation characteristics of indoor and outdoor PM_{2.5} in different floors were studied. Random component overlapping model (RCS) was used to study the permeability factors of PM_{2.5} in each floor, and stepwise regression analysis was used to study the influencing factors of indoor PM_{2.5} concentration. The results showed that serious PM_{2.5} pollution existed in different floors of high-rise buildings in Changchun during heating season, and the indoor and outdoor PM_{2.5} concentration decreased with the rise of floors, but the difference was not significant. There was a significant correlation between indoor and outdoor PM_{2.5} concentration ($P < 0.05$). When there was no indoor pollution source, outdoor particulate matter infiltration was the main indoor source. Indoor PM_{2.5} concentration had no significant correlation with room area and other factors.

Keywords: indoor air quality; PM_{2.5}; building height; concentration

PM_{2.5} 是城市环境的主要污染物^[1], 近年来随着城市化进程的加快与经济的快速发展, 由城市人口、建筑、工业与交通等因素导致的大气雾霾日益严重。特别在东北地区冬季温度低, 供暖季燃烧煤炭、秸秆会产生大量颗粒物。同时大部分居住建筑的门窗与围护结构的气密性较差^[2-3], 室外空气中 PM_{2.5} 可轻易进入室内, 导致室内 PM_{2.5} 浓度增加, 室内空气质量下降。PM_{2.5} 可通过呼吸作用进入人体, 对人类健康有极大的潜在威胁。研究表明, 人的一生超过 80% 的时间是在室内度过的^[4], 长时间暴露于高浓度 PM_{2.5} 的人群, 肺炎、肺癌、心脏病及心脑血管的患

病率会出现显著升高^[5-11]。

居住建筑是人类最重要的庇护所, 随着生活水平的提高, 人们对健康居住环境的需求日益强烈。同时伴随城市人口的增加与土地资源的稀缺, 密集化、高层化建筑已成为城市化发展的象征, 其带来的城市环境问题同样不容忽视^[12]。随着城市由“横向型”拓增转向“纵向型”增长, 专家学者对不同高层建筑 PM_{2.5} 的研究逐渐深入^[13-16]。本研究以长春地区的高层居住建筑为研究对象, 对其室内外 PM_{2.5} 进行监测与分析, 探究供暖季不同楼层 PM_{2.5} 的浓度水平与变化特征。

第一作者: 白 莉, 女, 1964 年生, 博士, 教授, 研究方向为室内空气质量、绿色建筑。

^{*} 国家重点研发计划项目(No.2017YFC0702700)。

1 研究方法

1.1 采样地点与时间

长春位于东北平原腹地,由于地理位置、汽车保有量持续上涨、供暖季较长、城市周边焚烧农作物等一系列因素,导致长春秋冬季空气质量不理想。本研究于2019年1月,对长春绿园区竣工后使用2年的居住建筑进行室内外PM_{2.5}监测。该建筑主体高度99.4 m,地下2层,地上33层。由于实验设备及条件的局限性,无法对全部楼层进行监测,本研究选择的监测楼层分别为1、8、15、24、33层,室内外监测点分别为居民家中的房间与露天防火通道。人员活动是室内颗粒物的主要来源^[17-18],为避免室内源对监测结果的干扰,监测期间尽量减少所监测的房间内人员活动并始终保持房间门窗紧闭。监测房间的相关信息如表1所示。

1.2 实验仪器

选取LD-6SR激光粉尘监测仪实现对PM_{2.5}的监测,该仪器能有效减小湿度的干扰,采样流量为2 L/min,采样滤膜为Φ40 mm石英纤维滤膜。监测过程严格按照《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)中关于室内PM_{2.5}测点的相关规定,采样点布置在距外窗1 m、离相应楼层地面高度0.6 m处,每天监测时间为12 h(8:00—20:00),采样时间为9 min,间隔为1 min。

1.3 方法

采用随机组分重叠模型(RCS)的方法计算各楼层的渗透因子^[19]。其计算公式见式(1)。

$$C_{in} = F_{inf} \times C_{out} + C_0 \quad (1)$$

式中: C_{in} 为室内PM_{2.5}质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; F_{inf} 为PM_{2.5}从室外进入室内的渗透因子; C_{out} 为室外PM_{2.5}质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; C_0 为室内源产生的PM_{2.5}质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

由于所监测的房间绝大部分时间处于无人状态,且没有室内污染源,所以 C_0 近似为0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,故 F_{inf} 计算见式(2)。

$$F_{inf} = \frac{C_{in}}{C_{out}} \quad (2)$$

采用SPSS 24软件进行统计,采用方差分析法检验不同楼层室内外PM_{2.5}浓度的差异性,采用双变量回归分析方法分析室内外浓度之间的相关性,采用线性分析方法分析不同楼层与颗粒物浓度及渗透因子的相关性,运用逐步回归分析来检验室内PM_{2.5}浓度与各因素之间的相关性,所有分析均以 $P < 0.05$ 作为判断差异有统计学意义的标准。

2 结果

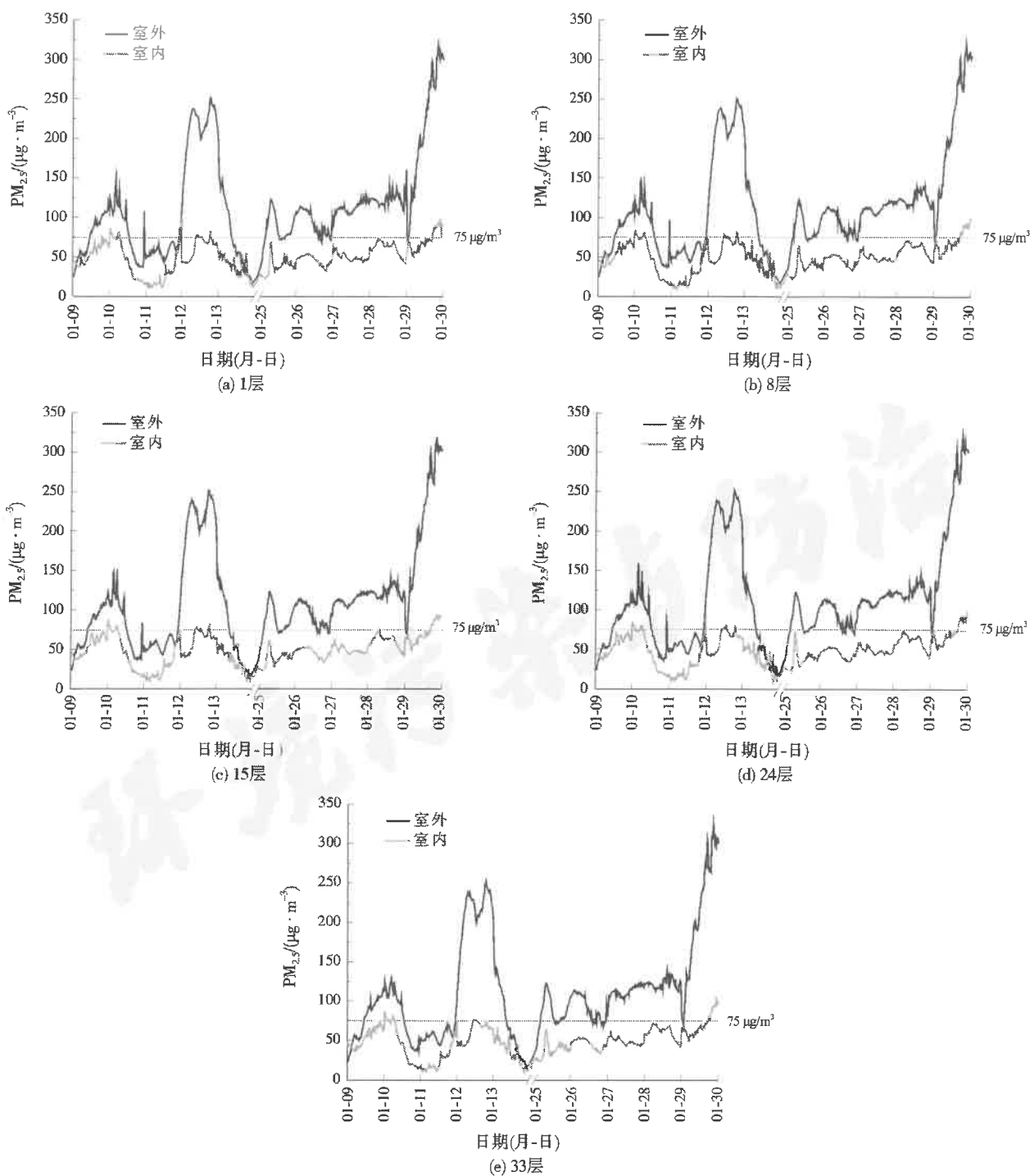
2.1 不同楼层室内外PM_{2.5}浓度

不同楼层所监测的室内外PM_{2.5}质量浓度变化曲线如图1所示。长春采暖季建筑室内外均存在PM_{2.5}污染,且室外PM_{2.5}污染更为严重。5个楼层的室外PM_{2.5}浓度整体高于室内浓度,并且室内PM_{2.5}浓度随室外的变化而变化。不同楼层室内外PM_{2.5}浓度峰值、谷值波动变化曲线基本一致,但精细的变化曲线不完全相同。对各楼层监测数据进行相关性分析,5个楼层的室内外PM_{2.5}浓度都具有显著的相关性($P < 0.05$)。

监测期间室内外PM_{2.5}平均质量浓度如表2所示。高层建筑室内外PM_{2.5}浓度总体变化趋势随着楼层的升高而降低,这一结论与文献[20]至文献[22]的研究一致。然而在15~24层之间,PM_{2.5}浓度随着楼层升高呈递增趋势,24~33层又随之下落,董俊刚等^[23]曾得出随着楼层增加,室外空气中总悬浮颗粒物呈现先减少后增加又减少的结论。不同楼层的室内外PM_{2.5}浓度无显著性差异。经统计计算,1层室外PM_{2.5}质量浓度相对较高((113.74±63.72) $\mu\text{g}/\text{m}^3$),33层质量浓度相对较低((112.25±63.80) $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。参照《环境空气质量标准》(GB 3095—2012),当质量浓度 $\geq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时定义为污染浓度,5个楼层的室外PM_{2.5}浓度大部分时间处于超标状态,而室内PM_{2.5}浓度也有部分时段存在超标。

表1 监测房间概况
Table 1 Overview of monitoring rooms

楼层	房间面积/ m^2	房间体积/ m^3	楼层地面高度/m	家庭人数	房屋朝向
1	10.0	29.0	1.5	2	北
8	12.0	34.8	22.5	5	北
15	10.0	29.0	43.5	3	北
24	14.0	40.6	70.5	3	南
33	10.0	29.0	97.5	3	北



注: 01-09 表示 1 月 9 日 0:00, 其余类推。

图 1 不同楼层室内外 PM_{2.5} 质量浓度变化曲线

Fig.1 Variation curve of indoor and outdoor PM_{2.5} mass concentration in different floors

表 2 不同楼层室内外 PM_{2.5} 平均质量浓度及渗透因子

Table 2 Indoor and outdoor PM_{2.5} average mass concentrations and penetration factors of different floors

监测楼层	室外 PM _{2.5} / (μg · m ⁻³)	室内 PM _{2.5} / (μg · m ⁻³)	渗透因子
1	113.74 ± 63.72	51.65 ± 18.38	0.504
8	113.39 ± 63.79	49.39 ± 18.29	0.500
15	112.78 ± 63.73	48.82 ± 18.23	0.494
24	113.04 ± 63.62	49.09 ± 18.21	0.497
33	112.25 ± 63.80	48.59 ± 18.29	0.493

2.2 不同楼层室内外 PM_{2.5} 浓度关系

各楼层室内外 PM_{2.5} 质量浓度线性回归曲线如图 2 所示。对室内外 PM_{2.5} 浓度进行 *t* 检验后发现, 各楼层的室内与室外 PM_{2.5} 浓度均存在显著的相关性, 这说明在没有室内污染源的情况下, 室内 PM_{2.5} 主要来源于室外 PM_{2.5} 的渗透, 这与文献[24]、[25]的研究结果一致。5 个楼层的渗透因子分别为 0.504、0.500、0.494、0.497、0.493, 没有显著性差异 ($P>0.05$), 说明所监测的高层建筑各楼层房间气密性趋近于相同。

2.3 室内 PM_{2.5} 浓度影响因素

关于楼层地面高度与颗粒物浓度的关系说法较

多, 部分研究认为楼层地面高度会对室内 PM_{2.5} 浓度产生影响, 其两者之间存在一些关系^[26]; 部分研究认为两者之间不存在直接关系, 而是与天气有关^[27-28]。本研究对可能影响室内 PM_{2.5} 浓度的变量进行逐步回归分析, 其中室外 PM_{2.5} 浓度为自变量, 楼层、房间面积、房间体积、楼层地面高度、房屋朝向为协变量, 分析结果如表 3 所示。除室内外 PM_{2.5} 浓度有显著相关性外, 与其他协变量均无显著相关性。室内 PM_{2.5} 浓度与楼层、楼层地面高度存在微弱的负相关性, 与房间面积、体积存在微弱的正相关。

以统计结果作为参考进行分析。随着楼层升高, 室内外 PM_{2.5} 浓度大致呈递减趋势的原因可能

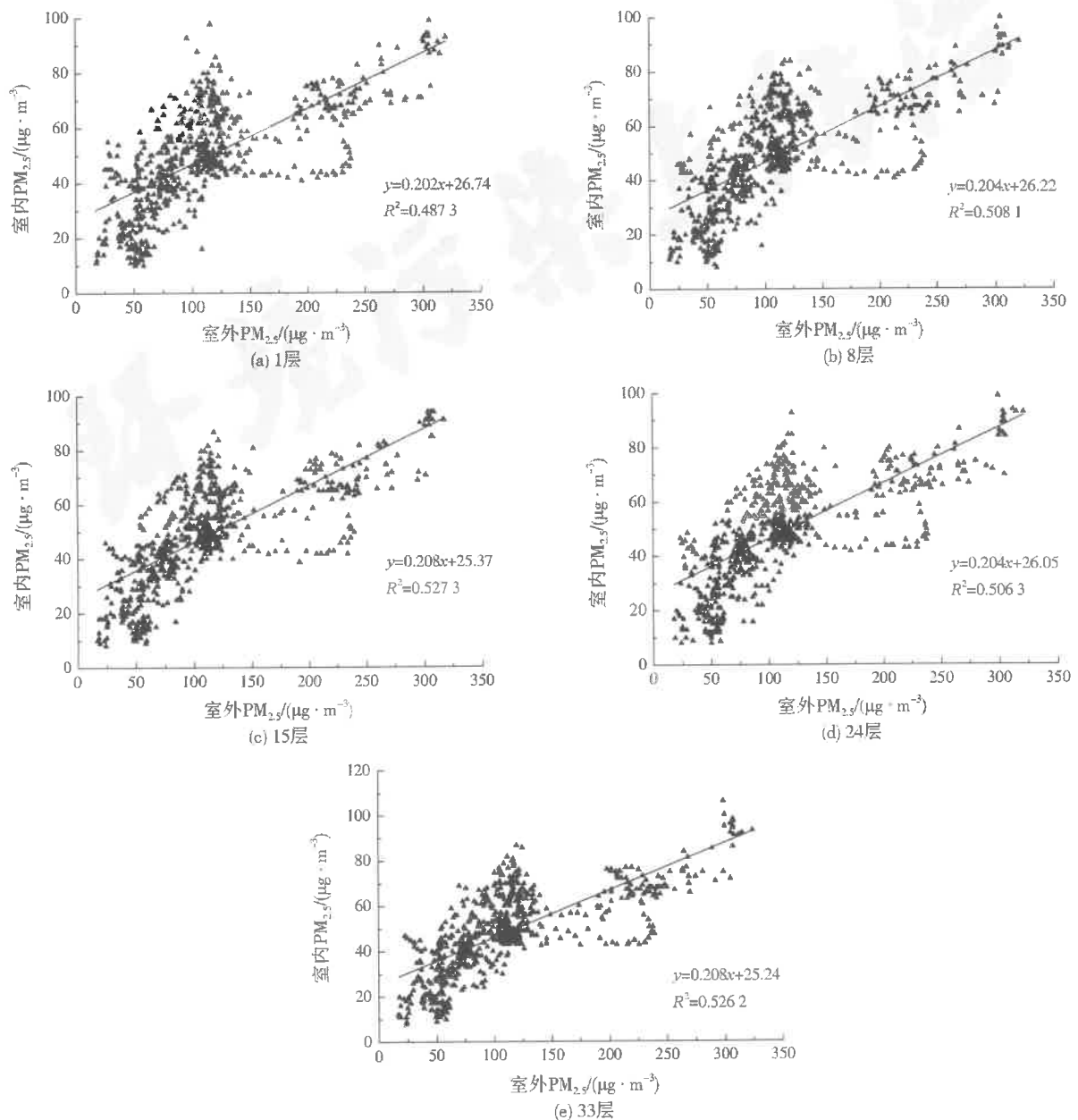


图 2 不同楼层室内外 PM_{2.5} 质量浓度线性回归曲线

Fig.2 Linear regression curve of indoor and outdoor PM_{2.5} mass concentration in different floors

表 3 影响室内 PM_{2.5} 浓度的多因素分析结果
Table 3 Multi-factor analysis results affecting indoor PM_{2.5} concentration

项目	室外 PM _{2.5} 浓度	楼层	房间面积	房间体积	楼层地面高度	房屋朝向
显著性水平	0	0.254	0.855	0.855	0.254	0.952
偏相关系数	0.715	-0.019	0.003	0.003	-0.019	-0.001

与近地面污染源较多,高层室外空气动力学条件充足有关^[29]。处于近地面的较低楼层更容易受到汽车尾气、人员活动的影响,造成室外 PM_{2.5} 浓度较高,进而影响室内空气质量。徐曼等^[30]研究发现,静风天气时近地面 PM_{2.5} 的累积尤为明显。当颗粒物与水气结合时,其质量变大,同时更易与其他颗粒物相结合,高空的颗粒物会在重力作用下沉降到低空位置,造成较低楼层的 PM_{2.5} 浓度高于较高楼层^[31]。本次监测结果显示,24 层的室内外浓度高于 15 层与 33 层,这与 PM_{2.5} 浓度与楼层呈负相关的结论产生矛盾。造成这一现象的原因可能是由于 24 层监测的房屋外窗朝向为南,其余 4 个楼层的房屋外窗朝向为北,而冬季风为东北风,朝南的房间处于背风处,不利于室外 PM_{2.5} 浓度的扩散,进而造成室内浓度升高。

在供暖季,当雾霾天气出现时,室内 PM_{2.5} 浓度升高,室内空气质量降低。房间面积、楼层、房屋朝向等因素无法改善室内空气质量。同时自然通风会造成室外 PM_{2.5} 大量进入室内,加剧室内 PM_{2.5} 污染,建议安装新风系统或使用空气净化器等方法,对室内 PM_{2.5} 进行人为干预,来达到降低室内 PM_{2.5} 浓度、提高室内空气质量的目的。

3 结 论

(1) 供暖期间,长春地区高层建筑的室内外 PM_{2.5} 浓度水平较高。高层建筑室内外 PM_{2.5} 浓度具有显著相关性,在没有室内污染源的情况下,室内 PM_{2.5} 主要来源于室外渗透,不同楼层的渗透因子没有显著差异。

(2) 高层建筑的室内外 PM_{2.5} 浓度随楼层增加大体呈现减小趋势,但差异并不显著;室内 PM_{2.5} 浓度与房间面积、体积呈现不显著的正相关。

参考文献:

- [1] KIM Y M, HARRAD S, HARRISON R M. Concentrations and sources of VOCs in urban domestic and public microenvironments[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(6): 997-1004.
- [2] 季永明,端木琳.建筑围护结构空气渗透量预测模型[J].门窗, 2016(2): 25-29.
- [3] 李国磊.严寒地区冬季超高层居住建筑热压通风特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [4] 于丹,张雪,李冉.室内 PM_{2.5} 暴露水平影响研究[J].科学技术与工程, 2016, 16(12): 308-311.
- [5] POPE III C A, BURNETT R T, THUN M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. The Journal of the American Medical Association, 2002, 287(9): 1132-1141.
- [6] ANENBERG S C, HOROWITZ L W, TONG D Q, et al. An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling[J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(9): 1189-1195.
- [7] CHEN H, GOLDBERG M S, VILLENEUVE P J. A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases[J]. Reviews on Environmental Health, 2008, 23(4): 243-297.
- [8] LEPEULE J, LADEN F, DOCKERY D, et al. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard Six Cities study from 1974 to 2009[J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(7): 965-970.
- [9] BROOK R D, RAJAGOPALAN S, POPE C A, et al. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease[J]. Circulation, 2010, 121(21): 2331-2378.
- [10] YANG G, WANG Y, ZENG Y, et al. Rapid health transition in China, 1990-2010: findings from the global burden of disease study 2010[J]. Lancet, 2013, 381(9882): 1987-2015.
- [11] 王德庆,王宝庆,白志鹏. PM_{2.5} 污染与居民每日死亡率关系的 Meta 分析[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(6): 529-532.
- [12] 周叶. 自然通风建筑不同楼层热与污染物的传输行为与特性[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [13] 张雪梅. 广州某区 PM_{2.5} 和大气污染物质量浓度的日变化特征及其相关性分析[J]. 广州环境科学, 2017, 32(1): 8-11.
- [14] 周晶,贾海红,张东成,等. 室内空气污染的动态效应研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2005, 15(11): 1307-1308.
- [15] 孔春霞,郭胜利,汤莉莉. 南京市生活区夏秋季节大气颗粒物垂直分布特征[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(11): 35-38.
- [16] 刘昌伟,赵勇,苗蕾,等. 城市高层建筑大气颗粒物污染和噪声垂直分布特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1793-1797.
- [17] 熊志明,张国强,彭建国,等. 室内可吸入颗粒物污染研究现状[J]. 暖通空调, 2004, 34(4): 32-36.
- [18] 赵彬,陈玖玖,李先庭,等. 室内颗粒物的来源、健康效应及分布运动研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(1): 65-68.

(下转第 513 页)

