

Study on the Correlation between Indoor and Outdoor Particulate Matter of Typical Cities in Severe Cold Regions of China

Haifeng Wang¹, Yang Lv^{1*}, Shanshan Wei², Bin Chen¹, Tingfeng Wu¹, Tong Liu¹, Lei Zhang³, Qi Zhao³, Nan Li⁴

¹College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

²Elephant Architectural Design Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

³College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing Heilongjiang

⁴Liaoning Institute of Marine Fisheries Science, Dalian Liaoning

Email: *lvyang@dlut.edu.cn

Received: Aug. 3rd, 2017; accepted: Aug. 17th, 2017; published: Aug. 23rd, 2017

Abstract

At present, more and more attention has been paid to indoor particulate matter pollution, while outdoor fog and haze will seriously affect indoor air quality. In order to study the correlation and influencing factors of indoor and outdoor particulate matter concentration of severe cold areas in summer, a total of 110 households in four types of buildings (Offices, Classrooms, Rural houses and Urban houses) in Daqing area were measured and analysed with online monitors. The results show that the overall air quality of Daqing area in summer is good. There is a clear linear relationship between indoor and outdoor particles. The infiltration coefficient can be used to represent the degree of their correlation. For offices and urban dwellings, the infiltration coefficients are 0.7214 and 0.7499. Due to the air exchange rate higher, the classroom and rural housing show a slightly higher infiltration coefficient, 0.9217 and 0.9019. Therefore, about 70% of the indoor particulate matter is from the outside for natural ventilation-based buildings in summer. There is a significant positive correlation between indoor particulate matter concentration and indoor and outdoor temperature and humidity ($p < 0.05$); however, it is still various in different types of buildings. For O1 office buildings and classrooms, the external walls are glasses, hence indoor and outdoor temperature has greater impact on the indoor particulate matter concentration. While the rest of the building with concrete wall structure is mainly affected by the relative humidity. According to the time-activity model, the daily exposure level can be obtained. The results showed that the average exposure was $21.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for the urban population. For rural people, the average exposure was $25.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The potential dose of exposure between different sexes varies according to respiratory intensity, and the potential dose of male exposure is 1.2 times higher than that of female.

Keywords

Indoor and Outdoor Particle Correlation, Natural Ventilation, Infiltration Coefficients, Correlation Analysis, Exposure Evaluation

*通讯作者。

我国严寒地区典型城市室内外颗粒物相关性研究

王海峰¹, 吕 阳^{1*}, 魏山山², 陈 滨¹, 吴庭枫¹, 刘 彤¹, 张 雷³, 赵 琦³, 李 楠⁴

¹大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连

²大象建筑设计有限公司, 浙江 杭州

³东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆

⁴辽宁省海洋水产科学研究院, 辽宁 大连

Email: *lvyang@dlut.edu.cn

收稿日期: 2017年8月3日; 录用日期: 2017年8月17日; 发布日期: 2017年8月23日

摘 要

目前, 室内颗粒物污染越来越受到社会的重视, 而室外雾霾天气则会严重影响室内的空气质量。本文为研究严寒地区夏季室内外颗粒物浓度的相关性和影响因素, 利用颗粒物在线监测仪在夏季对大庆地区四类建筑类型(办公室、教室、农村住宅和城市住宅)共110户进行了实测与分析。结果发现, 夏季大庆地区整体空气质量较好。室内外颗粒物之间存在着明显的线性关系, 渗透系数可用来表示它们相关性的。对于办公室和城市住宅, 渗透系数为0.7214和0.7499。而对于教室和农村住宅, 通风换气次数较高, 渗透系数略高一些, 0.9217和0.9019。因此, 夏季以自然通风为主的建筑, 大约有70%以上的室内颗粒物是来自于室外。而且室内颗粒物浓度还与室内外温湿度之间存在着显著的正相关性($p < 0.05$), 但不同类型建筑之间存在着明显的差别。对于O1类办公建筑建筑以及教室, 外墙以玻璃为主, 室内外温度的影响更大一些。对于其余建筑, 以混凝土墙体结构为主, 受相对湿度的影响较大。按照时间-活动模式分别求得每天的暴露水平, 结果发现: 对于城市人群, 平均暴露量 $21.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。对于农村人群, 平均暴露量为 $25.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。不同性别之间暴露潜在剂量由于呼吸强度的不同也存在差异, 男性暴露的潜在剂量比女性高1.2倍。

关键词

室内外颗粒物相关性, 自然通风, 渗透因子, 相关性分析, 暴露评价

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 介绍

近年来, 我国工业、建筑业和交通业得以快速的发展, 但也造成了工业尾气、建筑粉尘和汽车尾气等有毒有害气体的排放, 大气环境面临前所未有的压力。2015 年全球疾病负担, 伤害和风险因素研究(GBD 2015)明确表明空气污染是全球疾病负担的主要原因, 尤其是在低收入和中等收入国家[1]。调查显示全国超过 75%的城市空气质量达不到《国家空气质量标准》中相应指标[2]。

人体可吸入颗粒物(PM₁₀, PM_{2.5})是我国大多数城市的首要污染物, 特别对于细颗粒物(PM_{2.5}), 由于粒径小且表面积大, 携带大量有毒有害物质, 途径鼻腔深入肺部, 甚至渗透进入血液, 从而导致呼吸系统免疫力下降[3]。越来越多的流行病学表明人体发病率以及死亡率与颗粒物的质量浓度存在正相关性[4], 2012年世界卫生组织(WHO)发布的《2010年全球疾病负担评估》指出, 在导致全球过早死亡的67种主要风险因子中, 大气PM_{2.5}污染位居第7。PM_{2.5}污染能导致人群心肺疾病发病率和死亡率增加[5][6]。仅在2015年PM_{2.5}就造成全球420万人死亡, 59%来自东亚和南亚, 其中中国占据110万[7]。调查显示, PM_{2.5}日平均浓度每增加10 μg/m³, 死亡率会增加1.5% [8]。人类生命的90%在室内度过, 因此室内空气质量对人类的健康具有重要影响。研究表明, 室外污染成分通过自然通风、机械通风和渗透通风的途径进入到室内, 室内外颗粒物之间存在着明显的相关性, 室内环境中来源于室外环境的PM_{2.5}占30%~75% [9][10][11][12]。世界卫生组织(WHO)透露, 室内空气质量负责全球疾病负担的2.7% [13], 2012年, 估计有650万例死亡(占全球总死亡人数的11.6%)与室内和室外空气污染有关[14]。

室内外换气次数、渗透以及颗粒物沉积等物理因素以及地理位置、气象条件和建筑类型都是描述室内外环境中颗粒物相关性的重要变量, 它们会直接影响人们颗粒物暴露水平[15][16][17]。我国东北严寒地区受地理位置、气候条件以及建筑类型等因素影响, 室内外颗粒物的污染状况与别的地区存在着差异性, 而针对严寒地区室内外相关性的研究却很少。大庆市位于黑龙江省西部, 是一座以石油、石化、汽车为支柱产业的著名工业城市。主要存在的环境污染问题有: 油田总烃排放量大; 机动车数量增长迅速, 汽车尾气成为新的大气污染源。城市化导致的城区供热、供暖小煤炉、油炉的增加。城市周边地区植被覆盖少, 以风沙土和盐碱地为主, 易形成风沙和二次扬尘, 以上问题的都会导致大庆市颗粒污染加剧(尤其在采暖期) [18]。本研究通过对大庆市办公室、教室和城市住宅和农村住宅室内外颗粒物浓度的长期监测, 深入分析室内外颗粒物浓度的相关性和影响因素, 以期得到严寒地区不同建筑类型的渗透因子以及室内颗粒物浓度与影响因素之间的关系, 为研究室内颗粒物暴露评估提供参数和依据。

2. 实验和方法

2.1. 实测概况

为研究东北地区不同建筑类型室内外颗粒物的相关性, 我们选取黑龙江省大庆市展开了实测工作。实测时间是2016年的6月至8月, 实测测点覆盖大庆市五个区, 四类建筑类型共110间(其中教室30间, 办公室30间, 城市住宅38间, 农村住宅12间), 如表1所示。测量仪器采用在线监测仪, 监测时间设定为每15分钟启动一次, 每次采集5分钟的数据, 测量内容包括室内外温度、相对湿度、PM_{2.5}和PM₁₀的浓度。每个房间室内外各布置一个测点, 同步进行测量。室外测点靠近外窗与室外大气直接接触, 室内测点位于房间的中间呼吸区附近, 距地面1.1 m处, 每个测点共采集七天的有效数据。为了更准确的分析室内外颗粒物之间的关系, 计算每个测点的小时平均值, 因此每间住户收集168组数据, 110间住户总共收集18480组数据并进行统计分析。

2.2. 室内外渗透系数

渗透系数(F_{in})表征了平衡状态下室外颗粒物进入室内并且悬浮在空中的比例[19]可以通过室内颗粒物浓度质量平衡方程的到:

$$V \frac{dC_{in}}{dt} = aPVC_{out} - aVC_{in} - kVC_{in} + S \quad (1)$$

其中: V 为房间体积; C_{in} 为室内颗粒物浓度; C_{out} 为室外颗粒物浓度; a 为换气次数; P 为颗粒物穿透系数, k 为颗粒物沉降率; S 为是颗粒源强度。这里忽略了室内颗粒物的再悬浮过程。

Table 1. Measured building information**表 1.** 实测建筑信息

| 建筑类型 | 编号 | 所在区域 | 外墙结构 | 实测时间 | 主要通风方式 |
|------|----|------|------|--------|--------|
| 办公室 | O1 | 萨尔图区 | 玻璃幕墙 | 2016.6 | 自然通风 |
| | O2 | 龙凤区 | 混凝土 | | |
| 教室 | C | 龙凤区 | 混凝土 | 2016.9 | |
| | H1 | 萨尔图区 | 混凝土 | | |
| 城市住宅 | H2 | 让胡路区 | 混凝土 | 2016.8 | |
| | H3 | 龙凤区 | 混凝土 | | |
| 农村住宅 | H0 | 红岗区 | 混凝土 | 2016.8 | |

渗透系数的定义是基于稳态情况且没有室内排放源:

$$F_{\text{inf}} = \frac{aP}{a+k} \quad (2)$$

更广义的渗透系数定义涵盖了室内外环境所有大气交换形式对室内颗粒物浓度的贡献,同时考虑了室内颗粒源(C_s)的影响,可以表达为[20]:

$$C_{\text{in}} = F_{\text{inf}} C_{\text{out}} + C_s \quad (3)$$

这也被称为随机组分重叠模型(Random component superposition model, RCS) [21],通过室内外颗粒物实测浓度线性回归模型即可获得颗粒物室内外渗透系数的平均值。根据该模型可将室内颗粒物来源看作两部分,一部分是室内源产生的颗粒物,另一部分是由室外渗透进入室内的颗粒物。

2.3. 双变量相关性分析

双变量相关分析是用来评估各种变量之间的两两关联性的重要方法[22]。皮尔森系数(r)是用于衡量两个变量之间的相关性的强弱,可以表示为[23]:

$$r = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum (X - \bar{X})^2)(\sum (Y - \bar{Y})^2)}} \quad (4)$$

其中, X 和 Y 代表变量, \bar{X} 和 \bar{Y} 代表变量的平均值。本文利用皮尔森系数 r 来表示室内颗粒物浓度与室内外影响因素(室外颗粒物浓度,温湿度等)之间的关系。

2.4. 颗粒物暴露评价

上世界 80 年代, Duan 和 Ott 提出了暴露评价的概念[24]。暴露量和潜在剂量评价颗粒物暴露水平的常用指标,暴露量是指在一定时段内,人体通过该边界接触颗粒物的总量,暴露量的引入同时考虑了颗粒物的浓度和暴露时间,表达式如下:

$$E = \int_T C(t) dt \quad (5)$$

其中, E ——暴露量, $\mu\text{g}\cdot\text{h}/\text{m}^3$; $C(t)$ ——暴露浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

剂量是指某一时段人体吸入的颗粒物的量,是反映颗粒物进入人体内部的水平,表达式如下:

$$D = \int_T C(t) \cdot IR(t) dt \quad (6)$$

其中, D ——潜在剂量, μg ; $C(t)$ ——暴露浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; $IR(t)$ ——呼吸速率, m^3/h 。

3. 结果与讨论

3.1. 室内外颗粒物浓度

图 1 展示了每个测点室内外颗粒物的日均浓度分布结果和标准差，可以看出这四类建筑室内外颗粒物浓度都处于一个比较低的水平且差别很小，室外平均 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，室内平均 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。针对于室外颗粒物浓度限值，国家标准《环境空气质量标准》GB3059-2012，规定室外空气 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度一级标准宜小于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，二级标准宜小于 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。对于室内颗粒物浓度限值目前国内还未出台相应的国家标准，但行业标准《建筑通风效果测试和评价标准》JGJ/T309-2013 中规定室内 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度宜小于 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由此看出大庆地区夏季整体空气质量较好。大庆地区夏季受副热带海洋气流的影响，温湿多雨；大气层受低压控制，一般处于不稳定或者中性状态，风速较大，这都有利于夏季颗粒污染物的排除和扩散[25]。

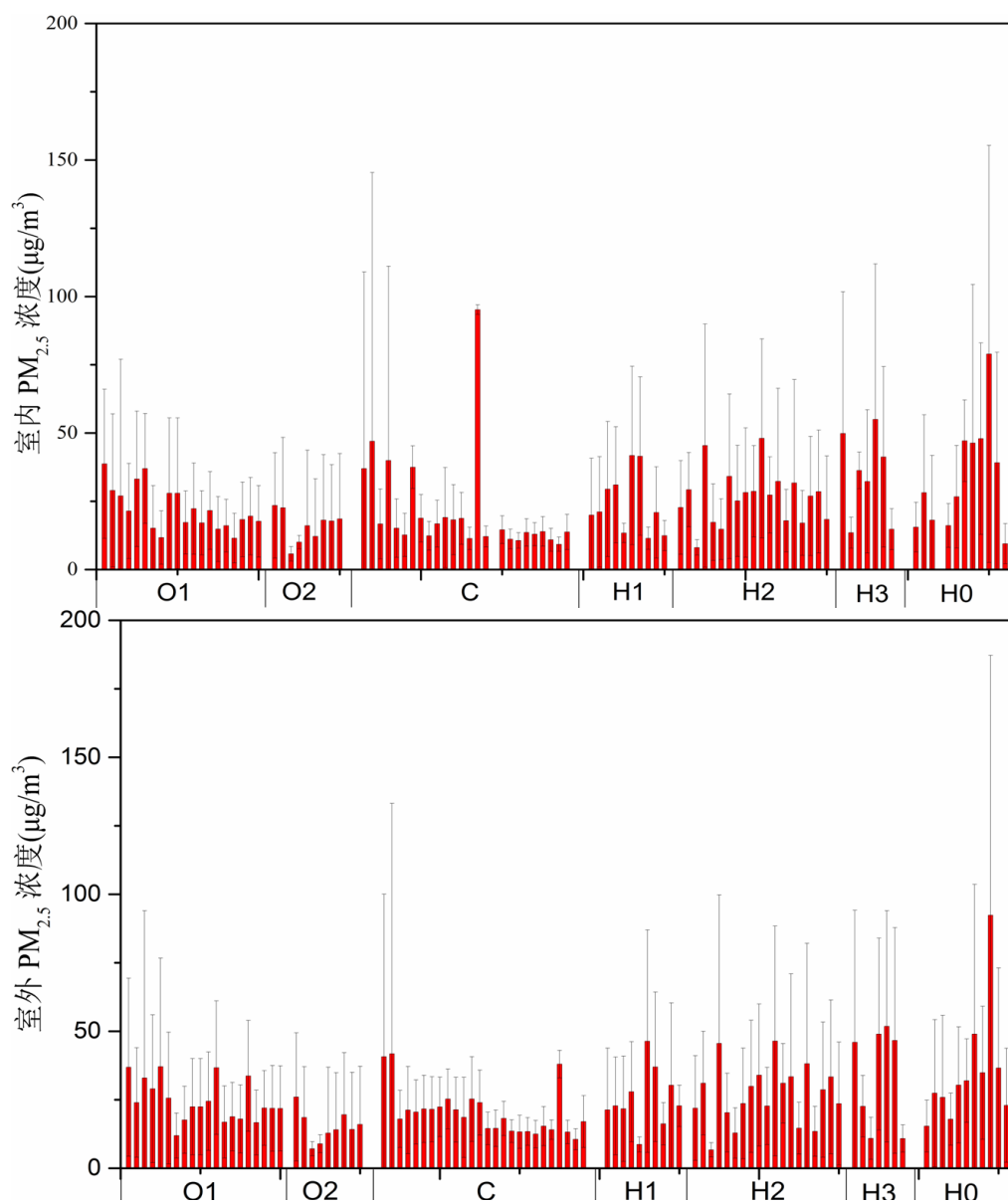


Figure 1. The average $\text{PM}_{2.5}$ concentration of indoor and outdoor measuring points during the measurement period
 图 1. 实测期间室内外测点的平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

3.2. 室内外颗粒物的渗透系数

室内外颗粒物的传递特性以及相关性, 研究者们已经进行了大量的研究。室内颗粒物的浓度主要受到室外来源的影响, 但不同的建筑类型, 通风条件以及是室外大气的环境状况也会造成干扰。Chen and Zhao 等对目前颗粒物室内外关系研究中常用的定量方法进行了综述, 包括室内外浓度比例 I/O (Indoor/outdoor ratio)、穿透因子(Penetration factor, P)和渗透因子(Infiltration factor, F_{inf}) [20]。本文采用渗透因子 F_{inf} 这一概念来研究室内外颗粒物的相关性, 可以排除室内污染源的影响, 因而更适合于定量表征颗粒物的室内外关系。

图 2 为所测量的四类建筑室内外渗透系数计算结果, 回归直线方程的斜率即为渗透系数的值, 截距为室内源的强度。可以发现室内外颗粒物之间存在着明显的线性关系, 农村住宅的相关性最强($R^2 = 0.7328$)。大庆地区夏季的通风方式主要以自然通风为主, 室内渗透系数都处于一个比较高的水平。对于办公室和城市住宅, 由于空调的使用以及建筑的密闭性较好, 导致渗透系数略低一些, 分别为 0.7214 和 0.7499。而对于教室和农村住宅, 密闭性较差, 室内颗粒物几乎全部来源于室外, 渗透系数分别为 0.9217 和 0.9019。MacNeill 和 Hystad 等人[26] [27]对夏季加拿大大部分住宅室内外颗粒污染的测量发现, 渗透系数为 0.8 ($n = 50$)和 0.72 ($n = 40$)。黄虹[28]在 2004 年分析了广州市一般住宅和道路旁住宅室内外颗粒物的相关性, 得到他们的渗透系数分别为 0.9158 和 0.8665, 这都与我们夏季得到的结果相一致。

3.3. 室外颗粒源对室内的贡献度

渗透系数表明了室内外颗粒物之间的关系, 为了更好地表示室外颗粒污染物对室内的污染程度, 本文采用贡献率(ρ)这一概念, 表达形式如下[29]:

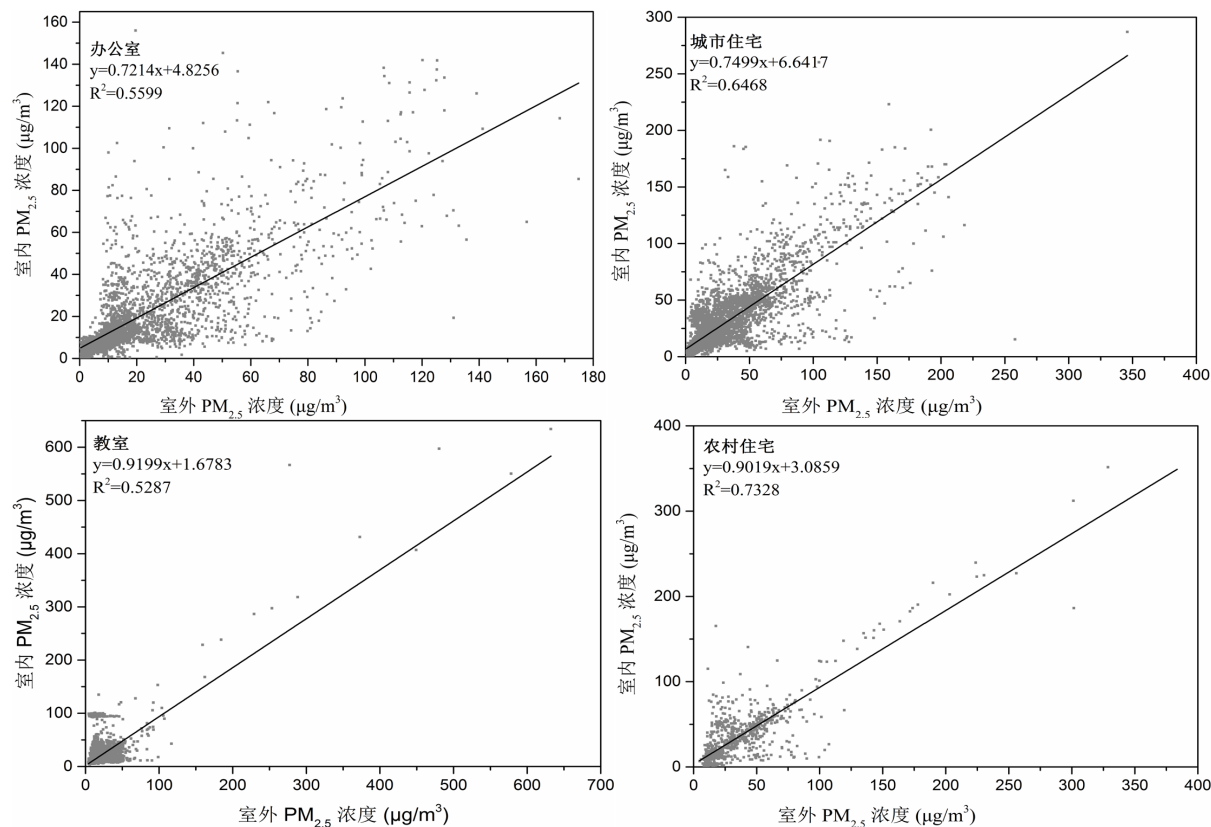


Figure 2. The calculation results of indoor and outdoor permeability coefficients for four types of buildings

图 2. 四类建筑类型的室内外渗透系数的计算结果

$$\rho = \frac{F_{inf} C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

表 2 展示了这四类建筑室内外颗粒浓度的关系以及室外源和室内源对室内暴露浓度的贡献率, 可以发现所有实测建筑室外颗粒物浓度都处于比较低的水平(办公室: $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 教室: $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 城市住宅: $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 农村住宅: $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 住宅建筑的平均浓度略高于办公室和教室, 室内外浓度之间都没有显著性的差异。室外源对室内浓度的贡献率在 70% 以上, 特别对于教室和农村住宅的贡献率达到 90%。夏季以自然通风为主的建筑, 有 70% 以上的室内颗粒物是来自于室外, 剩余 30% 来源于室内的人员活动, 如做饭, 打扫卫生等。

3.4. 室内颗粒物浓度的影响因素

室内颗粒物浓度受多种因素的影响, 如室内源强度、沉降率, 室内外换气次数、穿透系数, 建筑类型和气象条件(温度, 湿度, 降水等等)。以往研究中, 多从理论的角度对细颗粒物室内外关系影响因素进行分析, 而关于温湿度等气象条件的影响关注较少[30]。本文我们利用渗透系数表示是室内外颗粒物的相关性, 由渗透因子的定义式可知, 它是换气次数, 穿透系数和沉降率综合作用的结果。为明确温湿度对室内浓度的影响, 我们采用双变量分析的方法, 利用皮尔森相关系数(r)来表示室内颗粒物浓度与这些因素之间线性相关性的强弱, 概率分布值 $p < 0.05$ 被认为是具有统计学意义。

如表 3 所示, 室内颗粒物浓度与室外颗粒物浓度、室内外温湿度之间存在着显著的正相关性($p < 0.05$), 但不同类型建筑之间存在着明显的差别。室外颗粒物浓度对室内的颗粒的影响较大, 平均皮尔森相关系数(r)为 0.782, 这与渗透系数得到的结果相一致。温湿度作为重要影响因素, 对于办公建筑, 两类建筑存在很大的差异性。O1 类建筑, 室内外温度的影响更大一些($r = 0.224$, $p < 0.01$ (室内); $r = 0.281$, $p < 0.01$ (室外)), 教室建筑也存在相同的状况($r = 0.245$, $p < 0.01$ (室内); $r = 0.143$, $p < 0.01$ (室外))。这两类建筑一个是玻璃幕墙, 另一个开窗面积较大, 室内外温差受到太阳辐射的影响较大, 因热压的作用温度对室内颗粒物浓度的影响较大。对于其余建筑, 以混凝土墙体结构为主, 室内颗粒物浓度受温度的影响较小(平均 $r = 0.062$, $p < 0.05$ (室内); $r = 0.062$, $p < 0.05$ (室外)), 受相对湿度的影响较大(平均 $r = 0.437$, $p < 0.01$ (室内); $r = 0.294$, $p < 0.01$ (室外))。

在以往的研究中, 关于温湿度对室内颗粒物浓度影响的研究存在很大的差异性。Elbayoumi 研究发现室内 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度与各种气象变量如室内相对湿度, 室内和室外的温度和测量期间通风率呈负相关关系[31]。还有研究显示室内温度和室内颗粒浓度之间不存在显著的相关性[32]。造成这些结果的差异, 主要是因为测量所处的地域, 气候和建筑类型的不同所致。Fromme 等人在冬季观察发现湿度与实时监测 $\text{PM}_{2.5}$

Table 2. Contribution of indoor and outdoor particle sources in four types of buildings

表 2. 四类建筑室内外颗粒源的贡献度

| 建筑类型 | 室内平均 $\text{PM}_{2.5}$ | 室外平均 $\text{PM}_{2.5}$ | F_{inf} | C_s | 贡献率(%) | |
|------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|--------|--------|-------|
| | | | | | 室外源 | 室内源 |
| 办公室 | $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0.7214 | 4.8256 | 79.4% | 28.5% |
| 教室 | $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0.9199 | 1.6783 | 87.6% | 12.2% |
| 城市住宅 | $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0.7499 | 6.6417 | 75.0% | 21.1% |
| 农村住宅 | $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ | 0.9019 | 3.0859 | 90.2% | 9.8% |

Table 3. The correlation between indoor particulate matter concentration and influencing factors
表 3. 室内颗粒物浓度与影响因素之间相关性的分析结果

| | | 室内温度℃ | 室内湿度% | 室外 PM _{2.5} (μg/m ³) | 室外温度℃ | 室外湿度% |
|----|-------------|---------|---------|---|----------|----------|
| O1 | Pearson 相关性 | 0.224** | 0.088** | 0.881** | 0.281** | -0.144** |
| | 显著性(双侧) | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | N | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 | 1192 |
| O2 | Pearson 相关性 | -0.053* | 0.493** | 0.674** | -0.056** | 0.303** |
| | 显著性(双侧) | 0.011 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.000 |
| | N | 2344 | 2345 | 2345 | 2345 | 2344 |
| H0 | Pearson 相关性 | 0.090** | 0.270** | 0.856** | 0.035 | 0.113** |
| | 显著性(双侧) | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.296 | 0.001 |
| | N | 892 | 892 | 892 | 892 | 892 |
| H1 | Pearson 相关性 | 0.080** | 0.501** | 0.834** | 0.119** | 0.259** |
| | 显著性(双侧) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | N | 2704 | 2704 | 2704 | 2704 | 2704 |
| H2 | Pearson 相关性 | 0.129** | 0.431** | 0.657** | 0.120** | 0.260** |
| | 显著性(双侧) | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| | N | 696 | 696 | 696 | 696 | 696 |
| H3 | Pearson 相关性 | 0.045 | 0.498** | 0.870** | 0.064** | 0.262** |
| | 显著性(双侧) | 0.056 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.000 |
| | N | 1823 | 1823 | 1823 | 1823 | 1823 |
| C | Pearson 相关性 | 0.245** | 0.097** | 0.772** | 0.143** | -0.036 |
| | 显著性(双侧) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.121 |
| | N | 1822 | 1822 | 1822 | 1822 | 1822 |

**在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

浓度之间呈显著的负相关关系($r = -0.32, p < 0.05$),而在夏天是这两个因素之间存在显著的正相关($r = 0.24, p < 0.05$) [33]。Milner 发现室内颗粒物和温度之间的反比关系是由于室内和室外的建筑之间的温度差异,当室内温度高于室外温度(一般发生在冬季),这将导致空气被迫走出室内,稀释室内浓度[34]。我们的得到的结果是基于夏季的数据,这与 Fromme 和 Milner 得到结果是相一致的。总体来说,温湿度也是影响室内外相关性的重要因素,在研究中需要予以考虑和分析。

3.5. 暴露量

许多流行病学研究往往直接将室外环境监测站检测得到的 PM_{2.5} 浓度数据作为人员 PM_{2.5} 的暴露水平,但是人们大部分的时间是在室内度过,室内 PM_{2.5} 暴露浓度与室外 PM_{2.5} 浓度存在较大差异,单纯使用室外监测数据较难说明研究对象的实际暴露水平[35] [36],因此造成了研究结果的不准确。

由上述实测结果发现,夏季以自然通风为主的建筑,室内源颗粒物强度较小,人们几乎完全暴露于来源于室外的颗粒物中。本文我们根据上文求得的不同建筑的渗透系数、活动类型以及所处环境的不同,按照时间-活动模式分别求得每天的暴露水平,然后进行加权平均。时间-活动模式如图 3 所示,我们将颗

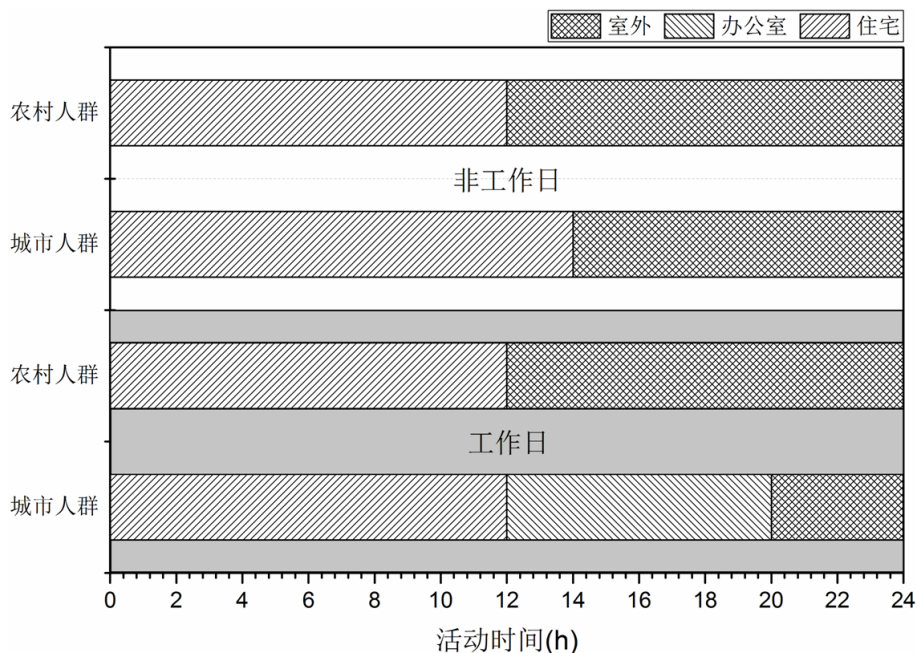


Figure 3. The activity time of different populations in indoor and outdoor environment

图 3. 不同人群在室内外环境中的活动时间

粒物的暴露量分为室外暴露量和来源于室外的室内暴露量，如下面方程所示：

$$E = C(t) \cdot T = [f \cdot C_{in}(t) + f_1 \cdot C_{out}(t)] \cdot T = [f_2 \cdot F_{inf,office} + f_3 \cdot F_{inf,house} + f] \cdot C_{out}(t) \cdot T \quad (8)$$

其中： T ——活动时间，h； f ——室内活动时间所占的比例； f_1 ——室外活动时间所占的比例； f_2 ——办公室活动时间所占的比例； f_3 ——住宅活动时间所占的比例； $F_{inf,office}$ ——办公室室内外 $PM_{2.5}$ 渗透系数； $F_{inf,house}$ ——住宅室内外 $PM_{2.5}$ 渗透系数。

由于人们年龄、职业以及工作环境的差异，不同人群的暴露情况也存在着不同。潜在剂量考虑了不同人员的呼吸量，与性别、年龄、活动强度以及健康状况等因素有关。根据美国第十版 RDA 中体力分级标准将劳动强度分为五级：休息状态、极轻劳动、轻度劳动、中度劳动和重度劳动，如表 4 所示。而我国的人群暴露手册提供了人体在不同劳动强度下的呼吸速率推荐值，如表 5 所示。本文我们根据工作性质将研究人群分为城市人群和农村人群，他们的差异性主要体现在白天的工作内容。城市人群白天工作时间几乎都在室内，每周的工作时间从周一到周五，而农村人群的工作时间集中于室外(田间劳作)，不存在周末休息时间。而且由于他们劳动强度的差异，每小时的呼吸速率也存在明显的差异，城市人群在办公室以轻度劳动为主，农村人群在室外以中度劳动为主。

表 6 和表 7 为城市人群和农村人群小时平均暴露量和潜在剂量。实测期间位于夏季，整体颗粒物暴露浓度处于较低的水平。城市人群与农村人群之间存在着差异性。对于城市人群，平均暴露量 $21.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，最小暴露量为在家休息的时间， $19.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由于城市人群工作强度以极轻和轻度劳动为主，平均暴露的潜在剂量较低，男性为 $9.67 \mu\text{g}/\text{h}$ ，女性为 $7.94 \mu\text{g}/\text{h}$ 。对于农村人群，平均暴露量为 $25.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。不同时间段的暴露量明显高于城市人群。室外工作时间的平均潜在剂量最大，男性为 $43.60 \mu\text{g}/\text{h}$ ，女性为 $35.51 \mu\text{g}/\text{h}$ ，是城市人群工作时间平均潜在剂量的 4.6 倍；在家休息时的平均潜在剂量最小，男性为 $8.90 \mu\text{g}/\text{h}$ ，女性为 $7.32 \mu\text{g}/\text{h}$ ，与城市人群的差异性较小。住宅内空气质量相对较好，大部分时间处于睡眠状态，心率较低，机体需氧量较小，吸入的空气也较少，从而减小了的颗粒物的吸入量[37]。不同性别之间暴露潜在剂量由于呼吸强度的不同也存在差异，我们的研究结果发现男性暴露的潜在剂量比女性高 1.2 倍。陶

Table 4. Classification of physical activity in the United States 10th edition RDA (1987)**表 4.** 美国第十版 RDA (1987) 中体力活动分级标准

| 劳动强度分级 | 描述 |
|--------|--|
| 休息状态 | 睡觉、斜靠着休息 |
| 极轻 | 坐着或站着, 绘画, 加湿, 实验室工作, 打字, 缝纫, 熨衣, 烹饪, 玩牌, 弹奏乐器 |
| 轻度 | 以 4~4.8 km/h 速度平路行走, 汽车修理工, 电器业, 木工, 餐饮业, 清洁室内卫生, 幼儿护理, 打高尔夫球, 划船, 打乒乓球等 |
| 中度 | 以 5.6~6.4 km/h 的速度行走, 除草或锄地, 扛重物, 骑车, 滑雪, 打网球, 跳舞 |
| 重度 | 载物上坡行走, 伐树, 手工采锯, 打篮球, 攀岩, 踢足球, 玩橄榄球 |

Table 5. Respiratory rate of human body under different activities (Recommended values of Exposure Factors Handbook of Chinese Population)**表 5.** 人体在不同活动下的呼吸速率(中国人群暴露参数手册推荐值)

| 呼吸速率 | 活动强度 | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m ³ /h | 休息 | 极轻活动 | 轻微活动 | 中体力活动 | 重体力活动 |
| 男 | 0.372 | 0.444 | 0.558 | 1.488 | 2.232 |
| 女 | 0.306 | 0.366 | 0.456 | 1.212 | 1.818 |

Table 6. The average hourly exposure and potential dose of urban population**表 6.** 城市人群小时平均暴露量与潜在剂量

| 活动类型 | 性别 | 暴露量($\mu\text{g}\cdot\text{h}/\text{m}^3$) | 平均暴露量($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 潜在剂量(μg) | 平均潜在剂量($\mu\text{g}/\text{h}$) |
|-----------|----|--|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 工作日工作时间 | 男 | 845.48 | 21.14 | 379.39 | 9.38 |
| | 女 | | | 309.45 | 7.74 |
| 工作日室外活动时间 | 男 | 469 | 23.45 | 261.70 | 13.09 |
| | 女 | | | 213.86 | 10.69 |
| 工作日在家休息时间 | 男 | 1193.84 | 19.90 | 444.11 | 7.40 |
| | 女 | | | 365.32 | 6.09 |
| 周末休息时间 | 男 | 1125.19 | 23.44 | 543.75 | 11.33 |
| | 女 | | | 445.26 | 9.28 |
| 综合 | 男 | 3633.51 | 21.63 | 1624.95 | 9.67 |
| | 女 | | | 1333.89 | 7.94 |

Table 7. The average hourly exposure and potential dose of rural population**表 7.** 农村人群小时平均暴露量与潜在剂量

| 活动类型 | 性别 | 暴露量($\mu\text{g}\cdot\text{h}/\text{m}^3$) | 平均暴露量($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 潜在剂量(μg) | 平均潜在剂量($\mu\text{g}/\text{h}$) |
|--------|----|--|-----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| 室外工作时间 | 男 | 1172 | 29.30 | 1743.94 | 43.60 |
| | 女 | | | 1420.46 | 35.51 |
| 室外活动时间 | 男 | 469 | 23.45 | 261.7 | 13.09 |
| | 女 | | | 213.86 | 10.69 |
| 在家休息时间 | 男 | 1435.67 | 23.93 | 534.13 | 8.90 |
| | 女 | | | 439.36 | 7.32 |
| 综合 | 男 | 3076.67 | 25.64 | 2539.77 | 21.16 |
| | 女 | | | 2073.68 | 17.28 |

燕等[38]调查发现室外颗粒污染对男性呼吸系统疾病日门诊量的健康效应比女性更明显。无论是城市还是农村,男性呼吸速率均显著高于女性,这主要是由男女之间生理因素的差异决定的[39]。而且男性从事户外作业时间相比于女性较高,且存在不良的生活习惯(如抽烟、酗酒)使男性更易受外界污染物的影响而诱发呼吸系统疾病。

4. 结论

本文通过对大庆市办公室、教室和住宅的室内外颗粒物浓度夏季的监测,并对室内外颗粒物浓度的相关性和影响因素展开分析,得到严寒地区不同建筑类型在夏季的渗透因子以及室内颗粒物浓度与影响因素之间的关系,具体结论如下:

1) 四类建筑室内外颗粒物浓度都处于一个比较低的水平且差别很小,室外平均 $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$,室内平均 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$,均低于国家标准中规定的限值。而且我们对不同区域室内外浓度进行了 T 检验,发现均未表现区域差异($p > 0.05$),由此看出大庆地区夏季整体空气质量较好。

2) 通过对四类建筑室内外颗粒物浓度进行回归分析可以发现室内外颗粒物之间存在着明显的线性关系,并利用渗透系数来表示它们相关性的。对于办公室和城市住宅,渗透系数略低一些,0.7214和0.7499。而对于教室和农村住宅,门窗一般处于常开状态,通风换气次数较高,渗透系数分别为0.9217和0.9019。

3) 室内颗粒物浓度与室外颗粒物浓度、室内外温湿度之间存在着显著的正相关性($p < 0.05$),但不同类型建筑之间存在着明显的差别。室外颗粒物浓度对室内的颗粒的影响较大,平均皮尔森相关系数(r)为0.782,这与渗透系数得到的结果相一致。温湿度作为重要影响因素,O1类办公建筑建筑以及教室,外墙以玻璃为主,室内外温度的影响更大一些。对于其余建筑,以混凝土墙体结构为主,受相对湿度的影响较大。

4) 我们根据不同建筑的渗透系数、活动类型以及所处环境的不同,按照时间-活动模式分别求得每天的暴露水平。结果发现:对于城市人群,平均暴露量 $21.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。对于农村人群,平均暴露量为 $25.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$,不同时间段的暴露量明显高于城市人群。不同性别之间暴露潜在剂量由于呼吸强度的不同也存在差异,我们的研究发现男性暴露的潜在剂量比女性高1.2倍。

基金项目

国家环保公益专项“我国大气颗粒物室内外渗透系数与污染防治对策研究”(201509063),大学生创新创业训练计划项目(2017101410301010593),国家自然科学基金项目“寒冷地区居住室内环境关联健康影响表征模型研究”(51578103),辽宁省海洋与渔业厅科研项目(201518)。

参考文献 (References)

- [1] Uthman, O.A. (2016) Global, Regional, and National Comparative Risk Assessment of 79 Behavioural, Environmental and Occupational, and Metabolic Risks or Clusters of Risks, 1990-2015: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *Lancet Neurology*, **388**, 1659-1724. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)31679-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31679-8)
- [2] 刘慧琳, 陈志明, 周斌, 等. 南宁市夏季和冬季细颗粒物化学组分特征研究[J]. 环境科技, 2015, 28(4): 22-27.
- [3] 李仰瑞, 赵云峰. PM_{2.5}对呼吸系统的影晌[J]. 中华肺部疾病杂志(电子版), 2013, 6(4): 71-73.
- [4] Dockery, D.W., Pope, C.A., Xu, X.P., et al. (1993) An Association between Air Pollution and Morality in Six United-States Cities. *New England Journal of Medicine*, **329**, 753-759. <https://doi.org/10.1056/NEJM199312093292401>
- [5] Zhao, J., Bo, L., Gong, C., et al. (2015) Preliminary Study to Explore Gene-PM_{2.5} Interactive Effects on Respiratory System in Traffic Policemen. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, **28**, 971-983. <https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.00370>
- [6] Tseng, E., Ho, W.C., Lin, M.H., et al. (2015) Chronic Exposure to Particulate Matter and Risk of Cardiovascular Mor-

- tality: Cohort Study from Taiwan. *BMC Public Health*, **15**, 936. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-2272-6>
- [7] Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., *et al.* (2017) Estimates and 25-Year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution: An Analysis of Data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- [8] Klemm, R.J., Mason, R.M., Heilig, C.M., *et al.* (1996) Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles? *Journal of the Air & Waste Management Association*, **46**, 927-965. <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467528>
- [9] Dockery, D.W. and Spengler, J.D. (1981) Indoor-Outdoor Relationships of Respirable Sulfates and Particles. *Atmospheric Environment*, **15**, 335-343. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(81\)90036-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(81)90036-6)
- [10] Koutrakis, P., Briggs, S.L.K. and Leaderer, B.P. (1992) Source Apportionment of Indoor Aerosols in Suffolk and Onondaga Counties, New York. *Environmental Science & Technology*, **26**, 521-527. <https://doi.org/10.1021/es00027a012>
- [11] Ozkaynak, H., Xue, J., Spengler, J., *et al.* (1995) Personal Exposure to Airborne Particles and Metals: Results from the Particle TEAM Study in Riverside, California. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **6**, 57-78.
- [12] 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.
- [13] World Health Organization (WHO) (2010) WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. WHO, Geneva.
- [14] World Health Organization (2016) Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. WHO, Geneva.
- [15] Roberts, J.W., Budd, W.T., Rubyet, M.G., *et al.* (1992) Human Exposure to Pollutants in the Floor Dust of Homes and Offices. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **2**, 127-146.
- [16] Lidia, M., He, C., Hitchins, J., *et al.* (2001) The Relationship between Indoor and Outdoor Airborne Particles in the Residential Environment. *Atmospheric Environment*, **35**, 3463-3473. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00097-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00097-8)
- [17] 赵彬, 陈玖玖, 李先庭. 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, 2005, 22(1): 65-68.
- [18] 周丹, 魏云慧. 大庆市空气质量分析及空气污染控制对策[J]. 大庆社会科学, 2005(2): 51-51.
- [19] Wilson, W.E., Mage, D.T. and Grant, L.D. (2000) Estimating Separately Personal Exposure to Ambient and Nonambient Particulate Matter for Epidemiology and Risk Assessment: Why and How. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **50**, 1167-1183. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464164>
- [20] Chen, C. and Zhao, B. (2011) Review of Relationship between Indoor and Outdoor Particles: I/O Ratio, Infiltration Factor and Penetration Factor. *Atmospheric Environment*, **45**, 275-288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- [21] Ott, W., Wallace, L. and Mage, D. (2000) Predicting Particulate (PM10) Personal Exposure Distributions Using a Random Component Superposition Statistical Model. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **50**, 1390-1406. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464169>
- [22] Kingham, S., Briggs, D., Elliott, P., *et al.* (2000) Spatial Variations in the Concentrations of Traffic-Related Pollutants in Indoor and Outdoor Air in Huddersfield, England. *Atmospheric Environment*, **34**, 905-916.
- [23] Özbay, B. (2012) Modeling the Effects of Meteorological Factors on SO₂ and PM10 Concentrations with Statistical Approaches. *CLEAN-Soil, Air, Water*, **40**, 571-577. <https://doi.org/10.1002/clen.201100356>
- [24] Monn, C. (2001) Exposure Assessment of Air Pollutants: A Review on Spatial Heterogeneity and Indoor/Outdoor/Personal Exposure to Suspended Particulate Matter, Nitrogen Dioxide and Ozone. *Atmospheric Environment*, **35**, 1-32. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00330-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00330-7)
- [25] 王顶. 大庆市 PM10 污染预测的研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [26] MacNeill, M., Kearney, J., Wallace, L., *et al.* (2014) Quantifying the Contribution of Ambient and Indoor-Generated Fine Particles to Indoor Air in Residential Environments. *Indoor Air*, **24**, 362-375. <https://doi.org/10.1111/ina.12084>
- [27] Hystad, P.U., Setton, E.M., Allen, R.W., *et al.* (2009) Modeling Residential Fine Particulate Matter Infiltration for Exposure Assessment. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, **19**, 570-579. <https://doi.org/10.1038/jes.2008.45>
- [28] 黄虹. 广州市住宅室内外大气 PM2.5 的化学组成特征, 来源及暴露评价[D]: [博士学位论文]. 广州: 中山大学, 2005.
- [29] 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.
- [30] 吴亚涛, 刘兆荣. 采暖季室内外细颗粒物关系的关键影响因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 931-938.

- [31] Elbayoumi, M., Ramli, N.A., Yusof, N.F.F.M., *et al.* (2014) Multivariate Methods for Indoor PM 10 and PM 2.5 Modelling in Naturally Ventilated Schools Buildings. *Atmospheric Environment*, **94**, 11-21.
- [32] Branis, M., Rezacová, P. and Domasová, M. (2005) The Effect of Outdoor Air and Indoor Human Activity on Mass Concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 in a Classroom. *Environmental Research*, **99**, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.12.001>
- [33] Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B. and Rüden, H. (2007) Particulate Matter in the Indoor Air of Classrooms E Exploratory Results from Munich and Surrounding Area. *Atmospheric Environment*, **41**, 854-866. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.053>
- [34] Milner, J.T., Dimitroulopoulou, C. and ApSimon, H.M. (2005) Indoor Concentrations in Buildings from Sources Outdoors. Technical Report. UNSPECIFIED.
- [35] Ji, W. and Zhao, B. (2015) Contribution of Outdoor-Originating Particles, Indoor-Emitted Particles and Indoor Secondary Organic Aerosol (SOA) to Residential Indoor PM2.5 Concentration: A Model-Based Estimation. *Building and Environment*, **90**, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.006>
- [36] He, C., Morawska, L., Hitchins, J., *et al.* (2004) Contribution from Indoor Sources to Particle Number and Mass Concentrations in Residential Houses. *Atmospheric Environment*, **38**, 3405-3415. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.027>
- [37] 付高平. 成都市微细颗粒物(PM2.5)形成机理及对人类健康危害研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [38] 陶燕, 羊德容, 兰岚, 等. 兰州市空气污染对呼吸系统疾病入院人数的影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 175-180.
- [39] 王贝贝, 段小丽, 蒋秋静, 等. 我国北方典型地区居民呼吸暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(11): 1421-1427.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org