

重工业区室内外细颗粒物 $PM_{2.5}$ 相关性分析

李慧星,关莹,冯国会,黄凯良,杨婉凝

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究重工业城市住宅在夏季开窗条件下,室外细颗粒物 $PM_{2.5}$ 对室内空气质量的影响,数值模拟得到细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的质量浓度、速度、温度分布云图及粒子轨迹. 方法 通过采用气溶胶检测仪对室内外细颗粒物 $PM_{2.5}$ 污染物质量浓度进行实测,使用 SPSS 软件对测试得到的细颗粒物 $PM_{2.5}$ 质量浓度进行拟合,并运用 FLUENT 模拟软件对室内细颗粒物运移及分布情况进行模拟分析. 结果 位于重工业厂矿下风侧交通主干线一侧的 A 房间的室内与室外细颗粒物质量浓度的比值(I/O)小于 1,受室外环境的影响较大;位于重工业厂矿下风侧小区内部的 B 房间的 I/O 大于 1,说明受室内细颗粒物染物污的影响较大. 并且两房间室内外细颗粒物具有较强的二次相关性,相关系数分别为 0.920 77、0.941 11. 结论 室内 $PM_{2.5}$ 质量浓度随室外细颗粒物质量浓度增加而升高. 建立的室内外细颗粒物 $PM_{2.5}$ 质量浓度相关性模型,可以分析室内外颗粒物浓度的变化特征.

关键词 重工业区;细颗粒物 $PM_{2.5}$;二次相关性;数值模拟;FLUENT

中图分类号 X513

文献标志码 A

Correlation Analysis of Indoor and Outdoor Fine Particles $PM_{2.5}$ in Heavy Industrial Zone

LI Huixing, GUAN Ying, FENG Guohui, HUANG Kailiang, YANG Wanning

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In this paper under the condition of a certain residential summer window in heavy industry city, the outdoor fine particles $PM_{2.5}$ has an impact on indoor air quality. The concentration, velocity, temperature distribution cloud and particle trajectory of fine particulate $PM_{2.5}$ were obtained by numerical simulation. Indoor and outdoor fine particulate matter $PM_{2.5}$ pollutant concentration was measured through the adoption of aerosol detector. $PM_{2.5}$ mass concentration of the fine particles was fit by SPSS software. Indoor fine particle migration and distribution were simulated by FLUENT simulation software. The ratio of indoor and outdoor fine particulate mass concentration (I/O) is less than 1 in the room of A room on the side of the main road of heavy industry, a great

收稿日期:2016-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51378318);辽宁省教育厅项目(201602640);住房和城乡建设部科学技术项目(2016-k1-020)

作者简介:李慧星(1964—),女,教授,主要从事建筑室内环境空气质量保障技术研究.

ter impact by the outdoor environment, and I/O is greater than 1 in B room in the lower wind side area of heavy industry, which is influenced by indoor fine particulate matter pollution. And the indoor and outdoor fine particles of above two groups have a strong quadratic correlation, the correlation coefficients were 0.920 77, 0.941 11. Indoor PM_{2.5} levels increased with the concentration of fine particulate matter outside. The correlation model of fine particulate PM_{2.5} concentration in indoor and outdoor areas was established to analyze the variation characteristics of particulates in indoor and outdoor areas.

Key words: heavy industry; fine particulate matter PM_{2.5}; quadratic correlation; the numerical simulation; FLUENT

雾霾频繁出现对人体健康造成严重危害,特别是重工业区环境污染更为严重,工业排放、交通排放以及煤燃烧等燃烧过程^[1-3]排放的气溶胶粒子成为城市空气环境的主要污染源,造成室外细颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度持续增长,室外可吸入颗粒物是室内颗粒物的一个重要来源^[4-6]. 对颗粒物的研究,最初是以室外大气颗粒物作为研究对象,1954 年第一次将室内外颗粒物质量浓度联系起来进行浓度关系的分析研究,引起了人们对室内外颗粒物污染物质量浓度变化关系的关注^[7];后来学者建立了一种室外污染物传输进入住宅建筑的半经验模型,研究发现换气量在室外污染物输入室内环境的量中起重要作用;通过建立室内外颗粒物质量浓度的动态模型,模拟粒径在 0.01 ~ 1 μm 超细颗粒物在室内的变化情况^[8-10];在对新、老建筑室内外颗粒物质量浓度进行检测中,得到了颗粒物在不同建筑中的穿透率和沉积率. 我国对细颗粒物 PM_{2.5} 的研究还处于起步阶段,笔者通过实际检测与数值计算的方法,对室内外细颗粒物相关性 & 室内颗粒物的运动规律进行研究,建立的室内外细颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度相关性模型,可以分析室内外颗粒物浓度变化特征.

1 室内外细颗粒物 PM_{2.5} 测试及结果分析

1.1 室内外细颗粒物 PM_{2.5} 测试方案

选取北方某住宅建筑同一小区的不同单

元的两个住户,采用气溶胶检测仪 (TSI Dust Trak™ DRX 8530) 进行室内外颗粒物 PM_{2.5} 的质量浓度测试. 该小区位于重工业厂矿的下风侧,具有一定的代表性. 选取两个单元第 4 楼层两个卧室,将其编号为 A、B 房间. A 房间位于交通主干线一侧, B 房间在小区内部,四周无其他污染源. 两房间建筑面积约为 13.5 m², 外窗均为塑钢平开窗. 测试期间保持人员数量不变.

室外测点位于距离外窗台 0.5 m、距离外窗台地面高度为 1.0 m; 室内在进风口中心, 距离窗口 0.5 m, 距地面高度为 1.5 m 位置. 同时使用温湿度自记仪 (RR002) 和多功能通风测试仪 (TSI 9565) 分别对室内外的温湿度及风速进行测试.

1.2 测试结果分析

A、B 两个房间连续 5 d 的 3 个时段日平均颗粒物质量浓度水平如表 1 所示. 我国现有《室内空气质量标准》(GB/T 18883) 规定: 室内 PM₁₀ 质量浓度日平均值不应超过 150 μg/m³, 而对 PM_{2.5} 质量浓度无明确要求. 一般以 PM₁₀ 标准限值的 0.7 ~ 0.8 倍估算 PM_{2.5} 质量浓度标准限值, 按 0.7 计算, PM_{2.5} 质量浓度日平均值应不超过 105 μg/m³.

从表 1 中的测试结果与国家室内空气质量标准对比后发现, 所测两房间 PM_{2.5} 的平均值会超过标准限值或接近标准限值. A 房间的超标率为 40%, 超标倍数在 1.23 ~ 2.45, 平均超标倍数为 1.82; B 房间的超标率为 26.7%, 超标倍数在 1.02 ~ 2.73, 平均

超标倍数为 1.90,说明室内细颗粒物质量浓度含量较高.

表 1 A、B 房间室内 PM_{2.5}质量浓度日平均值

Table 1 Daily average value of PM_{2.5} mass concentration in A、B room

时间段	位置	$\rho(\text{PM}_{2.5})/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$									
		2016-08-05		2016-08-06		2016-08-07		2016-08-08		2016-08-09	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
08:00~09:00	室内	263	376	90	105	101	104	126	99	186	182
	室外	414	363	119	115	107	119	146	97	208	208
11:30~12:30	室内	207	206	103	99	43	33	29	31	72	57
	室外	296	172	147	111	46	32	31	31	75	61
18:00~19:00	室内	189	123	176	64	60	51	53	51	93	92
	室外	221	119	390	65	82	50	69	50	108	96

图 1 为连续 5 d 测试的两个房间室内外 PM_{2.5}质量浓度变化分析对比. 测试期间 A 房间室外 PM_{2.5}质量浓度在 12~624 μg/m³变化,室内为 15~297 μg/m³; B 房间室外 PM_{2.5}质量浓度在 21~362 μg/m³变化,室内

为 29~343 μg/m³. A 房间周围污染环境较多,如交通排放的颗粒物污染物等;B 房间位于绿化小区内,细颗粒物 PM_{2.5}质量浓度较低. A 房间室外 PM_{2.5}的质量浓度值高于小区内 B 房间.

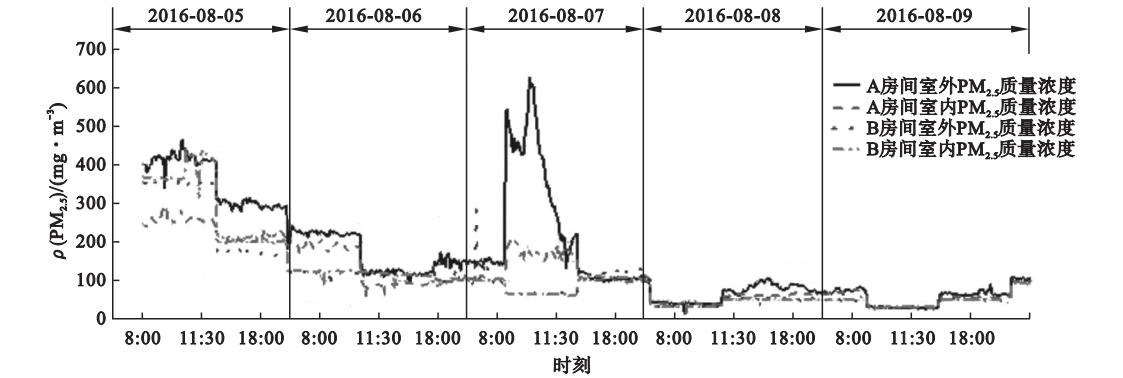


图 1 A、B 两房间室内外 PM_{2.5}质量浓度变化

Fig. 1 Mass concentration change curve of inside and outside fine particulate matter PM_{2.5}for room A and B

从图 1 可以看出:早、晚时段颗粒物质量浓度增加,人们活动逐渐增加,交通主干道上车辆较多,且大气存在逆温层现象,不利于污染物扩散;而中午 PM_{2.5}的质量浓度明显减少,主要原因是由于此时太阳辐射强烈,地面温度较高,地面与空气存在较强的对流现象,颗粒物随着空气对流进行扩散导致此时的颗粒物浓度较低. 房间室内 PM_{2.5}质量浓度随室外浓度的降低而减少. 由于 2016-08-07 受降雨的影响,室外 PM_{2.5}的质量浓度明显

降低,空气质量良好.

2 室内外细颗粒物 PM_{2.5}相关性分析

2.1 室内外质量浓度之比

通常把室内与室外细颗粒物质量浓度的比值(*I/O*)作为评价室内与室外污染水平的差异^[11-13]的指标. 图 2 用箱线图分别表示 A、B 两个房间 5 d 内不同时间间隔的 *I/O* 值. A 房间在 5 d 内 3 个时间段中 *I/O* 的中

位数分别为 0.863、0.950、0.768, 上限值均小于 1, 说明室内环境主要受制于室外, 测试地点 A 房间临近交通主干道, 汽车尾气以及道路扬尘对室外细颗粒物浓度的增加起主导作用. 而 B 房间 I/O 值的中位数分别为

0.913、1.00、1.02, 上限值分别为 1.062、1.026、1.025, 均较稳定且大于 1, 说明该房间受室内细颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度影响更大, 室内存在较大的室内污染源, 如人员的活动(吸烟, 做饭)、室内通风较差等^[14].

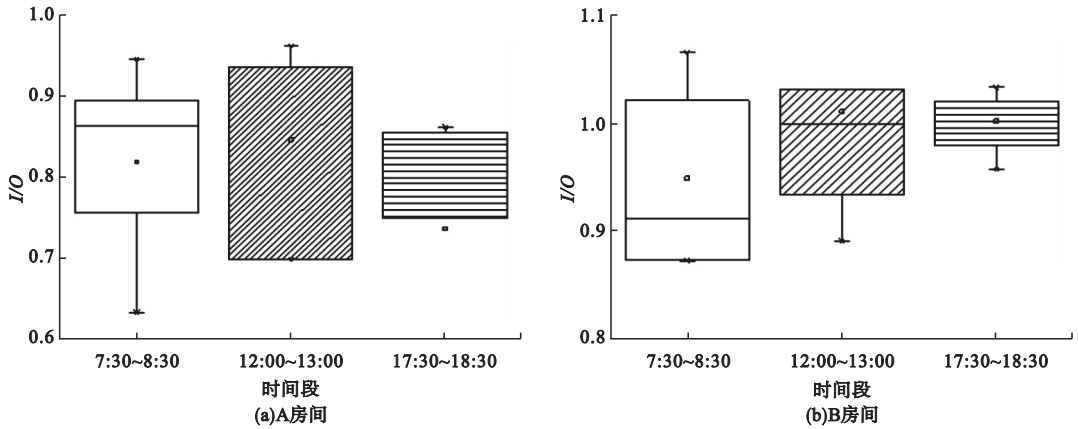


图2 5 d 不同时间间隔 PM_{2.5} I/O 值

Fig.2 PM_{2.5} I/O ratio at different time intervals in 5 days

2.2 室内外细颗粒物 PM_{2.5} 拟合方程

使用 SPSS 软件对测试 A、B 两房间室内外细颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度数据进行拟合计算得:

$$y_A = -0.00126x_A^2 + 1.09055x_A - 8.1189, \tag{1}$$

$$y_B = -0.00122x_B^2 + 1.27054x_B - 12.30112. \tag{2}$$

式中: x 为室外细颗粒物 PM_{2.5} 的质量浓度; y 为室内细颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度.

其中室内外细颗粒物 PM_{2.5} 质量浓度的拟合相关系数分别为 $R_A^2 = 0.92077$ 、 $R_B^2 = 0.94111$, 对应的显著性较强, 两者具有较强的二次相关性.

在夏季, 室外由于温度高、相对湿度大、风速较小, 因此不利于工厂、交通排放扬尘及汽车尾气排放的颗粒物污染物的扩散, 造成颗粒物质量浓度增加. 室外细颗粒物 PM_{2.5} 对室内的环境有很大影响, 不考虑室内存在污染源的条件下, 细颗粒物 PM_{2.5} 会通过门窗等维护结构渗透进入室内. 自然通风条件下, 细颗粒物会随着开窗口及人员的进入到

达室内, 使室内细颗粒物污染物增加.

3 数值模拟

采用计算流体力学 (CFD) 软件 FLU-ENT 进行数值模拟, 通过求解质量方程、能量方程、动量方程及组分质量守恒等偏微分方程^[15-16], 得到在室内环境中气流和细颗粒物在通风条件下的温度、相对湿度、速度、细颗粒物的质量浓度等信息. 笔者选取 2016-08-05 的数据进行数值模拟.

3.1 房间模型建立

采用 GAMBIT2.4.6 软件建立房间立方体三维模型, 模型依据实际房间尺寸而创建. 房间长宽高为 4.8 m × 3.4 m × 2.6 m. 窗户为进风口, 长宽为 1.40 m × 1.42 m; 门为出风口, 长宽为 2.0 m × 0.8 m. 床的长宽高为 1.8 m × 1.4 m × 0.5 m. 衣柜长宽高为 1.4 m × 0.5 m × 2.5 m. 在模型中选取 $Y = 2$ m 为分析截面. 房间空间布局及截面如图 3 所示. 为了使计算更加接近实际, 用 size function 对局部位置进行加密处理.

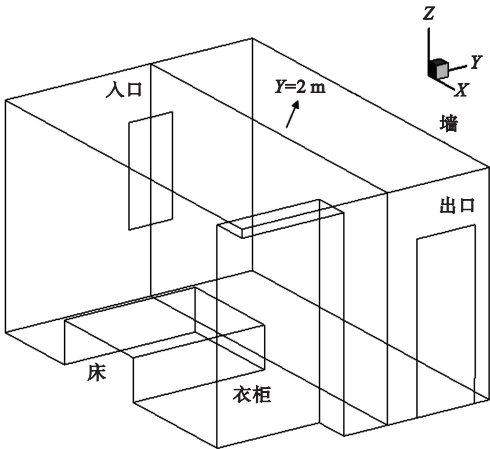


图3 房间空间布局及截面选取

Fig.3 Schematic of the room and the layout of section areas selected

3.1.1 空气流动模型

室内空气流动模型的选择是建筑室内环境模拟的一个关键所在,室内空气流动受到物理守恒的支配.在湍流流动下,(RNG) $k-\epsilon$ 湍流模型较其他湍流模型更加适合模拟室内空气流动,被广泛用于室内污染物的运输模拟,室内颗粒物的运输和沉降效果更明显^[17-19].控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_k \mu \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\epsilon \mu \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon. \tag{4}$$

式中: G_k 为由层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为由浮力而产生的湍急动能; Y_M 为由于在可压缩湍流中,过渡的扩散产生的波动; α_k 和 α_ϵ 是K方程和e方程的湍流普朗特数; k 和 ϵ 分别为 $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$; S_k 和 S_ϵ 为用户定义的源项;CFD中的默认值 $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{3\epsilon} = 0.09$.

3.1.2 边界条件与初始条件

入口边界条件选取适用于不可压缩流体的速度入口边界条件;出口边界条件设为质量出口边界条件来模拟流动;固体壁面边界

条件为无滑移边界条件,即流体的速度等于壁面的速度(第一类边界条件).设定入口温度为306 K,A、B两个房间入口平均速度分别为0.81 m/s和0.31 m/s.

粒子轨迹的初始条件包括初始位置和粒子的初始速度.为了模拟细颗粒物 $PM_{2.5}$ 粒子在房间中的质量浓度分布及运动轨迹,假设粒子在房间中是均匀分布.

3.2 粒子轨迹模型

通常用拉格朗日法和欧拉法两种方法模拟颗粒物的运输.拉格朗日方法适用于离散粒子运动的研究,将粒子分成具有代表性的单个粒子和运动轨迹.欧拉方法将颗粒物视作连续体,在一个控制体内,运用守恒方程从质量(组分)守恒条件获得控制方程,解决流场中颗粒物的浓度场的具体信息.模型的基本假设如下:①忽略空气与粒子之间的热量和质量交换;②没有粒子在固体表面(如墙、地面、天花板)的回弹;③在粒子沉积过程中没有粒子凝固;④假设所有颗粒都为球形.

根据流动条件和粒子性能作用在粒子上的力,包括压力梯度力、Basset力、由不稳定流动造成虚拟质量力、布朗运动力和 Saffman 升力.粒子的性能(粒子的大小和密度)和空气的流动范围影响这些力的大小,忽略其中一些足够小的力,只考虑重力、布朗运动力和 Saffman 升力对粒子的影响^[20].

3.3 模拟结果

图4为模拟的 $PM_{2.5}$ 颗粒物平均的质量浓度分布情况.横轴X表示房间的长度,纵轴Z表示房间的高度.从图4(a)可以看出,A房间 $PM_{2.5}$ 颗粒质量浓度为 $1.22 \sim 1.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, B房间颗粒物质量浓度为 $1.10 \sim 1.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$.两个房间由于颗粒物受重力沉积作用,距地面0.3 m以下的细颗粒物质量浓度大,且随房间高度的增加,颗粒物质量浓度减少,整个房间均存在细颗粒物 $PM_{2.5}$ 的分布.模拟结果得到A房间颗粒物的质量浓度比B房间大,与实测结果能够达到一致性.

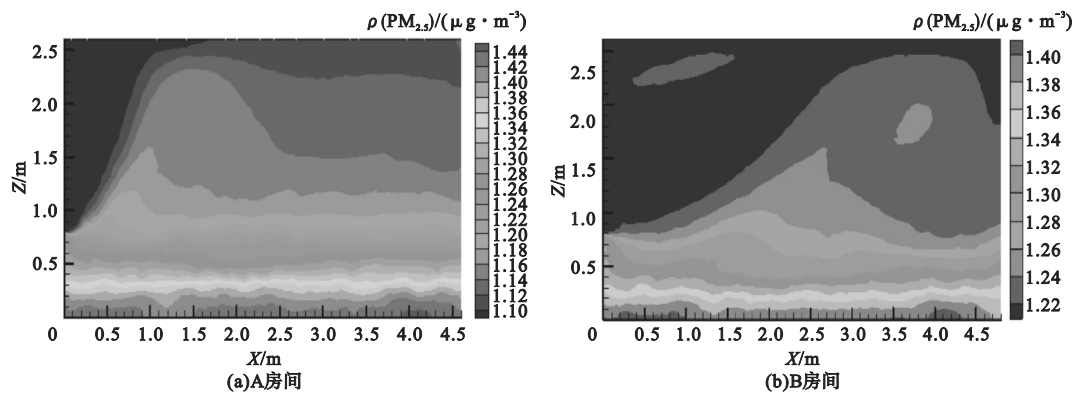


图4 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分布

Fig. 4 Concentration distribution profile of indoor $\text{PM}_{2.5}$

图5为A、B两个房间模型在 $Y=2\text{ m}$ 的截面速度分布场。A、B两房间中细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 在距窗口方向 $X=0\sim3.5\text{ m}$,地面方向 $Z=0.6\sim2.0\text{ m}$ 内速度较大,分别达到 0.80 m/s 、 0.30 m/s ,随着距窗户距离的增加,速度逐渐减小,达到 0.45 m/s 、 0.14 m/s 。在高度 0.5 m 以下区域出现减速

增压区形成涡流,特别是顶部涡流区效果更明显。从图5中可以明显看到:B房间的涡流区比A房间多,通过比较可以得出A房间的通风效果较好,细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 会在较大的风速下运动轨迹更长,风速较小的地方,细颗粒物污染物的滞留时间较长,累积浓度增加。

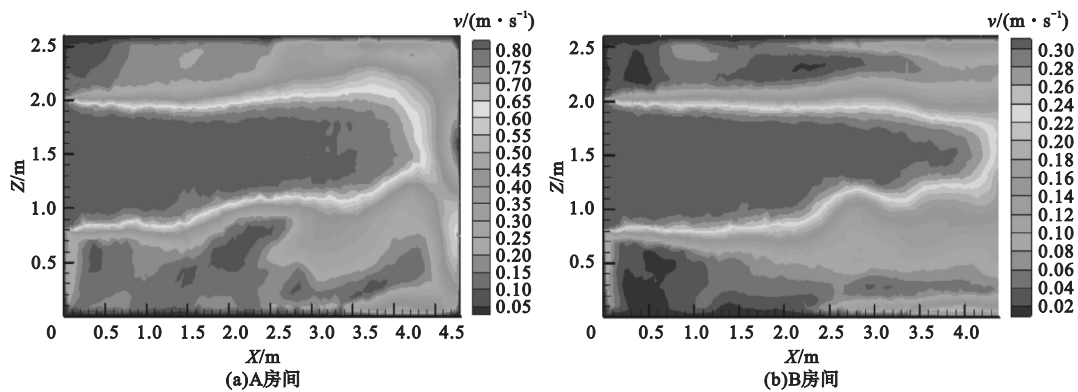


图5 室内速度场分布

Fig. 5 Indoor speed field distribution for room A and B

图6为A、B两房间的温度场,可以得出温度在 $291\sim305\text{ K}$ 变化,温度较高分布在距离地面 $0.8\sim2\text{ m}$ 区域内,是人员站立时的高度;房间底部出现较低的温度。由于夏季室外温度高,室内并没有空调等制冷设备,两个温度场分布相差不大,但是A房间底部温度高于B房间 275 K ,房间的舒适感较差,此房间温度对细颗粒物的运动轨迹没有显著影响。

图7为A、B房间典型细颗粒物进行620的追踪步数得到的粒子轨迹图,从图7中可以看出细颗粒物粒子在两个房间的初始位置是相同的,但由于不同的空气流量,A房间细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞留时间为 0.321 s ,B房间粒子的滞留时间为 0.999 s ,B房间细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散效果不如A房间。

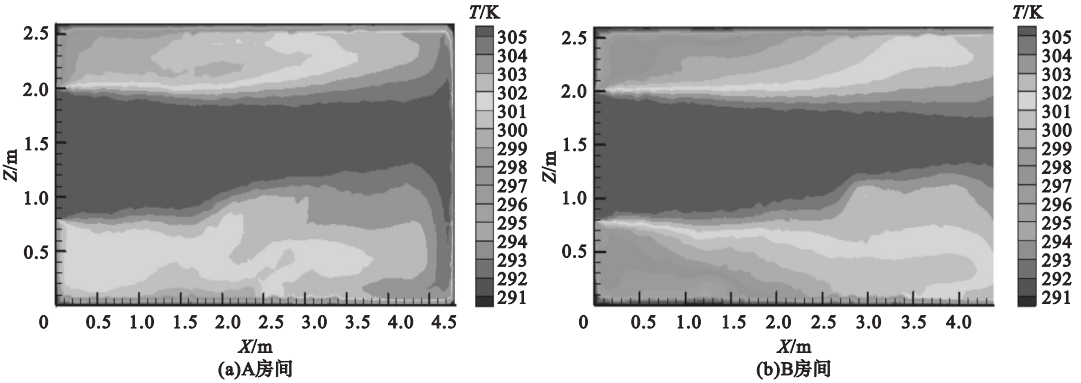


图6 室内温度场分布
Fig. 6 Indoor temperature field distribution for room A and B

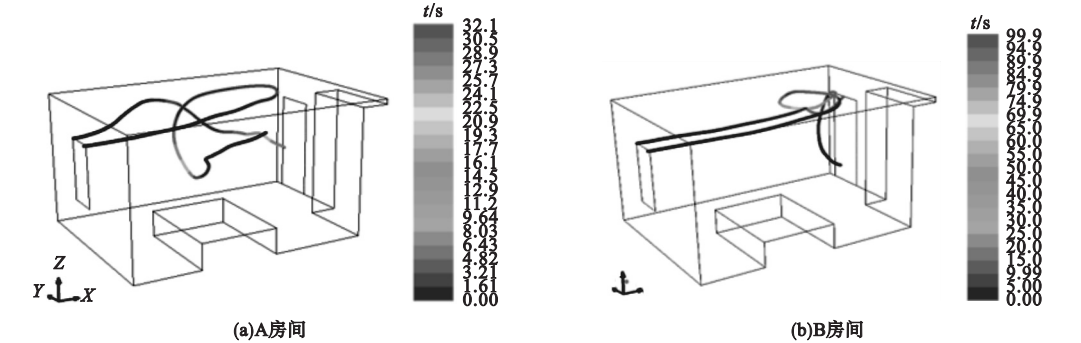


图7 室内粒子运动轨迹
Fig. 7 Indoor particle trajectory for room A and B

4 结 论

(1)对室内外细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的实测与数值模拟能够达到一致的效果。A 房间室外细颗粒物质量浓度要高于 B 房间,不同气象条件对细颗粒物质量浓度影响不同.在不同空气流量的条件下,B 房间细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散效果不如 A 房间,滞留时间较长.

(2)A 房间的 I/O 值小于 1,受室外环境的影响较大;B 房间的 I/O 值大于 1,地理位置处于小区内,无明显的室外污染源,更大的影响来自于室内环境.室内污染物不仅仅来源于室内,汽车、工厂等排放的污染物也会通过自然通风、维护结构的渗透作用从室外进入到室内.通过有效控制室外颗粒物进入室内的途径,可以保证良好的室内空气品质.

(3)室内外细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 具有较强的

相关性,两房间室内外细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的拟合相关系数分别为 $R_A^2=0.920\ 77$ 、 $R_B^2=0.941\ 11$,具有显著的二次相关性,室内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度随室外细颗粒物质量浓度增加而升高.建立室内外细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关性模型,可以分析室内外颗粒物浓度变化特征.

参考文献

[1] 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[J]. 环境工程,2013, 31:642-644
(YAN Li, LIU Liang, XIE Wei, et al. An investigation on indoor and outdoor particulate matter pollution of shopping center in XI'AN city[J]. Environmental engineering, 2013, 31: 642-644.)
[2] 段小丽,陶澍,徐东群,等.多环芳烃污染的人体暴露和健康风险评估方法[M].北京:中国环境科学出版社,2011.
(DUAN Xiaoli, TAO Shu, XU Dongqun, et al. Body exposure and health risk assessment

- methods for polycyclic aromatic hydrocarbons [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.)
- [3] 张金艳, 郭玉明, 孟海英, 等. 北京市朝阳区大气污染与居民每日死亡关系的时间序列研究[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(9): 797 - 799.
(ZHANG Jinyan, GUO Yuming, MENG Haiying, et al. Time-series analysis on relationship between air pollution and daily mortality in chaoyang district, Beijing [J]. Journal of environment and health, 2010, 27(9): 797 - 799.)
- [4] 孙兆彬, 李栋梁, 陶燕, 等. 兰州市大气 PM_{10} 与呼吸系统疾病入院人数的时间序列研究[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(12): 1049 - 1052.
(SUN Zhaobin, LI Dongliang, TAO Yan, et al. Relationship between PM_{10} and hospital admissions for respiratory diseases in Lanzhou [J]. Journal of environment and health, 2010, 27(12): 1049 - 1052.)
- [5] 张振, 刘国红, 彭朝琼, 等. 深圳市城区居民室内空气污染现状调查[J]. 环境卫生学杂志, 2011, 1(5): 10 - 13.
(ZHANG Zhen, LIU Guohong, PENG Chaoqiong, et al. Current status of indoor air pollutants in urban areas of Shenzhen [J]. Journal of environmental hygiene, 2011, 1(5): 10 - 13.)
- [6] 董灿. 济南公共场所室内环境中 $\text{PM}_{2.5}$ 及无机水溶性离子污染特征研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
(DONG Can. Pollution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and water-soluble inorganic ions in public indoor places of Jinan [D]. Jinan: Shandong University, 2012.)
- [7] 樊越胜, 刘亮, 王海涛, 等. 西安市超市建筑室内外颗粒物污染现状调查[J]. 环境工程, 2013, 31, 642 - 644.
(FAN Yuesheng, LIU Liang, WANG Haitao, et al. An investigation on indoor and outdoor particulate matter pollution of supermarket in Xi'an city [J]. Environmental engineering, 2013, 31, 642 - 644.)
- [8] MOLLOY S B. Indoor air quality in typical temperate zone Australian dwellings [J]. Atmospheric environment, 2012(54): 400 - 407.
- [9] SEKHAR S C, GOH S E. Thermal comfort and IAQ characteristics of naturally/mechanically ventilated and air-conditioned bedrooms in a hot and humid climate [J]. Building and environment, 2011(46): 1905 - 1916.
- [10] CHITHRA V S, NAGENDRA S M S. Indoor air quality investigations in a naturally ventilated school building located close to an urban roadway in Chennai, India. [J]. Building and environment, 2012, 54, 159 - 167.
- [11] SEMPLE S, GARDEN C, COGGINS M. Contribution of solid fuel, gas combustion, or tobacco smoke to indoor air pollutant concentrations in Irish and Scottish homes [J]. Indoor air, 2012(22): 212 - 223.
- [12] YUAN B, LIU Y, SHAO M, et al. Biomass burning contributions to ambient VOCs species at a receptor site in the pearl river delta, China [J]. Environment science and technology, 2010(44): 4577 - 4582.
- [13] BAUMGARTNER J, SCHAUER J J, EZZATI M, et al. Indoor air pollution and blood pressure in adult women living in rural China [J]. Environmental health perspectives, 2011, 19(10): 1390 - 1395.
- [14] QIAN J J, PECCIA R. Review: walking-induced particle resuspension in indoor environments [J]. Atmospheric environment, 2014(48): 464 - 481.
- [15] CHEN R, ZHAO B, KAN H, et al. Association of particulate air pollution and daily mortality in 16 Chinese cities: an improved effect estimate after accounting for the indoor exposure to particles of outdoor origin [J]. Environmental pollution, 2013, 182: 278 - 282.
- [16] CHEN C, ZHAO B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor [J]. Atmospheric environment, 2011, 45(2): 275 - 288.
- [17] 袁涛, 李剑东, 王智超, 等. 长沙地区公共建筑热湿现状与热舒适性研究 [J]. 建筑科学, 2010, 26(4): 38 - 43.
(YUAN Tao, LI Jiandong, WANG Zhichao, et al. Study on heat and moisture status and thermal comfort in public buildings of Changsha [J]. Building science, 2010, 26(4): 38 - 43.)
- [18] 赵雪. 北方地区某高校教学建筑室内热环境研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
(ZHAO Xue. Research of the indoor thermal environment in the teaching buildings of a northern university [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.)
- [19] 杨健儿. 上海市近地表大气颗粒物污染特性及来源分析研究 [D]. 上海: 上海华东师范大学, 2011.
(YANG Jianer. Study on pollution feature of TSP on the surface of earth and the TSP source judgement-a case of Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University.)
- [20] KUO H W, SHEN H Y. Indoor and outdoor $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the air during a dust storm [J]. Building & environment, 2010, 45(3): 610 - 614.