

东北地区住宅厨房油烟 $PM_{2.5}$ 分布及操作人员暴露量分析

李慧星,刘 昱,冯国会

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究住宅厨房油烟 $PM_{2.5}$ 扩散规律、分布特性及操作人员呼吸处污染物暴露量. 方法 建立东北地区典型住宅厨房模型,在排烟机恒定运行下,模拟各季节5种典型通风工况,分析厨房油烟 $PM_{2.5}$ 在操作人员呼吸带截面分布情况,同时引入污染暴露模型,计算操作人员污染物暴露量. 结果 冬季污染物浓度分布最均匀,浓度最大,且操作人员暴露量最大;春季、秋季污染物浓度水平比较一致,操作人员暴露量最小;夏季是否开门对污染物浓度影响较小;各工况操作人员暴露量为 $2.0 \times 10^{-5} \sim 8.2 \times 10^{-3}$. 结论 暴露量最小值出现在春秋季窗开、门关的工况,与夏季门窗开启相比,春秋季门窗开启时暴露量较小,冬季门窗关闭时暴露量较大.

关键词 住宅厨房;油烟细颗粒物;呼吸模型;污染暴露量

中图分类号 TU834

文献标志码 A

Study on Distribution and Occupant's Exposure of Fine Particles in a Northern Residential Kitchen

LI Huixing, LIU Yu, FENG Guohui

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

Abstract: It is important to make study on distribution of cooking-fume and occupant's personal exposure to fine particulate matter ($PM_{2.5}$). A residential kitchen model in northern part of China is established for simulation under five typical ventilation conditions in different seasons, with constant operating conditions on the exhaust. Then fine particles distribution in working space area and breathing zone section of operator are analyzed. The value of occupant's exposure to pollutants is calculated. Results show that in winter pollutants have more uniform distribution and high concentration, and the value of occupant's exposure to pollutants is best. Concentration level of pollutants equals in transition season. In summer, there is little effect on pollutant concentrations whether the door is open or closed. The value of occupant's exposure to pollutants varies from 2.0×10^{-5} to 8.2×10^{-3} . The minimum exposure value appears in spring and autumn when the window is open

收稿日期:2017-05-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51378318);辽宁省自然科学基金项目(2016010639);辽宁省教育厅项目(L2015440);住房和城乡建设部项目(2016-K1-020)

作者简介:李慧星(1964—),女,教授,主要从事室内空气质量保障技术研究.

and door is closed. Compared with summer, smaller exposure value appears in spring and autumn when the window and door are open, larger exposure value appears when these are closed in winter.

Key words: residential kitchen; fume fine particles; breathing model; exposure to pollutants

我国城市住宅PM_{2.5}污染严重,厨房作为住宅的重要组成部分,其PM_{2.5}污染已备受建筑室内环境、卫生与人体健康领域共同关注^[1-4].烹饪是室内非吸烟家庭中颗粒污染物的重要来源,油烟细颗粒物能够悬浮在厨房室内较长时间^[5-6].油烟颗粒物粒径在0.1~10 μm,浓度峰值在2.5 μm左右,处于人体可吸入范围^[7-10].我国大多数传统家庭,女性主要承担家庭烹饪活动,接触烹饪污染源时间较长,与男性相比,女性的肺癌发病率较高,同时也高于吸烟女性所占比例.烹饪产生有害污染物是致使女性肺癌发病的主因.然而由烹饪引发的人体健康问题,尚未得到足够多重视^[11-12]. K. L. ABDULLAHI等^[3]测量烹饪产生颗粒物数量和尺寸,得到颗粒物特征. J. Gao等^[7,13]使用喷雾粒度分析仪监测油烟颗粒粒径大部分在1.0~4.0 μm. C. L'Otange等^[14]研究烹饪温度对颗粒物质量浓度的影响,将颗粒物生成率、燃烧效率、炉具热功率联系起来. A. C. K Lai, Y. W. Ho^[10]运用数值模拟技术,以颗粒物粒径3.5 μm为例,研究居住厨房烹饪散发出颗粒物在空间浓度的变化. S. Zhu等^[15]引入非稳态呼吸模型,分析人体呼吸处污染物分布. E. Saito等^[16]对烹饪产生的19种多环芳烃的浓度和尺寸进行研究,表明颗粒物中多环芳烃粒径小于0.43 μm,其90%能够到达人体肺泡区. K. Inthavong等^[17]使用流体力学模型,研究不同气流流动条件下的污染物暴露特性,确定暴露与颗粒物中吸入毒理学效应之间联系. 高军等^[18],对厨房不同通风条件下操作人员呼吸区的暴露浓度开展实验及模拟研究,分析加热食用油不同粒径油烟颗粒浓度时间的变化特征^[19-20];赵玉娇、周金辉^[21-22]采用理论分析、现场测试和数值模

拟方法,研究油烟污染物的扩散模型,分析排烟罩捕集效率影响因素.结合热污染羽流流场、排烟罩及通风系统优化设计,提高排烟罩捕集效率及对室内环境影响改善;谷超、贾欣^[23-24]考虑自然通风和机械通风的组合工况,对室内气流组织情况进行模拟.针对污染物扩散规律,以CO₂、CO代表燃烧废气,考虑灶台区域的热污染,结合实验研究污染物扩散模型.针对厨房室内环境的改善,提出增设补风-排风系统,分析吸油烟机、风口的启闭与位置,污染物控制方案.笔者研究住宅厨房油烟PM_{2.5}扩散规律、分布特性及操作人员呼吸处污染物暴露量.

1 可吸入颗粒物对人体健康的危害

可吸入颗粒物对人体健康的负面影响主要包括:毒理学和流行病学.大量毒理学和流行病学研究表明,空气中颗粒污染物水平,与个体发病率与致死率联系紧密^[10].颗粒物能够引起多种疾病,例如心脑血管、呼吸系统疾病等.深入人体呼吸系统的微细颗粒物,通过肺泡进入血液,严重损害心肺等器官,甚至威胁生命^[1-2,5].

颗粒物进入人体的程度如图1所示.

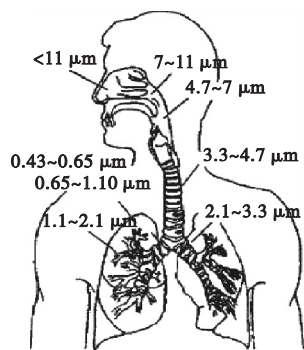


图1 颗粒物进入人体的程度

Fig.1 Particulate matter into human body

人体可吸入颗粒物 PM_{10} 相比,细颗粒物 $PM_{2.5}$ 具有更大的比表面积,能够吸附更多有毒、有害物质,对人体健康影响更加严重;细颗粒物 $PM_{2.5}$ 以及超细颗粒物 $PM_{1.0}$ 进入人体呼吸系统更深位置^[25-27]。

2 细颗粒物运动特性及数值模拟方法

2.1 颗粒物扩散

颗粒在对流与扩散作用下,与气流运动方式存在差异。通风决定室内气流组织形式,气流组织又对颗粒物的运动起决定性作用,颗粒物的运动与气流湍流流动密切相关,不同粒径所服从不同的空气动力学规律,描述颗粒的三个无因次准则数:努森数、粒子雷诺数和传质施密特数。

2.2 湍流流动模型

湍流模型包括:一方程模型、Spalart - Allmaras 模型、 $k-\varepsilon$ 双方程模型、重正规化群(RNG $k-\varepsilon$)模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型等。厨房室内环境中存在显著的热量传递,引起显著的热浮力,对颗粒物的运输有着显著影响^[28]。

2.3 颗粒物两相流模型

两相流模型包括:拉格朗日模型、简化的欧拉模型(混合模型、滑移通量模型)、和欧拉-欧拉模型。对于空气流场,不同模型采用相同的欧拉方程来解决,不同之处是解决颗粒相所用的方法^[28]。室内颗粒物从数十 nm 级别到 100 μm 级别,颗粒物尺寸谱比较广泛,使得运输过程复杂。拉格朗日方法具有内存密集、计算低效率的缺点,但在颗粒物沉降过程方面优势独特。

3 住宅厨房细颗粒物分布数值模拟

3.1 厨房模型

选取东北地区常见的住宅厨房格局,建立长宽高为 3.50 m \times 1.80 m \times 2.40 m 的厨

房立方体三维模型。其中单扇窗户长宽为 0.50 m \times 1.20 m,门长宽为 0.80 m \times 1.80 m,灶台长宽高为 3.50 m \times 0.40 m \times 0.60 m,将厨房操作人员简化为长方体多块模型^[19],站立处距离灶台 0.10 m,操作人员呼吸处简化为 0.02 m \times 0.02 m 平面。截取厨房中距离地面高 1.5 m 的呼吸带截面。厨房空间布局截面选取如图 2 所示。

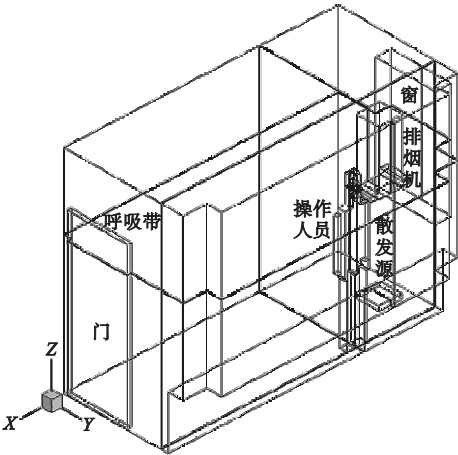


图2 厨房布局模型及模拟截面选取

Fig. 2 Schematic of the residential kitchen and the layout of section

3.2 模拟工况及边界条件

在封闭式厨房、上吸式排烟机的恒定风量运行状态,忽略厨房结构布置型式、排油烟机结构型式及安装方式等相关的其他因素,主要考虑主要影响因素为:不同季节及不同窗口风速。对门窗开闭情况、窗口不同入口风速 5 种组合工况进行模拟,其中窗口入口风速值假设为恒定,工况模拟设定情况见表 1。

表1 工况设定

Table 1 Case settings

工况	窗口风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	门(开闭情况)	模拟季节
I	0	关闭	冬季
II	0.4	开启	夏季
III	0.4	关闭	夏季
IV	0.8	开启	春季、秋季
V	0.8	关闭	春季、秋季

厨房内烹饪油烟成分非常复杂,密度会发生变化,为了得到比较合理的结果,进行简

化处理:油烟的散发强度设定为 1×10^{-6} kg/s,油滴密度取 850 kg/m^3 ,以 $2.5 \text{ }\mu\text{m}$ 作为油烟颗粒物的粒径值. 炉灶产生 50 W/m^2 的热流,取灶孔平均温度为 483.15 K 进行计算,排烟机出口选取排气扇边界类型并取设定值 200 Pa ,操作人员呼吸处设定为速度入口并取数值为 0.0015 m/s ,其他边界类型及设定值见表2.

表2 边界条件设定
Table 2 Boundary conditions

边界名称	边界类型	工况	温度/K
炉具散发源	质量入口	I、II、III、IV和V	483.15
排油烟机出口	排气扇	I、II、III、IV和V	313.15
		I	278.15
窗户	速度入口	II和III	298.15
		IV和V	293.15
		I	288.15
门	自由出流	III	293.15
		V	283.15
		I	288.15
墙	壁面	II和III	293.15
		IV和V	283.15
操作人员	速度入口	I、II、III、IV和V	304.15

3.3 模拟结果分析

工况 I 呼吸带截面温度与油烟 PM_{2.5} 浓度分布如图3所示. 工况 I 为冬季,散发源上部及水平方向温度分布均匀. 在呼吸带 XY (X 为厨房长度方向、Y 为厨房宽度方向) 截面上,热量向中心扩散并趋于一致,操作人员至热源处温度梯度较大,温度在 $300.05 \sim 306.15 \text{ K}$. 呼吸带截面油烟 PM_{2.5} 浓度分布比较均匀,由 $0.003 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$ 增大到最大值 $0.035 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$ 并趋于稳定.

工况 II 呼吸带截面温度分布、油烟 PM_{2.5} 浓度分布如图4所示. 工况 II 为夏季开窗开门工况,窗口风速较大,热量向热源外侧扩散逐渐聚集在下部空间,热量扩散远离窗口方向,逐渐在厨房中部聚集,窗口与散发源之间存在热量聚集情况. 温度为 $300.15 \sim 305.65 \text{ K}$,温度分布的规律与浓度保持一致. 最初由于窗口风速导致污染物分布不均匀,油烟 PM_{2.5} 污染物逐渐向厨房下部空间聚集并扩散至门侧,同时也向炉具、窗户拐角处聚集,最大值 $0.0075 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$.

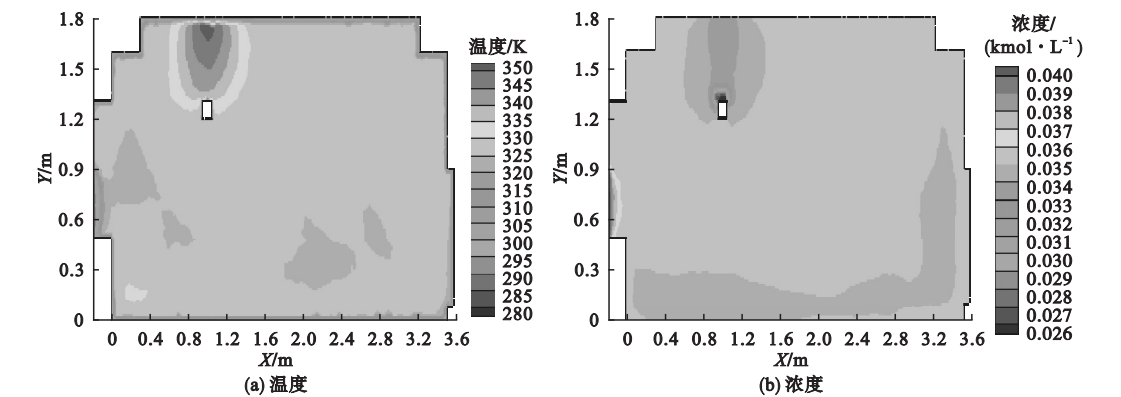


图3 工况 I 呼吸带截面温度与油烟 PM_{2.5} 浓度分布

Fig. 3 Temperature and PM_{2.5} concentration distribution of breathing section in Case I

工况 III 呼吸带截面温度与油烟 PM_{2.5} 浓度分布如图5所示. 工况 III 为夏季开窗关门工况,同工况 II 做比较,厨房空间下部热量较少聚集,逐渐扩散至厨房中部,由于门处于关闭状态,热量分布比较集中,窗口风速导致热量向人员右侧方向移动,呼吸带截面

温度为 $295.05 \sim 304.65 \text{ K}$. 油烟 PM_{2.5} 浓度分布不均匀. 由于门关闭,在散发源处扩散不显著,逐渐扩散到操作人员靠门侧. 呼吸带截面浓度变化存在较大波动,峰值为 $0.0095 \text{ kmol}\cdot\text{m}^{-3}$,温度大体为上升趋势.

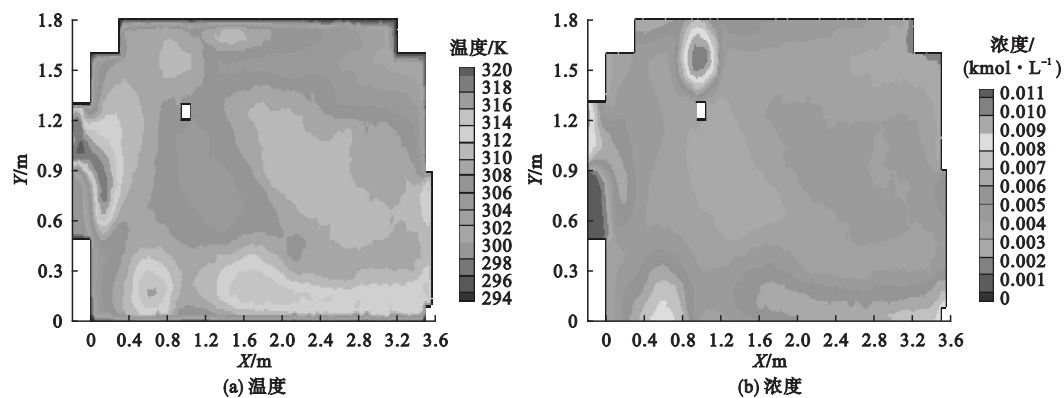


图 4 工况 II 呼吸带截面温度与油烟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 4 Temperature and $\text{PM}_{2.5}$ concentration distribution of breathing section in Case II

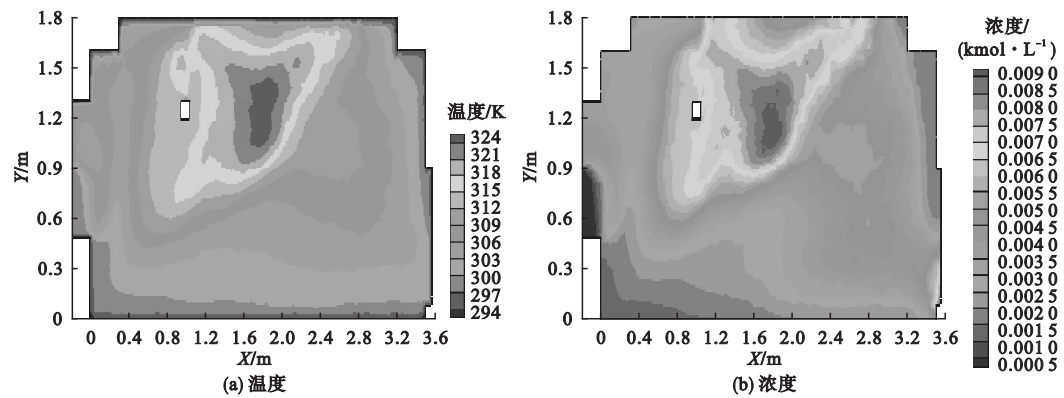


图 5 工况 III 呼吸带截面温度与油烟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 5 Temperature and $\text{PM}_{2.5}$ concentration distribution of breathing section in Case III

工况 IV 呼吸带截面温度与油烟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布如图 6 所示. 工况 IV 为春季、秋季开窗开门工况, 与工况 II 做比较, 由于增大窗口风速, 热量聚集于厨房空间下部, 但厨房下部空间油烟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较少, 污染物随气流扩散

到右侧, 到达操作人员呼吸处的浓度较低, 温度分布与污染物浓度分布趋势相同. 呼吸带截面污染物靠近窗口侧分布混乱, 靠近门侧分布均匀, 波动幅度较大, 峰值为 $0.0045 \text{ kmol} \cdot \text{m}^{-3}$.

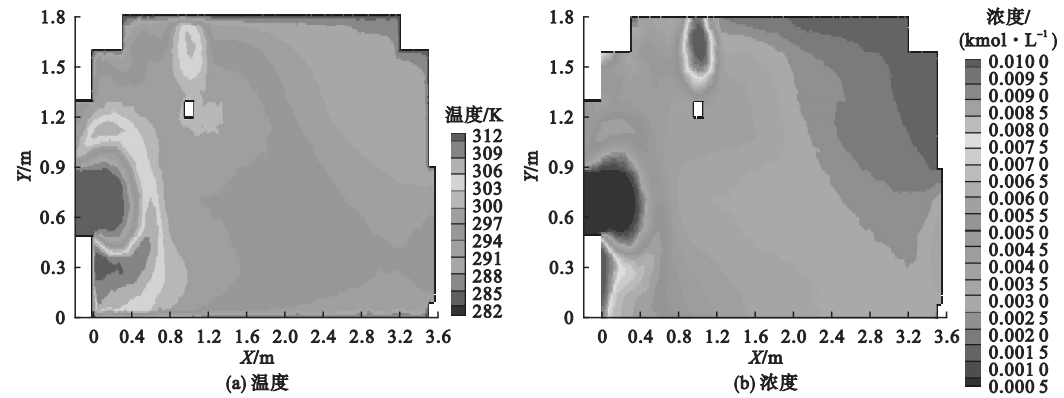


图 6 工况 IV 呼吸带截面温度与油烟 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 6 Temperature and $\text{PM}_{2.5}$ concentration distribution of breathing section in Case IV

工况 V 呼吸带截面温度分布、油烟 PM_{2.5} 浓度分布如图 7 所示。工况 V 为过渡季节开窗关门工况,温度分布不均匀、气流组织比较混乱。与工况 IV 比较,门关闭状态使得热量扩散不明显,呼吸带截面温度分布不均匀。

与工况 III 做比较,窗口风速增大使得油烟 PM_{2.5} 浓度较小,增大风速能够降低呼吸处污染物浓度。与工况 IV 做比较,门关闭使得油烟 PM_{2.5} 浓度变化不明显,污染物向人员靠窗口附近转移。

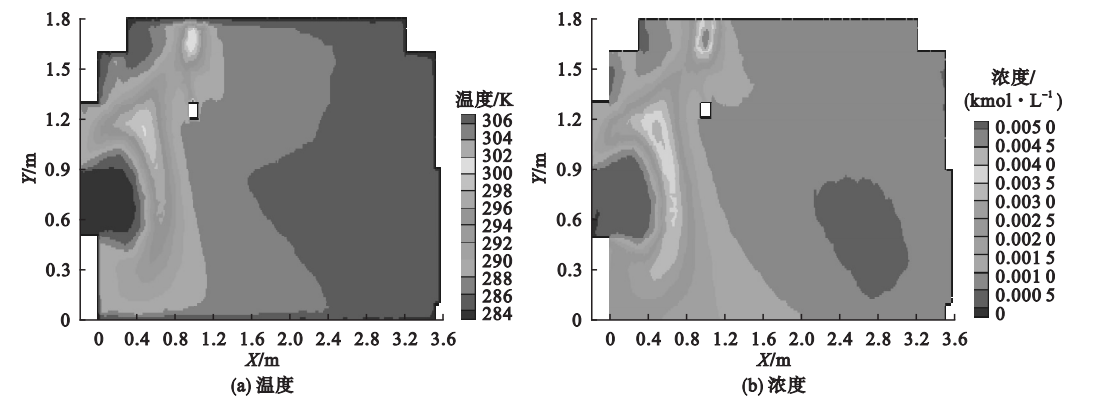


图7 工况 V 呼吸带截面温度分与油烟 PM_{2.5} 浓度分布

Fig. 7 Temperature and PM_{2.5} concentration distribution of breathing section in Case V

比较不同工况中呼吸带截面温度、油烟 PM_{2.5} 浓度数值模拟结果可知,在工况 I 中,浓度分布均匀性最好但浓度最大;工况 II 中温度分布规律与浓度保持一致;工况 III 中浓度存在较大幅度变化,温度总体趋势升高;工况 II、III 中污染物分布差异明显,但水平相当,说明在夏季工况下门开与关对污染物浓度影响较小;工况 IV 高于工况 V,说明过渡季节开门,截面污染物浓度增加。

此有必要对其进行暴露分析. 结合人体呼吸模型,分析污染暴露量计算模型,分析不同通风工况、烹饪阶段下操作厨房人员细颗粒物暴露量特性。

4 操作人员污染物暴露量模拟分析

4.1 人员呼吸模型

引入人体呼吸模型来确定污染暴露量. 呼吸按稳定状态考虑,频率为 10 次/min,呼吸空气量为 0.6 L/次(吸入或呼出),温度取 34 ℃,密度取 1.15 kg/m³,呼吸截面长宽取 0.02 m×0.02 m. 根据人体稳态呼吸过程特点,得到呼吸模型^[19]:

厨房操作人员受颗粒物污染的影响,因

$$B_v(t) = \begin{cases} \frac{3\pi}{25} \sin \frac{2}{5} \pi [t - (n-1)], & 6(n-1) \leq t \leq 6(n-1) + 2.5; \\ \frac{3\pi}{25} \sin \frac{2}{5} \pi \left[t - \left(n - \frac{1}{2} \right) \right], & 6(n-1) + 3 \leq t \leq 6(n-1) + 5.5. \end{cases}$$

(1)

式中: B_v(t) 为呼吸空气量, L/s; t 为呼吸时间, s; n 为呼吸次数。

4.2 暴露量计算模型

吸入率与呼吸模型相结合, 得出污染暴露量计算模型^[19]:

$$iF_n = \frac{B_v(t) \cdot C(t)}{Q(t)}.$$

(2)

式中: C_v(t) 为人体吸入污染物浓度; Q(t) 为油烟颗粒散发强度; iF_n 为油烟作用下的污染暴露量, n 取 1, 2, 3, 4, 5。

$$iF = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 iF_n . \tag{3}$$

式中: iF 为操作人员在油烟细颗粒物下的平均污染暴露量.

4.3 暴露量数值模拟

不同工况操作人员呼吸处油烟 $PM_{2.5}$ 暴露量如表 3 所示. 从表 3 可以看出,用吸入率表示厨房操作人员呼吸处油烟 $PM_{2.5}$ 暴露量. 工况 I 中,最初阶段的暴露量数值较小且较一致,此后逐渐降低但差值变大,最大值达到 8.2×10^{-3} ,其后数值稳定并保持较高,平均值为 4.0×10^{-3} ; 工况 II 中,暴露量最初在 1.5×10^{-3} 且较一致,此后增加达到最大值 3.0×10^{-3} ,随后降低; 工况 III 中,暴露量最初小于 2.0×10^{-3} 且较为一致,峰值达到 4.3×10^{-3} 后降低,与工况 II 相比,暴露量最大值高于工况 II 且出现的时间早于工况 II; 工况 IV 中,暴露量最初为 1.25×10^{-3} ,此后达到稳定状态,最大值为 2.1×10^{-3} ,平均值为 1.0×10^{-3} ; 工况 V 中,暴露量最初最小 2.0×10^{-5} ,此后达到最大值 1.25×10^{-3} ,随后数值整体降低达到最小值. 与工况 IV 相比,暴露量数值大部分较低,最小值出现在工况 V.

表 3 不同工况操作人员呼吸处油烟 $PM_{2.5}$ 暴露量
Table 3 Occupant's exposure value of $PM_{2.5}$ in under different cases

工况	暴露量/ 10^{-3}			
	最小值	平均值	中位数	最大值
I	0.16	3.07	2.40	8.20
II	0.11	1.30	1.38	3.10
III	0.04	1.36	1.36	4.27
IV	0.05	0.98	1.07	2.11
V	0.02	0.45	0.33	1.26

分析不同工况中操作人员呼吸处油烟 $PM_{2.5}$ 暴露量数值,在各工况各阶段中暴露量最小值差异明显,从小到大的排序依次为:春秋季关门(工况 V) 暴露量 < 春秋季开门(工况 IV) 暴露量 < 夏季开门(工况 II) 暴露量 < 夏季关门(工况 III) 暴露量 < 冬季关门

(工况 I) 暴露量. 暴露量最小值出现在春秋季节窗开门关的工况,与夏季门窗开启相比,春秋季门窗开启时暴露量较小,冬季门窗关闭时暴露量较大.

5 结 论

(1) 冬季油烟 $PM_{2.5}$ 污染物分布最均匀但浓度最大; 春秋季油烟 $PM_{2.5}$ 浓度水平较一致,开门增加油烟 $PM_{2.5}$ 浓度; 夏季是否开门对油烟 $PM_{2.5}$ 浓度影响较小.

(2) 冬季操作人员对油烟 $PM_{2.5}$ 污染物的吸入率最大; 春秋季操作人员对油烟 $PM_{2.5}$ 污染物的吸入率最小,数值在 $2.0 \times 10^{-5} \sim 8.2 \times 10^{-3}$.

参考文献

[1] LAI A C K, CHEN J. Numerical study of cooking particle coagulation by using an eulerian model[J]. Building & environment, 2015, 89: 38 – 47.

[2] WAN M P, WU C L, TO G N S, et al. Ultra-fine particles, and $PM_{2.5}$ generated from cooking in homes [J]. Atmospheric environment, 2011, 45(34): 6141 – 6148.

[3] ABDULLAHI K L, DELGADO-SABORIT J M, HARRISON R M. Emissions and indoor concentrations of particulate matter and its specific chemical components from cooking: A review [J]. Atmospheric environment, 2013, 71(2): 260 – 294.

[4] CHANG T J, KAO H M, HSIEH Y F. Numerical study of the effect of ventilation pattern on coarse, fine, and very fine particulate matter removal in partitioned indoor environment [J]. J air waste manage assoc, 2007, 57(2): 179 – 189.

[5] 沈琳. 微细颗粒物对居民建筑室内空气质量影响的预测 [D]. 长沙: 东南大学, 2006. (SHEN Lin. Effects of fine particulate matters on air quality in natural ventilation buildings: Model developments and computer simulations [D]. Changsha: Central South University, 2006.)

[6] FONTANA L, QUINTINO A. Experimental analysis of the transport of airborne contaminants between adjacent rooms at different pressure due to the door opening [J]. Building & environment, 2014, 81(81): 81 – 91.

[7] GAO J, CAO C, ZHANG X, et al. Volume-based size distribution of accumulation and coarse particles ($PM_{0.1-10}$) from cooking fume during oil heating [J]. Building & environ-

- ment, 2013, 59: 575 – 580.
- [8] GÉHIN E, RAMALHO O, KIRCHNER S. Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities[J]. *Atmospheric environment*, 2008, 42(35): 8341 – 8352.
- [9] JI W, ZHAO B. Contribution of outdoor-originating particles, indoor-emitted particles and indoor secondary organic aerosol (SOA) to residential indoor $\text{PM}_{2.5}$ concentration: A model-based estimation[J]. *Building & environment*, 2015, 90: 196 – 205.
- [10] LAI A C K, HO Y W. Spatial concentration variation of cooking-emitted particles in a residential kitchen[J]. *Building & environment*, 2008, 43(5): 871 – 876.
- [11] LI A, ZHAO Y J, JIANG D, et al. Measurement of temperature, relative humidity, concentration distribution and flow field in four typical Chinese commercial kitchens[J]. *Building & environment*, 2012, 56(10): 139 – 150.
- [12] 王森. 厨房结构及布局对厨房空气质量影响的模拟研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
(WANG Miao. The kitchen structure and layout of the simulation study of the impact of air quality in kitchen[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.)
- [13] GAO J. Determination of size-dependent source emission rate of cooking-generated aerosol particles at the oil-heating stage in an experimental kitchen[J]. *Aerosol & air quality research*, 2013, 13(2): 488 – 496.
- [14] L'OTANGE C, VOLCKENS J, DEFOORT M. Influence of stove type and cooking pot temperature on particulate matter emissions from biomass cook stoves[J]. *Energy for sustainable development*, 2012, 16(4): 448 – 455.
- [15] ZHU S, KATO S, MURAKAMI S, et al. Study on inhalation region by means of CFD analysis and experiment[J]. *Building & environment*, 2005, 40(10): 1329 – 1336.
- [16] SAITO E, TANAKA N, MIYAZAKI A, et al. Concentration and particle size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons formed by thermal cooking[J]. *Food chemistry*, 2014, 153(9): 285 – 291.
- [17] INTHAVONG K, GE Q J, LI X D, et al. Detailed predictions of particle aspiration affected by respiratory inhalation and airflow[J]. *Atmospheric environment*, 2012, 62(12): 107 – 117.
- [18] 高军, 曹昌盛, 周翔, 等. 住宅厨房油烟颗粒散发阶段呼吸区短期暴露的实验研究[J]. *建筑科学*, 2012, 28(增刊2): 72 – 74.
(GAO Jun, CAO Changsheng, ZHOU Xiang, et al. Experimental study on short term exposure of the respiratory area in the stage on the distribution of particles in a residential kitchen[J]. *Building science*, 2018, 28(S2): 72 – 74.)
- [19] 王军, 张旭. 建筑室内人员污染暴露量及其特征性分析[J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(1): 13 – 16.
(WANG Jun, ZHANG Xu. Amount of occupants' exposure to indoor pollutant and its characteristics[J]. *Environmental science & technology*, 2012, 35(1): 13 – 16.)
- [20] GAO J, CAO C S, XIAO Q, et al. Determination of dynamic intake fraction of cooking-generated particles in the kitchen[J]. *Building & environment*, 2013, 65(3): 146 – 153.
- [21] 赵玉娇. 厨房污染物控制原理与局部排烟罩性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
(ZHAO Yujiao. Study on pollutant control principle and performance of local exhaust hood[D]. Xi'an: Xi'an University of architecture and technology, 2013.)
- [22] 周金辉. 住宅厨房排烟量的确定及烟道形式对烟气流动影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
(ZHOU Jinhui. Study to determine the reasonable exhaust volume and flue in the form of residential kitchens impact on the flow of exhaust[D]. Xi'an: Xi'an University of architecture and technology, 2014.)
- [23] 谷超. 厨房污染物扩散规律研究与动态模拟软件开发[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
(GU Chao. Experimental study and dynamic simulation software development of pollutants diffusion in a kitchen[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [24] 贾欣. 厨房污染物控制方案的研究与评价: 污染物分布模拟和吸油烟机优化选型软件开发[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
(JIA Xin. Study and evaluation of kitchen air quality and control schemes: The software development of contaminant distribution simulation and optimal selection of exhaust rangehood[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [25] ZHAO B, CHEN C, TAN Z. Modeling of ultrafine particle dispersion in indoor environments with an improved drift flux model[J]. *Journal of aerosol science*, 2009, 40(1): 29 – 43.
- [26] CHITHRA V S, NAGENDRA S M. Characterizing and predicting coarse and fine particulates in classrooms located close to an urban roadway[J]. *Journal of the air & waste management association*, 2014, 64(8): 945.
- [27] MAŠKOVÁ L, SMOLÍK J, VODIČKA P. Characterisation of particulate matter in different types of archives[J]. *Atmospheric environment*, 2015, 107: 217 – 224.
- [28] LI X, YAN Y, SHANG Y, TU J. An eulerian eulerian model for particulate matter transport in indoor spaces[J]. *Building & environment*, 2015, 86: 191 – 202.