

基于动网格模型的人员走动对 厨房流场影响研究

李慧星,刘昕怡,冯国会,黄凯良,茹月

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究人员走动对厨房气流场及油烟颗粒物捕获的影响。方法 以厨房烹饪过程为背景,应用动网格模型分析人员走动对厨房气流场的影响,选用 RNGk- ϵ 模型对厨房气流场模拟分析,运用拉格朗日离散模型跟踪颗粒物运动,采用动态网格法的层铺模型对运动产生的变形网格进行更新。结果 当人员走动速度为 0.5 m/s 时,身体后方气流速度最大为 0.84 m/s,人员运动 6 s 内 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的捕获率分别为 94.76%、94.85% 和 92.75%;走动速度为 0.7 m/s 时,气流速度最大为 1.11 m/s, $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的捕获率分别为 89.51%、89.24% 和 84.09%;走动速度为 1.0 m/s 时,气流速度最大为 1.52 m/s, $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 的捕获率分别为 87.08%、86.58% 和 81.49%。结论 人员走动使厨房内流场出现扰动现象,阻碍油烟颗粒物的捕获;人员走动速度越快,气流扰动越明显,油烟颗粒物越难捕获;扰动气流对 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 两种粒径颗粒物影响基本一致,大于对 PM_{10} 等大粒径颗粒物所受影响。

关键词 住宅厨房;油烟颗粒物;动网格;流场

中图分类号 TU834

文献标志码 A

Impacts of Human Walking on the Airflow Field in the Kitchen Using Dynamic Mesh Model

LI Huixing, LIU Xinyi, FENG Guohui, HUANG Kailiang, RU Yue

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

Abstract: In order to investigate the effects of human walking on air flow field and smoke particle capture in the kitchen, the flow field in the kitchen was simulated by RNG k- ϵ model based on dynamic mesh, and the Joseph-Louis Lagrange discrete model is used to track the particle motion. The computation domain is divided into dynamic grid area and static grid area, and the dynamic grid method is used to update the deformation grid because of movement. The simulation result shows that when the walking speed was 0.5 m/s, the maximum air flow velocity behind the body was

收稿日期:2021-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52178082)

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等方面研究。

0.84 m/s. The capture rates of $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ and PM_{10} in 6 seconds after human movement were 94.76%, 94.85% and 92.75%, respectively. When the walking speed was 0.7 m/s, the maximum air flow velocity behind the body was 1.11 m/s. The capture rates of $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ and PM_{10} were 89.51%, 89.24% and 84.09%, respectively. When the walking speed was 1.0 m/s, the air flow velocity behind the body increased by 1.52 m/s, and the removal rates of $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ and PM_{10} were 87.08%, 86.58% and 81.49%, respectively. The flow field in the kitchen is disturbed by human movement, which hinders the discharge of fume particles. The faster the people move, the more obvious the disturbance of the air flow field is, and the more disadvantageous it is to the emission of fume particles. The disturbance of the air flow caused by the people moving has basically the same effect on $PM_{1.0}$ and $PM_{2.5}$ particles, and these effects are bigger than that of PM_{10} particles.

Key words: residential kitchen; fume particles; dynamic mesh method; airflow field

为保证室内环境健康舒适,空气品质首先必须要得到保障^[1-2]。厨房是居住空间内污染物散发最严重的区域^[3-4],烹饪过程中,食材与食用油在高温烹调下产生颗粒物(PM)是危害室内人员身体健康的重要因素^[5-6]。当前在厨房内空气污染研究中,常常将人员视为静止,忽略厨房内人员活动的影响。事实上,人员活动对流场范围内颗粒物浓度分布会产生相应的影响^[7-9]。I. Goldasteh 等^[10]发现人员走动可造成地面颗粒物的再悬浮运动,增大室内颗粒物的再悬浮率和暴露程度。J. Wang 等^[11]通过实验发现在人走动过程中有尾流产生,人员周围流场速度局部增大,这有利于减少悬浮液滴总数。S. Mazumdar 等^[12]研究了步行访客、换床单、门摆动等移动物体对相对密闭的环境污染物浓度分布的影响。Y. Wu 等^[13]发现人的走动有利于室内污染物的扩散。H. Matsumoto 等^[14]移动物体可能对室内气流和污染物的传输有很大的影响,人员活动产生的尾流严重干扰气流组织,影响室内颗粒物的扩散,进而影响室内空气质量^[15]。笔者基于计算流体动力学(CFD)通过改变烹饪人员走动速度研究人员走动对厨房流场的影响,为防止污染物扩散,改善厨房环境提供技术支持。

1 动网格原理

人员走动会导致人员位置发生变化,在

计算每个时间步之前,需要重新计算厨房几何模型并以一定的规则对模型网格进行重新划分,需要引入动网格模型。

假定人员走动路径为直线,动态分层模型适用于移动方向为直线的结构化网格,在边界发生运动时,动网格区域随紧邻运动边界网格层高度的变化而变化,使网格尺寸在动态区域内保持不变,有利于保持网格的划分质量。采用动态分层模型对边界运动导致的网格变形进行更新划分更利于计算。当壁面一部分保持静止时,为简化计算步骤,节约计算成本,这部分独立出动态区域,只需在运动边界上采用动网格方法,并采用滑移网格连接。动网格守恒方程的积分形式^[16]可以写成:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_{\partial V} \rho \varphi (u - u_g) dA = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \varphi dA + \int_V S_\varphi dV. \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; V 为控制体体积; φ 为通用标量; u 为速度; u_g 为动网格速度; Γ 为扩散系数; S_φ 为源项; A 为控制面面积; ∂V 为控制体积的边界。

2 颗粒物运动特性及数值模拟方法

2.1 气流的控制方法

重整化群(RNG) $k-\epsilon$ 模型能更好地处理

高应变率及流线弯曲程度较大的流动,在描述室内空气低速流动的模型中应用更加普遍。厨房烹饪过程中产生的热量传递显著影响颗粒物的输运过程,采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型更贴合实际情况。RNG $k-\varepsilon$ 模型的湍动能方程和耗散率计算方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_s \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_s \mu_{\text{eff}}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (3)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

式中: G_k 为速度湍动能; G_b 为浮力湍动能; Y_M 为可脉动膨胀影响因素; C 为经验常数。

2.2 离散相模型-基于拉格朗日方法下的固相求解

采用拉格朗日离散相模型,把空气相视为连续相,使用欧拉方法计算,将颗粒物视为离散相,且不考虑颗粒物对空气流造成的影响。假设:①空气和颗粒物之间的传热和传质可以忽略不计;②墙壁、地板、天花板等固体表面和人体表面没有颗粒反弹和再悬浮;③所有颗粒物都是球形固体。离散相模型中,以 x 方向为例说明颗粒物的受力平衡方程:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + F_x \quad (5)$$

式中: u_p 为速度, m/s; F_D 为流体曳力, N; ρ_p , ρ_g 均为密度, kg/m³; F_x 为其他外力, N。

运移过程中的速度:

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (6)$$

类比可得 y 、 z 方向速度及其运动轨迹。

3 厨房人员走动数值分析

3.1 厨房及烹饪人员物理简化模型

住宅厨房模型如图1所示,厨房采用 L 型布局,长 × 宽 × 高 = 4.00 m × 1.50 m × 3.00 m; 窗户宽 × 高为 0.80 m × 1.20 m; 门宽 × 高 = 0.9 m × 2.00 m。

在模拟过程中,对人员模型进行简化处理。J. Wang^[11]等采用长方体来模拟人员模型; S. B. Poussou^[17]等认为将人员模型直接简化成等高的长方体所造成的误差在可控范围内,且此种方法的计算成本最低,因此,笔者将烹饪人员模拟为长方体模型,长 × 宽 × 高 = 0.30 m × 0.20 m × 1.65 m,站在距柜台 0.20 m 处。取高度 1.5 m 水平面作为分析平面,因为人员呼吸的空气主要来自该区域。

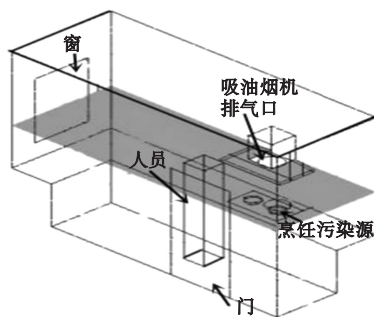


图1 住宅厨房几何模型

Fig. 1 Geometric model of residential kitchen

3.2 动网格划分

将模型通过 Interface 表面划分为3个区域(见图2)。只对中间区域进行动态计算,减少了动态网格的数量,提高模型求解速度,节省计算时间^[11]。

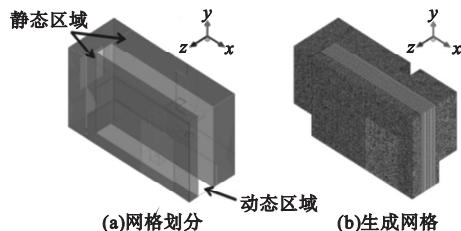


图2 网格区域划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid area division

3.3 模型步长选择

所采用的 CFD 模型是瞬态的,并将在时间步长 Δt 处及时推进。选择时间步长是为了使人体模型在 Δt 时间内所跨越的距离小于元素的大小,避免网格控制区域重叠,从而出现负的单元格区域。因此,时间步长设置为 0.001 s,可以保证更新动态网格,并在运动时间内不会降低模型动态网格质量。

3.4 网格独立性验证

为提高模拟计算结果的可靠性,进行网格独立性验证。案例 1,案例 2,案例 3 分别对应网格数量为 1 541 273、2 744 248 和 4 774 540 的模型。对 3 种网格数量的案例进行数值模拟。在厨房模型中选取 5 个点:1(2.812 5, 1.0,0.3)、2(2.812 5,1.1,0.3)、3(2.812 5,

1.2,0.3)、4(2.812 5,1.3,0.3)、5(2.812 5, 1.4,0.3)。图 3 为网格独立性验证结果,由图可以看出,由于案例 2 和案例 3 网格模拟得到的速度值和温度值误差小于 5%,且案例 2 计算成本要小于案例 3。因此,选择案例 2 的网格进行模拟,可保证网格数量的改变对模拟结果的影响最小。

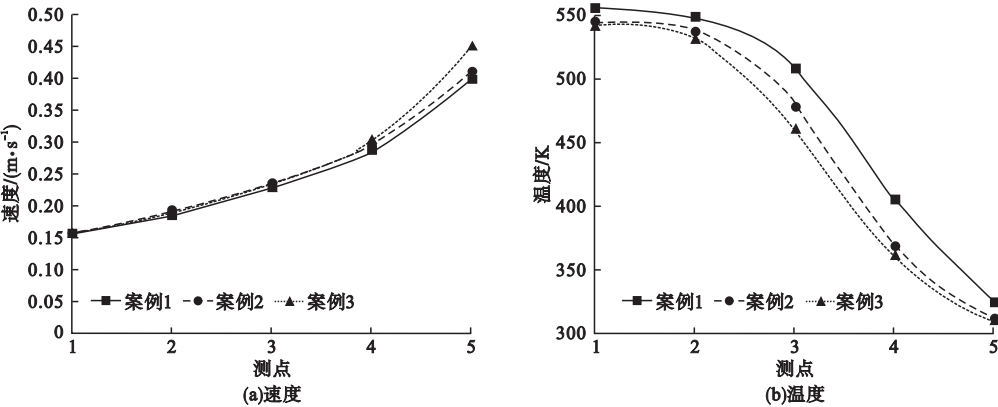


图 3 网格独立性验证
Fig. 3 Verification of grid independence

3.5 边界条件

结合日常经验,在厨房中人员最小步行速度为 0.25 m/s,最大步行速度为 1.00 m/s,假设人员走动的速度分别为 0.5 m/s、0.7 m/s和 1.0 m/s。

边界条件设置:窗户为补风入口,设为 Pressure-inlet 边界,静压为 0 Pa;选取油烟机风机吸风口为排风出口,设为 Velocity-outlet 边界,取风管风速为 3.0 m/s。锅面设为 Velocity-inlet 边界,取油烟上浮速度为 0.5 m/s,温度为 210 ℃;其他壁面均设为绝热,所有壁面均为无渗透、无滑移。室内初始温度取夏季室内标准温度 26 ℃。

颗粒相的设置:假定颗粒密度为

950 kg/m^3 ,在第 0 秒喷射 1 万个粒子;考虑颗粒与流体的相互作用,设置排风口与窗户进口为 Escape 边界,其他面为都设置为捕获 Trap 边界,烹饪时的锅具采用反弹 Reflect 边界;同时考虑流体拽力、重力、Brownian 力以及 Saffman 升力的影响。

4 结果分析

4.1 厨房人员走动轨迹

为简化模型,设定人员在厨房中作匀速直线走动。人员开始运动时以 0.5 m/s 的速度向左运动,2 s 后以相同速度向右运动 4 s,最后以相同速度向左运动返回初始位置,即第 8 s末停止走动。具体运动路线如图 4 所示。

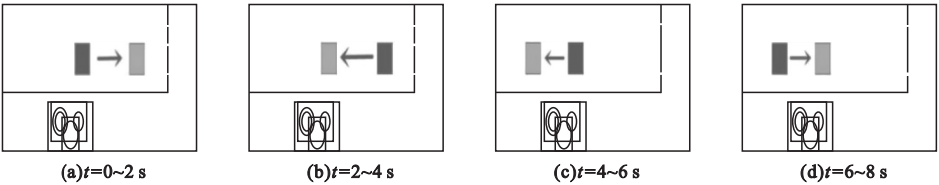


图 4 厨房人员走动轨迹示意图
Fig. 4 Schematic diagram of kitchen staff's walking path

4.2 厨房气流场分析

图5、图6和图7分别为分析平面在厨房人员不同走动速度下的气流速度云图。由图5可知,人员走动对厨房流场产生较大影响, $t=0\text{ s}$ 时人员保持静止,整个厨房的气流速度低于 0.14 m/s ;人员开始行走后,厨房速度场出现较为明显的速度变化和扰动现象,在人员走动方向的后方,气流速度最大可达到 0.84 m/s ,大于人员走动速度 0.5 m/s ,

扰动区域随人员走动不断扩展,最大影响长度约为 1.6 m ;当人员停止走动后,整个厨房的气流速度在 7 s 内降至 0.28 m/s 以下,这意味着人员走对厨房内气流的影响短暂。对比 $t=15\text{ s}$ 与 $t=0\text{ s}$ 时的速度场,发现人员走动增大了厨房内的气流速度。人员走动对厨房油烟颗粒物散发扩散源附近的速度场影响较大,颗粒物扩散和排出明显受到人员走动的影响。

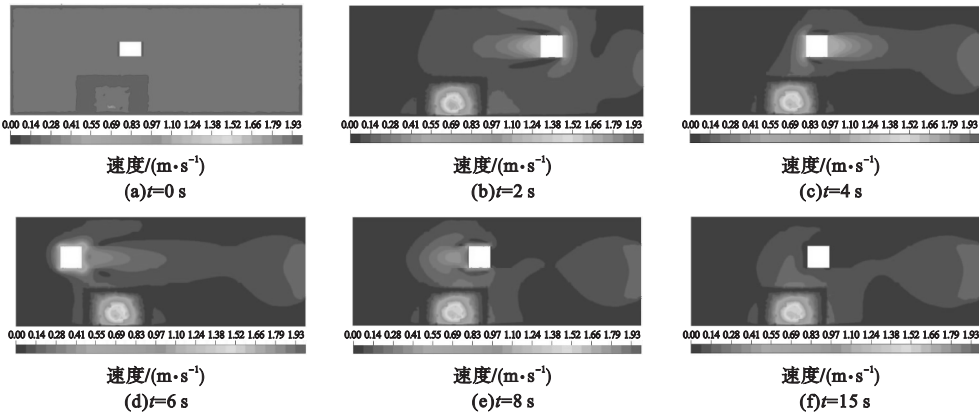


图5 人员走动速度为 0.5 m/s 时分析平面气流速度云图

Fig. 5 Velocity cloud of the analysis plane when the walking speed is 0.5 m/s

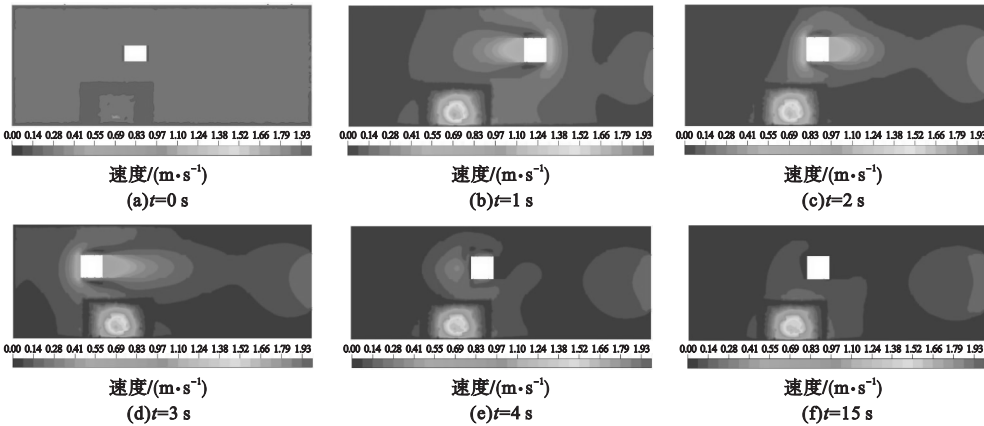
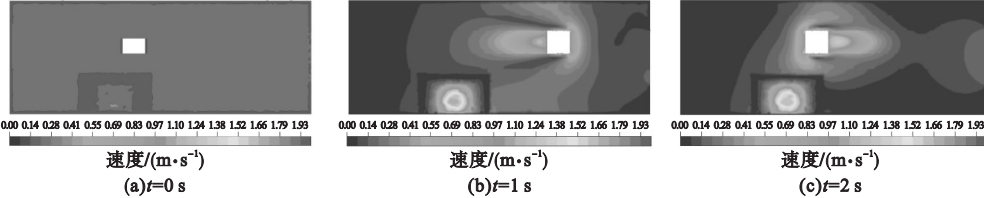


图6 人员走动速度为 0.7 m/s 时分析平面气流速度云图

Fig. 6 Velocity cloud of the analysis plane when the walking speed is 0.7 m/s



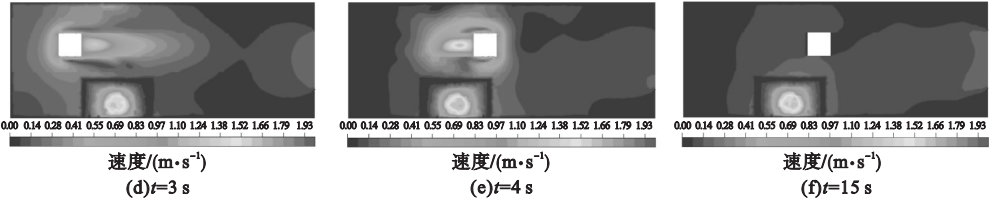


图7 人员走动速度为1.0 m/s时分析平面气流速度云图

Fig. 7 Velocity cloud of the analysis plane when the walking speed is 1.0 m/s

由图5、图6和图7可以看出,当人员走动速度为0.5 m/s时,身体后方气流速度最大可增加0.34 m/s,并且人员走动可对身体两侧约0.05 m的区域气流造成影响;当人员走动速度为0.7 m/s时,身体后方气流速度可增加0.41 m/s,而人员走动速度为1.0 m/s时,身体后方气流速度最大可增加0.52 m/s,由于厨房面积相对狭小,人员走动对整个厨房空间内的气流造成影响很显著。通过对

比可以发现,人员走动速度增加越大,对厨房空间内气流的扰动影响越明显。

4.3 颗粒物捕获分析

图8为人员走动速度分别在0.5 m/s、0.7 m/s、1.0 m/s时PM_{1.0}、PM_{2.5}及PM₁₀被捕获所需的时间。在人员走动前6 s时间内不同粒径颗粒物被捕获率因走动速度的变化规律如表1所示。

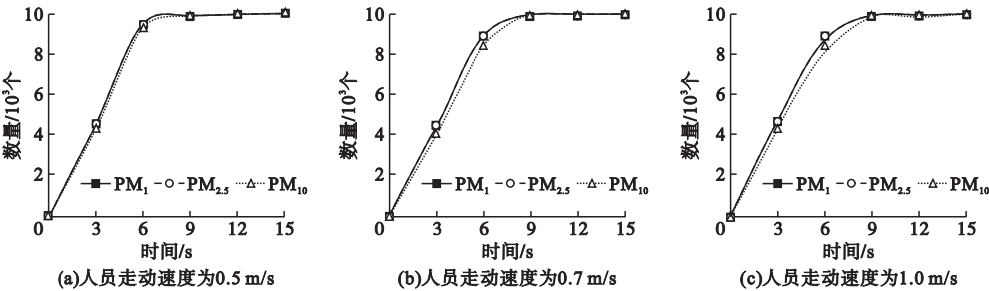


图8 厨房人员不同速度走动时颗粒物被捕获数量

Fig. 8 Amount of particulate matter captured by kitchen staff moving at different speeds

表1 人员走动速度被捕获率影响情况
Table 1 The effect of human walking speed on the capture rate of particles with different sizes in the first 6 s

走动速度/(m·s ⁻¹)	被捕获率/%		
	PM _{1.0}	PM _{2.5}	PM ₁₀
0.5	94.76	94.85	92.75
0.7	89.51	89.24	84.09
1.0	87.08	86.58	81.49

由此可以得到,细颗粒物PM_{2.5}及超细颗粒物PM_{1.0}在人员走动影响下被捕获率大致相同,具有基本相同的分布,这说明在厨房人员走动引起的气流变化对于PM_{1.0}、PM_{2.5}颗粒物变化不敏感,这两种粒径颗粒物在扰动气流影响下被排出率基本相同。而PM₁₀

的被捕获率与PM_{1.0}、PM_{2.5}有较大差异,说明大粒径颗粒物受人员走动气流影响气流较小。

随着人员走动速度的增加,不同粒径颗粒物的被捕获率均有下降,减少速率也相应加快。这是因为人员走动产生的逆时针涡旋裹挟着油烟颗粒物运动,人员行走速度越快,对于吸油烟机排出颗粒物越不利。由此得出人员走动造成的扰动阻碍油烟颗粒物的排出。

5 结 论

(1)人员走动使厨房内流场出现扰动现象,阻碍油烟颗粒物的排出。人员走动速度

越快,气流场扰动越明显,对于油烟颗粒物的排出越不利。

(2)人员走动造成的扰动气流对 $PM_{1.0}$ 、 $PM_{2.5}$ 两种粒径颗粒物影响基本一致,且这两种粒径颗粒物所受影响大于 PM_{10} 大粒径颗粒物。

参考文献

- [1] 曾钊,刘娟.中共中央 国务院印发《“健康中国2030”规划纲要》[J]. 中华人民共和国国务院公报,2016(32):5-20.
(ZENG Zhao, LIU Juan. Outline of “Healthy China 2030” plan [J]. Gazette of the State Council of the People’s Republic of China, 2016(32):5-20.)
- [2] 李慧星,刘昱,冯国会.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[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(3):558-565.
(LI Huixing, LIU Yu, FENG Guohui. Study on distribution and occupant’s exposure of fine particles in a northern residential kitchen [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(3):558-565.)
- [3] 吴晓严.人居型健康建筑评价指标体系及模型研究[D]. 成都:西华大学,2020.
(WU Xiaoyan. Research on evaluation index system and model of residential health building [D]. Chengdu: Xihua University, 2020.)
- [4] 李文艳.重庆市城区家庭室内环境及生活方式与儿童呼吸系统疾病和肺功能间的相关性研究[D]. 重庆:重庆医科大学,2019.
(LI Wenyang. The association between indoor environment as well as lifestyle with respiratory diseases and lung function of children in urban areas of Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2019.)
- [5] 蒋达华.烹饪热羽流扩散特性[D]. 西安:西安建筑科技大学,2018.
(JIANG Dahua. Characteristics of cooking thermal plume diffusion in the kitchen [D]. Xi’an: Xi’an University of Architecture and Technology, 2018.)
- [6] 童梦雪.烹饪油烟挥发性有机物 VOCs 组分的排放特征研究[D]. 大连:大连工业大学,2019.
(TONG Mengxue. Research on emission characteristics of volatile organic compounds from cooking oil fumes [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019.)
- [7] HORNE B D, JOY E A, HOFMANN M G, et al. Short-term elevation of fine particulate matter air pollution and acute lower respiratory infection. [J]. American journal of respiratory and critical care medicine, 2018, 198 (6): 756-766.
- [8] SALVI S, BAMES P J. Is exposure to biomass smoke the biggest risk factor for COPD globally [J]. Chest, 2010, 138(1): 3-6.
- [9] MICALLEF A, CALDWELL J, COLLS J J. The influence of human activity on the vertical distribution of airborne particle concentration in confined environments: preliminary results [J]. Indoor air, 1998, 8(2): 131-136.
- [10] GOLDASTEH I, TIAN Y, AHMADI G, et al. Human induced flow field and resultant particle resuspension and transport during gait cycle [J]. Building and environment, 2014, 77: 101-109.
- [11] WANG J, CHOW T T. Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room [J]. Building and environment, 2011, 46(10): 1993-2002.
- [12] MAZUMDAR S, YIN Y, GUILTY A, et al. Impact of moving objects on contaminant concentration distributions in an inpatient ward with displacement ventilation [J]. HVAC&R research, 2010, 16(5): 545-563.
- [13] WU Y, GAO N. The dynamics of the body motion induced wake flow and its effects on the contaminant dispersion [J]. Building and environment, 2014, 82: 63-74.
- [14] MATSUMOTO H, OHBA Y. The Influence of a moving object on air distribution in displacement ventilated rooms [J]. Journal of asian architecture and building engineering, 2004, 3(1): 71-75.
- [15] QIAN J, PECCIA J, FERRO A R. Walking-induced particle resuspension in indoor environments [J]. Atmospheric environment, 2014, 89: 464-481.
- [16] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
(HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. FLUENT: fluid engineering simulation examples and application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.)
- [17] POUSSOU S B, MAZUMDAR S, PLESNIAK M W, et al. Flow and contaminant transport in an airliner cabin induced by a moving body: model experiments and CFD predictions [J]. Atmospheric environment, 2010, 44 (24): 2830-2839.
(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)