

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.05.003

密集城市建筑街区突发气态污染物扩散模拟

赵福云, 徐 颖, 成 瑾, 刘 宝, 刘科君, 王汉青

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为研究城市建筑街区突发污染物泄露时的扩散情况与建筑密度、污染源位置等的关系, 构建了7个规则排列, 且密度分别为10%, 25%, 40%的城市街区建筑模型, 并采用计算流体力学软件Fluent对不同污染源位置方案进行了污染物扩散模拟。结果表明, 建筑密度较小时, 城市街区各个方向上的气流通流能力表现良好, 但街区密度大到一定程度时也会促进污染气体在流动方向的扩散效果, 并且建筑物排列的疏密程度对污染物的分布有显著影响。当污染物位置在建筑物前部和建筑物中部时, 分别在中建筑物密度($\lambda=0.25$)和低建筑物密度($\lambda=0.1$)取得最好的通风效果。

关键词: 污染物泄露; 数值模拟; 城市通风; 建筑街区; 街区密度

中图分类号: X169

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)05-0014-05

引文格式: 赵福云, 徐 颖, 成 瑾, 等. 密集城市建筑街区突发气态污染物扩散模拟[J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(5): 14-18.

Simulation of the Accidental Gaseous Pollutant Dispersion in Dense Urban Building Blocks

ZHAO Fuyun, XU Ying, CHENG Jin, LIU Bao, LIU Kejun, WANG Hanqing

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to study the relationship between the diffusion of the accidental pollutant diffusion in urban building blocks and the density of buildings and the location of pollution sources, a building model has been constructed for seven regularly arranged urban block buildings with a density of 10%, 25% and 40% respectively, followed by a simulation of the pollutant diffusion in different source locations by using a computational fluid dynamics (CFD) software Fluent. The results show that the air flow in all directions of urban blocks performs the best with a small building density. When the density of the block reaches a certain level, it will also promote the diffusion of the polluted gas in the direction of flow, with the density of the building arrangement exerting a significant impact on the distribution of pollutants. When the pollutants are located in the front of or in the middle of buildings, the best ventilation effect can be obtained with a density of the middle buildings ($\lambda=0.25$) and a density of the low buildings ($\lambda=0.1$) respectively.

Keywords: pollutant leakage; CFD simulation; urban ventilation; building block; block densit

1 研究背景

随着城市不断发展, 城区建筑格局朝着密集化及多元化方向发展, 而城市的风环境通常和建筑物的几

何尺寸及排列规律密不可分。由于城市人口密度过大, 建筑周围的风环境直接影响着人们的日常生活。若因管理或安装使用不当导致人员密集的街区突然爆发污染物, 后果将不堪设想, 所以研究密集城市街

收稿日期: 2019-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778504), 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(2018JJ4064)

作者简介: 赵福云(1977-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学副教授, 主要从事建筑通风, 城市通风及计算流体力学方面的教学与研究, E-mail: zfyfdnet@163.com

区爆发的污染物扩散问题, 无论是对城市进行更好地规划还是对发生事故后的妥当处理都很有必要。

已有大量科研工作者对城市通风问题进行了研究: A. T. Chan 等^[1]通过数值模拟的方法, 分析了不同建筑物间距对流动结构的影响, 并讨论了流动结构对污染物扩散的影响。S. Hanna 等^[2]通过计算, 分析了不同的建筑密度、不同的建筑分布形式对城市通风的影响; 陈义胜等^[3]对不同风速下的污染物扩散情况进行了比较分析; J. L. Santiago 等^[4]利用 Fluent 软件对三维障碍物阵列模型进行了计算, 并将其与实验结果进行了比较, 确定了计算方法的可靠性; Hang J. 等^[5]利用数值模拟的方法分析了建筑群中流体沿流动方向的速度衰减规律, 探讨了建筑群在流动方向上对新风的阻挡效果。Hang J. 等^[6]指出了影响城市通风的几个主要因素, 如街区 Aspect ratio、建筑物的布置、街道总长度、建筑密度、迎风面建筑密度等, 并且通过计算分析了建筑高度对城市通风过程的影响。

城市通风方面的模拟手段已日渐成熟, 计算速度和计算结果都日益提升。因此, 本文拟采用计算机模拟技术对城市街区污染物扩散问题进行研究, 充分了解不同建筑密度对城市通风过程的影响, 以期对改善城市空气流动, 优化建筑设计提供理论参考。

2 数值计算模型

2.1 街区模型

本研究主要讨论街区污染物的瞬态扩散问题, 需要先对街区模型进行一定的简化处理^[7]。如图 1 所示: 在 ICEM 软件中, 将整个计算域模型设置为长 34 m、宽 2 m、高 6 m, 建筑物之间的距离为 2 m。其中, 第一个建筑物中心距入口面 (inlet domain) 的长度为 6 m。选取两个小区域 (建筑群之前和建筑物之间) 作为污染源位置, 污染源 1 与入口面距离为 3 m、污染源 2 处于第一、二个建筑之间的间距中心点。

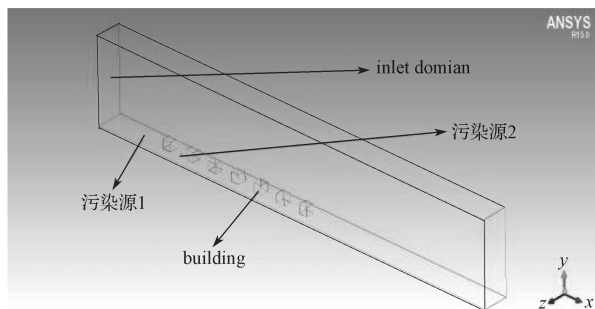


图 1 计算域模型图

Fig. 1 Schematic diagram of the computation domain

根据设置的 3 个不同建筑密度 10%、25%、40% 和

两个污染物泄漏位置, 将模拟分为 6 个不同工况, 具体工况参数如表 1 所示。

表 1 各种工况参数

Table 1 Various working condition parameters

工况	建筑密度 / %	污染源位置	建筑边长 / m	建筑间隙 / m
case1	10	1	0.63	1.37
case2	10	2	0.63	1.37
case3	25	1	1.00	1.00
case4	25	2	1.00	1.00
case5	40	1	1.26	0.74
case6	40	2	1.26	0.74

由于计算区域相对于建筑区域要大得多, 一方面, 为使计算结果准确和接近实际情况, 有些地方需要很密集的网格进行处理^[8-9]; 另一方面, 考虑到计算机计算量的局限性, 不能在整个计算区域上都采取高密度的网格分布方案, 故本模型采用疏密网格。即在近壁面采用较密的网格, 而其他区域采用相对较疏的网格。且在不同网格密度边界处, 需采用渐变处理, 以提高计算的精确性。网格划分如图 2 所示。

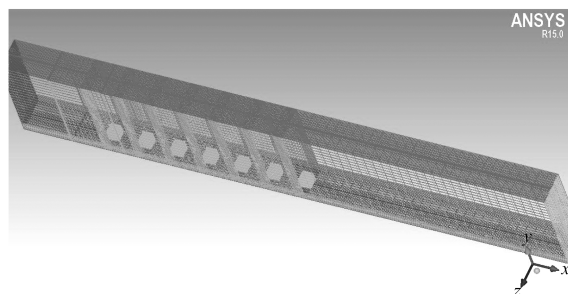


图 2 网格划分整体视图

Fig. 2 Overall view of computational meshing

2.2 边界条件

本模拟假设空气为不可压缩的等温气体。采用计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 的商用软件 Fluent 模拟稳态下整个计算域的温度场、污染物浓度场^[10-11]。湍流模型选用标准的 $k-\epsilon$ 模型, 采用 SIMPLE 算法求解雷诺平均的 N-S 方程, 固体壁面采用 Fluent 默认的无滑移边界条件。压力和动量分别选取二阶格式和二阶迎风格式, 湍动能和湍流耗散速率采取一阶迎风格式, 能量和 C_2H_2 (污染性气体) 为二阶迎风格式。除了能量的残差为 10^{-6} 以下认为收敛之外, 其余变量残差为 10^{-3} 以下认为收敛。初始化方法选用混合初始化 (hybrid initialization)。

边界条件设置中^[12], 进口和出口分别设置为速度入口 (velocity-inlet) 和压力出口 (pressure-outlet), 入口风速为 1.5 m/s。预设的污染源位置取其中一个设置为质量入口边界 (mass-flow-inlet), 另一个则同地面及建筑表面一并设置为绝热固壁边界 (wall),

计算域左、右及上表面均为对称边界 (symmetry)。在质量入口边界, 以 0.003 kg/s 的速率通入质量分数为 100% 的污染性气体。

3 模型验证

在本研究中, 模型验证采用的对比实验, 是来自于科罗拉多州立大学流体动力和扩散实验室的大气风洞^[13]。此大气风洞专门用来模拟大气边界层流。该风洞是一个闭路设施, 其收缩比为 9:1, 由 294 kW 的可变螺距变速螺旋桨驱动。测试部分长 27 m , 标称 1.8 m^2 。测试部分的风速可连续调节, 为 $0.3 \sim 37 \text{ m/s}$, 并且不会偏离设定速度的 0.5%。采用如下两种不同的出流速度: $U_e/U_H=0.46$, 用于中央屋顶通风口; $U_e/U_H=0.64$, 用于顺风屋顶通风口, 其中, U_e 为流出物的出流平均速度, U_H 为高度为 H 时的出流平均速度。通风口直径为 1.25 cm 。将纯氩气以恒定速率从通风口注入建筑区内。

对比的模拟计算中, 在大气湍流边界层下, 选取边长 $H=0.05 \text{ m}$ 的立方体建筑模型, 其空气动力学粗糙度取 $z_0=7.5 \times 10^{-5} \text{ m}$, 沿来流方向的湍流强度从建筑物高度的 11.8% 到距地面 0.015 m 高度上的 15.2% 不等。风的方向为垂直于迎风面。计算域的入口在建筑物风方向上游 $5H$ 处, 在此处选定平均流速剖面。而在计算域的出口, 施加零静压力, 排气口以恒定速率注入污染性气体 (这里用的纯氩, 氩气与氦气的物理性质和化学性质类似), 能保证流体雷诺数达到自模区的要求。

通过比较不同高度上的无量纲浓度系数 K , $K=C/C_0$, 其中 C_0 是参考浓度, C 为数值模拟得到的相应参考物浓度处的模拟浓度。将风洞实验数据与数值模拟结果进行对比拟合, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 数值模拟结果和实验结果吻合得非常好, 证明本文的计算模型是可靠的。

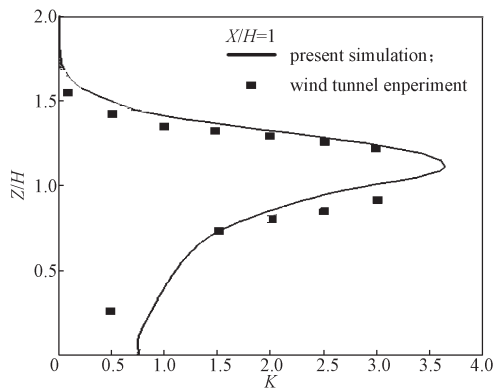


图 3 模型验证结果图

Fig. 3 Model validation results

4 计算结果与分析

4.1 街区气态污染物的扩散分布

部分工况下气态污染物扩散分布云图见图 4。

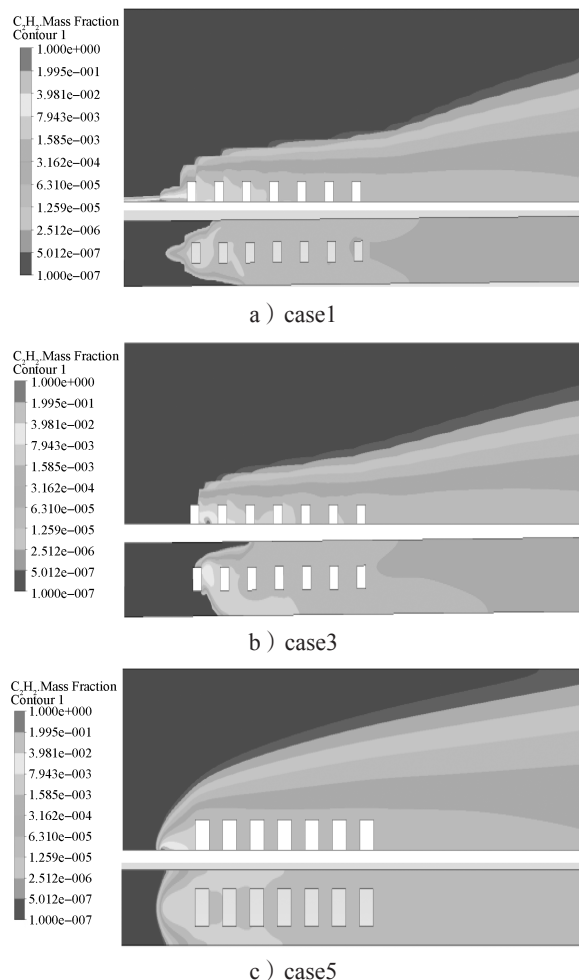


图 4 不同工况的气态污染物扩散分布云图

Fig. 4 Cloud map of diffusion distribution of pollutants under different conditions

图 4 中分别显示了中剖面与平行于地面的高度为 0.3 m 的截面上的气态污染物质量分数^[14]。从图 4a 和 c 中可以看出, 当污染源位置相同时, 随着建筑物密度的增大, 污染物对建筑群的影响范围变大, 而由于位置 1 的污染物处于建筑物之前, 导致后部建筑物的背风面空气质量要优于迎风面的。从图 4a 和 b 中可以看出, 当建筑物密度相同时, 位置 2 的污染源对后部建筑的空气环境影响较大。即使建筑物的密度不尽相同, 但每个 case 的建筑尾部存在一个通风盲区, 污染物不容易扩散, 会形成一个高污染区。

4.2 不同污染源位置的街区污染物浓度对比

当 λ 取 10%, 25%, 40% 时, 统一取 $H=0.3 \text{ m}$ 的中轴线上的数值构建坐标图, 不同污染源位置下监测线上的 C_2H_2 质量分数如图 5 所示。图中横坐标代表 $y=0, z=0.3$ 两个面相交产生的直线长度 (监测

线), 即相对入口面的横向距离; 纵坐标代表污染气体 (C_2H_2) 的质量分数。

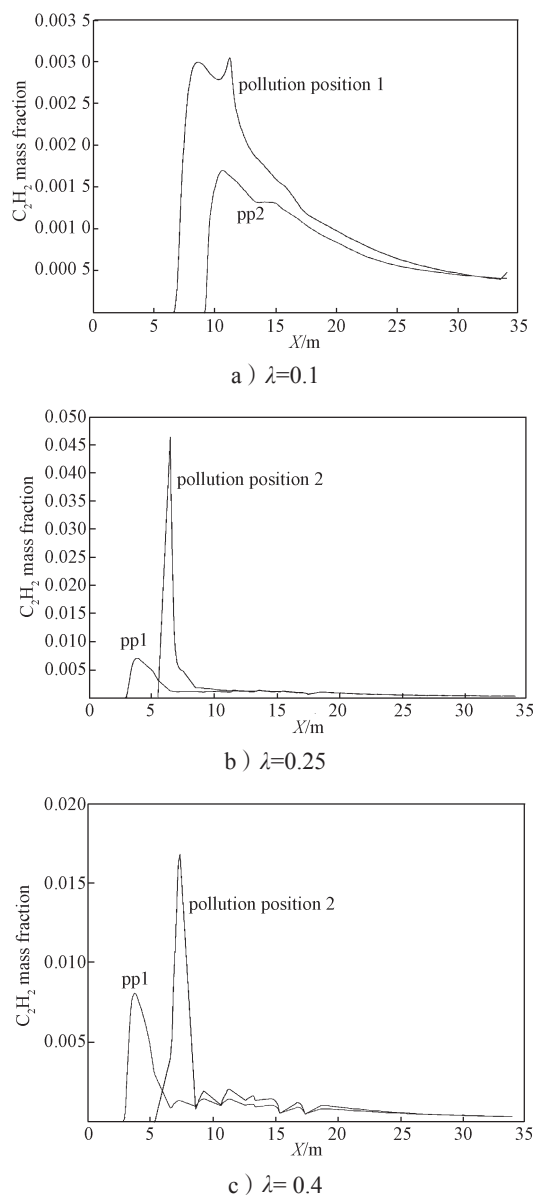


图5 λ 变化时不同污染源位置下监测线上的 C_2H_2 质量分数

Fig. 5 C_2H_2 mass fraction on the monitoring line at different pollutant positions

由图5可知, 当街区密度取 $\lambda=0.1$ 时, 对于不同的污染源位置, 位置2比位置1有更好的扩散效果, 如图5a所示。当街区密度取 $\lambda=25\%$ 时, 情况则与 $\lambda=10\%$ 时相反, 如图5b所示。 $\lambda=40\%$ 时街区污染物分布与 $\lambda=25\%$ 时的分布趋势大致相同, 但污染物位置处于1点时的污染物浓度峰值较 $\lambda=25\%$ 时略有回升。这是由于当污染源位置处于建筑群之间时, 四周的空间结构不利于污染性气体的扩散, 从而导致污染物浓度值飙升。而污染源在来流风口时, 受到来流风的直接作用, 污染气体扩散速度更快。

4.3 不同街区密度的街区污染物浓度对比

污染源位于位置1、2时不同 λ 情况下监测线上的 C_2H_2 质量分数如图6所示。

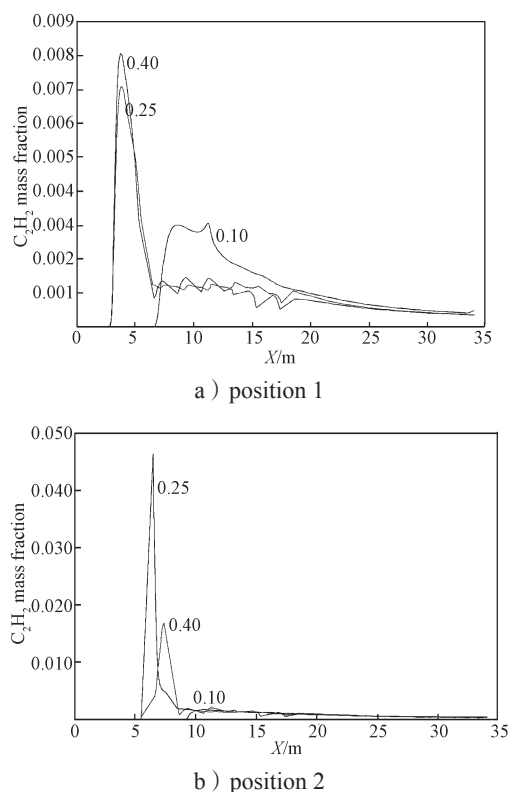


图6 污染源位于位置1、2时不同 λ 情况下监测线上的 C_2H_2 质量分数

Fig. 6 C_2H_2 mass fraction on the monitoring line with different λ

图6中, 在污染源位置1、2处, 不同 λ 的污染物在检测线上的分布对比直观, 3根曲线分别代表了不同的街区密度下的质量分数变化趋势, 每个曲线所代表的密度在图中已标出。纵坐标代表污染气体 C_2H_2 的质量分数、横坐标为 $H=0.3$ m 高度时相对入口面的横向距离。对比发现, 低建筑密度时, 其峰值处更偏离污染源位置 (约为 $X=3$ m 处), 可见 C_2H_2 浓度显著受来流风影响; 而高建筑密度时, 气体扩散显著受建筑物影响, 因而污染气体 C_2H_2 的质量分数呈现出振荡分布; 可以看出, 街区密度越小, 建筑群前端的污染源扩散效果越好。

在污染源位置2时 (污染源在建筑群之间), 依然是街区密度在 $\lambda=10\%$ 时的扩散效果最好, 但街区密度 $\lambda=40\%$ 的扩散效果却要好于 $\lambda=25\%$ 时的。

5 结论

本文通过数值模拟的方法, 分析了街区密度和污染性气体发生位置对建筑街区通风的影响, 由前文的对比分析可以得知:

1) 当街区密度较小时, 整个建筑街区通风能力优良, 污染性气体扩散速度较快。因此, 低建筑密度对居民生活安全性更高, 同时空气舒适性更好。

2) 当街区密度较大时, 由于巷道风及建筑绕流等的作用, 能在一定程度上提升近地面的通流能力, 有助于扩散污染性气体。

3) 街区密度越大, 在污染源远端位置的污染性气体空间分布越会受建筑物影响。当街区密度较小时, 距入口远端位置的污染气体浓度是逐渐递减的, 而高街区密度时, 会出现风速显著减小的背风面, 在这个局部位置污染物不容易扩散, 在建筑物之后的局部有涡流的地方会形成一个高污染区。

4) 一般情况下, 当污染源处于入风口、建筑群之前, 城市通风能顺利地带走污染性气体; 反之, 若污染源处于建筑群之间, 则受高大建筑的影响, 扩散性能降低。但在较低的街区密度之下, 建筑物对城市通流能力的阻碍作用大大减小, 由于更复杂的运动机理, 此时当污染源处于建筑群之间时, 街区污染气体扩散性能反而更好。建议在以后的城市规划中, 可以考虑到人口居住密度和建筑密度之间的关系, 寻求更好的城市通风环境。

参考文献:

- [1] CHAN A T, AU W T W, SO E S P. Strategic Guidelines for Street Canyon Geometry to Achieve Sustainable Street Air Quality: Part II: Multiple Canopies and Canyons[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(20): 2761-2772.
- [2] HANNA S, TEHRANIAN S, CARISSIMO B, et al. Comparisons of Model Simulations with Observations of Mean Flow and Turbulence Within Simple Obstacle Arrays[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(32): 5067-5079.
- [3] 陈义胜, 孙 铁. 不同风速下污染物扩散的模拟研究[C]//第七届全国工业炉学术年会论文集. 兰州: 中国机械工程学会工业炉分会, 2006: 47-50.
CHEN Yisheng, SUN Tie. Simulation Study on Pollutant Dispersion Under Different Wind Speeds[C]//Proceedings of the Seventh National Annual Conference on Industrial Furnace. Lanzhou: Industrial Furnace Branch of China Society of Mechanical Engineering, 2006: 47-50.
- [4] SANTIAGO J L, MARTILLI A, MARTÍN F. CFD Simulation of Airflow over a Regular Array of Cubes. Part I: Three-Dimensional Simulation of the Flow and Validation with Wind-Tunnel Measurements[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 122(3): 609-634.
- [5] HANG J, LI Y. Wind Conditions in Idealized Building Clusters: Macroscopic Simulations Using a Porous Turbulence Model[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2010, 136(1): 129-159.
- [6] HANG J, LI Y, SANDBERG M. Experimental and Numerical Studies of Flows Through and Within High-Rise Building Arrays and Their Link to Ventilation Strategy[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(10): 1036-1055.
- [7] 赵福云, 肖 婷, 李 林, 等. 汞蒸气在参差建筑街区中沉积过程模拟[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(6): 1690-1696.
ZHAO Fuyun, XIAO Ting, LI Lin, et al. Numerical Modeling of Mercury Vapour Dispersion and Sedimentation Within the Urban Building Street Canyons Composed by Diverse Building Heights[J]. *China Environment Science*, 2016, 36(6): 1690-1696.
- [8] MARTILLI A, CLAPPIER A, ROTACH M W. An Urban Surface Exchange Parameterization for Mesoscale Models[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 104(2): 261-304.
- [9] RICHARDS P. Appropriate Boundary Conditions for Computational Wind Engineering Models Using the $k-\epsilon$ Turbulence Model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 46/47: 145-153.
- [10] FAN Y, LI Y, HANG J, et al. Natural Convection Flows Along a 16-Storey High-Rise Building[J]. *Building and Environment*, 2016, 107: 215-225.
- [11] MEI S J, HU J T, LIU D, et al. Wind Driven Natural Ventilation in the Idealized Building Block Arrays with Multiple Urban Morphologies and Unique Package Building Density[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 155: 324-338.
- [12] MEI S J, LIU C W, LIU D, et al. Fluid Mechanical Dispersion of Airborne Pollutants Inside Urban Street Canyons Subjecting to Multi-Component Ventilation and Unstable Thermal Stratifications[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 565: 1102-1115.
- [13] LI W W, MERONEY R N. Gas Dispersion Near a Cubical Model Building: Part I: Mean Concentration Measurements[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1983, 12(1): 15-33.
- [14] RAMPONI R, BLOCKEN B, COO L B D, et al. CFD Simulation of Outdoor Ventilation of Generic Urban Configurations with Different Urban Densities and Equal and Unequal Street Widths[J]. *Building & Environment*, 2015, 92: 152-166.

(责任编辑: 廖友媛)