

汞蒸气在参差建筑街区中沉积过程模拟

赵福云^{1,2*}, 肖婷¹, 李林¹, 梅硕俊², 刘呈威², 王汉青¹ (1.湖南工业大学土木工程学院, 湖南 株洲 412000; 2.武汉大学动力与机械工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 利用计算流体动力学方法, 分别选用参差比为 0.0, 0.2, 0.4, 0.6 和 0.8 等 5 种建筑模型, 探讨了在水平自然风条件下重密度污染源(汞)在不同参差比建筑物间的沉积过程, 以及街区行人层汞浓度与建筑参差比之间的关系。模拟结果发现, 城市街区建筑物高低错落分布的布局会促进高空汞污染源在行人层的聚集, 使得街区行人层汞浓度明显增大; 并且随着街区建筑物参差比的增大, 最高汞浓度值所在的街道有序地靠近来流上游, 而较高建筑物背面街道行人层汞质量流量明显高于较矮建筑物背面街道行人层汞质量流量。

关键词: 参差比; 汞沉积; 计算流体动力学; 城市街区通风

中图分类号: X169 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2016)06-1690-07

Numerical modeling of mercury vapour dispersion and sedimentation within the urban building street canyons composed by diverse building heights. ZHAO Fu-yun^{1,2*}, XIAO Ting¹, LI Lin¹, MEI Shuo-jun², LIU Chen-wei², WANG Han-qing¹ (1.School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China; 2.School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430076, China). *China Environmental Science*, 2016,36(6): 1690~1696

Abstract: With the use of computational fluid dynamics, dispersion and accumulation of Hg inside the street canyons with various building heights were numerically investigated, concerning with neutral thermal stratifications and five canyon deviations, 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, and 0.8. Particularly, correlations between building height variation and pedestrian level pollutant accumulation were established depending on the discrete numerical simulations. Numerical simulations indicate that high altitude Hg pollutants were inclined to accumulate in the region of pedestrian level due to the enhanced street canyon building height variations, Hg concentration in the region of pedestrian level therefore significantly increased. Furthermore, street canyons of peak Hg concentrations usually were sequentially allocated along the wind flows, maximum one mostly closing the upwind side. Hg fluxes in the street canyons of high-rise buildings backward were observed to be significantly higher than those in the street canyons of low-rise buildings backward.

Key words: buildings height deviation; mercury vapour accumulation; computational fluid dynamics; ventilation in urban street canyons

汞是一种有毒的重金属元素,是唯一在常温下可蒸发的金属,其蒸汽无色无味,密度比空气重 7 倍,无论汞蒸汽本身还是其化合物都有着很大的毒性^[1]。自工业革命以来,化石燃料的燃烧、有色金属的冶炼以及其他行业汞的应用,都使得环境中汞的浓度显著增加^[2]。当汞污染进入人类活动区域时,部分汞能被溶解或者被雨水收集,也有部分汞能自身参与复杂的大气化学过程,被转化成其他形态的汞,从而达到被清除的效果,但还有一部分汞会通过陆—气交换过程降至地表,然后二次挥发进入人群周围的空气,积聚在人类的生活区域,对人体健康造成严重危害^[3],有学者也提

出了许多在人居环境中对汞污染进行治理的有效方法^[4]。

随着现代化城市的发展,排列紧凑的建筑群使得污染物不容易扩散,探究高密度建筑群中污染物扩散的方式以及城市建筑结构的不同对污染物扩散的影响成了国内外研究的热点。有学者研究了包括街道高宽比不同情况下重密度污染

收稿日期: 2015-11-25

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX2016B637);国家自然科学基金(51208192,51304233);湖南省杰出青年基金(14JJ1002);科技部十二五科技支持计划(2011BAJ03B07)

* 责任作者, 教授 fyzhao@whu.edu.cn

物的扩散^[5-7];还有学者基于简化模型研究了街道峡谷几何形态与污染物沉积效率关系^[8-9],提出了一系列控制城市街区污染物聚集的策略,如降低了城市建筑密度和街区高宽比^[10];同时有学者发现,略有错落的建筑布局有利于获取更好的通风条件^[11];如当污染物产生于行人区时,建筑物之间有更大参差比($\text{standard deviation } \sigma_H=(H_2-H_1)/(H_2+H_1)=d_H/H_0$)时更有利于污染物的扩散^[12].但汞由于密度大、易沉降、易挥发的性质,与普通污染物以被动标量的形式输运的方式有所不同.国内外许多学者对不同地区汞的垂直分布特征进行研究,得到气态汞在不同环境条件下的一些分布规律^[13-15].在郊外工业区烟囱中产生的汞会在水平自然风的驱动下进入城区,并有可能沉积在城市居民经常活动的行人层(离地 0~2m 的区域^[16]),直接对人体健康产生危害.

面对如今复杂的城市街区结构以及随时随

处可能爆发的城市污染,一些不易被自然风带走而沉积在城区各个街道的重密度污染物成为了危害行人健康的安全隐患.因此,如何快速找到污染最严重的街道并对城市污染进行及时有效的处理是环境科学研究人员刻不容缓的责任.而汞蒸气作为重密度气态污染物的代表,研究其在建筑高度变化城区的沉积规律有利于帮助解决一定的城区污染问题.本文拟在前人的研究基础上,利用数值模拟的方法,对汞在建筑物高低错落分布的建筑群中的沉积机理进行研究.

1 数值计算模型

1.1 街区模型

本文参考了 Hang 等^[17]的模型数据,将城市街区简化为二维问题,采用计算流体动力学(CFD)方法模拟计算汞在街区中的沉积过程.以工况 [18-42,0.4]的模型为例,建筑模型尺寸如图 1 所示.

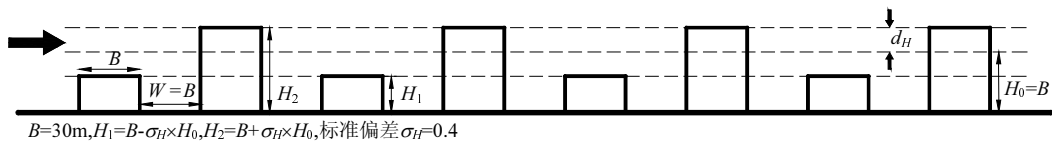


图 1 工况[18-42,0.4]中街区的几何尺寸

Fig.1 Layout and geometric sizes of street canyons for the cases [18-42, 0.4]

由图 1 可知,建筑模型由 8 排不同高度的建筑交替排列(建筑宽度为 B ,街道宽度为 W),2 种建筑的高度 H_1 、 H_2 通过参差比(σ_H)为 0.4 计算.其中, $H_1=18\text{m}$ 是第 1、3、5、7 排建筑的高度, $H_2=42\text{m}$ 是第 2、4、6、8 排建筑的高度,计算模型与实际模型的比例为 1:1,背景风假设为自左向右的中性分层风,第一排建筑的外侧为上风向的迎风面.

表 1 建筑模型的几何参数

Table 1 Geometric parameters of buildings

工程名称	σ_H	$H_1(\text{m})$	$H_2(\text{m})$
[30-30,0]	0	30	30
[24-36,0.2]	0.2	24	36
[18-42,0.4]	0.4	18	42
[12-48,0.6]	0.6	12	48
[6-54,0.8]	0.8	6	54

注:工况名称表示 [H_1-H_2, σ_H].

本文共设定了 5 个工况,工况参数如表 1 所示.参数的计算依据为在建筑高度相等的情况下($H_1=H_2=30\text{m}$),以 $H_0=30\text{m}$ 为基准线增加或减小相邻两排建筑高度,达到参差不齐错落有致的建筑布局效果.

1.2 数学模型

假设空气为不可压等温流体,本文采用 FLUENT 软件模拟稳定状态下的等温流场.用标准 $k-\epsilon$ 模型对湍流流动进行计算,利用 SIMPLE 算法来迭代求解压力-速度耦合方程,为了降低数值解的震荡获得较精确的解,对流项全部采用二阶迎风格式计算,各项收敛残差均设置为 10^{-5} .

每一个工况中定义一个正方形区域(x 方向范围:-33~-30m, y 方向范围:60~63m)为汞源位置,研究在入口风的影响下,汞蒸气散布到街区内的情况.汞源以恒定的速率产生汞蒸气,稳态下的汞

蒸气的组分输运方程如下:

$$u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (K_c \frac{\partial c}{\partial x_j}) + S_c \tag{1}$$

式中: u_j 为时均速度, $K_c=v_t/S_{ct}$, v_t 为湍流运动粘度, S_{ct} 为施密特数; S_c 是污染物的生成速率,为 $0.0075\text{kg}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$.

1.3 模型验证

为了充分验证数值模型的可靠性,本文将计算结果与风洞实验结果进行了比较.Brown等^[18]的大气边界层风洞中对建筑群内的空气流动进行了测量^[18].基于这一实验,本文构造了与风洞模型一致的数值计算模型,并在4个测量

位置(图2中的A~D)对时均速度、湍流动能和湍流耗散进行了对比,测量线位置设定如图2所示.共采用了3种雷诺时均湍流模型,分别是标准 $k-\varepsilon$ 模型,Realizable $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型,然后将风洞实验4个竖直测量线上的时均速度(U)与数值模拟结果进行了对比,如图3所示.对于时均速度的计算,3个湍流模型的计算结果与风洞计算结果都十分接近,对比于 Realizable $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型,标准 $k-\varepsilon$ 模型在各个位置的时均速度与风洞测量的结果最为接近,故本文采用标准 $k-\varepsilon$ 对建筑扰流进行计算是比较合理的.

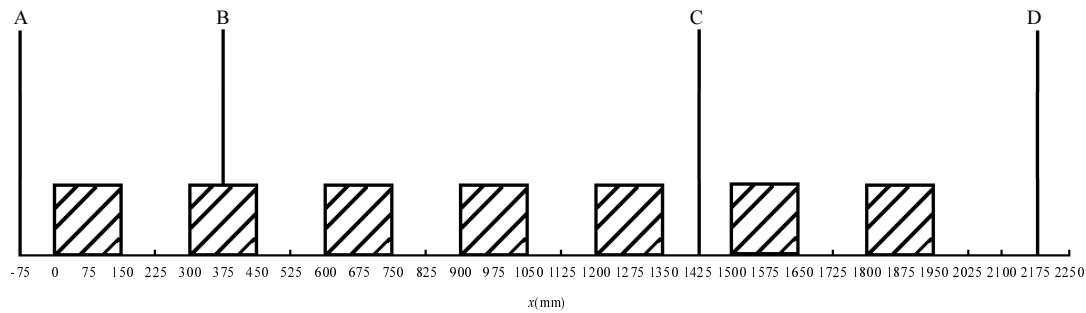


图2 风洞实验中4个垂直的测量线位置示意

Fig.2 Four perpendicular measurement point lines in wind tunnel experiment

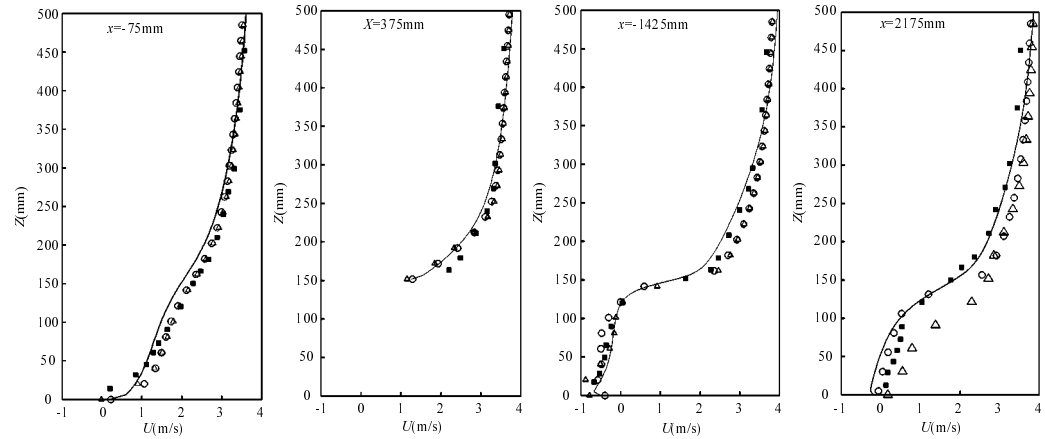


图3 不同湍流模型下建筑群内时均水平流速的数值模拟结果和风洞实验结果的对比

Fig.3 Comparison of horizontal mean velocity between wind tunnel measurement and different turbulent models

■ 风洞实验结果;○ Realizable $k-\varepsilon$ 模型;△ RNG $k-\varepsilon$ 模型,—标准 $k-\varepsilon$ 模型

1.4 计算域和边界条件

所有工况的计算域的定义尺寸以及边界条

件如图4所示.

入口风速设置成垂直方向上的梯度风^[19]:

$$\frac{U(Z)}{U_H} = \left(\frac{Z}{H_2}\right)^\alpha \quad (2)$$

式中: $U(Z)$ 为 Z 高度处的水平风速,m/s; Z 为离地面高度, $U_H=2\text{m/s}$ 是当建筑高度为 H_2 而 $\alpha=0.35$ 时的静风速.湍流动能和耗散率则通过下两式进行计算:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \left(1 - \frac{Z}{\delta}\right) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{\kappa Z} \left(1 - \frac{Z}{\delta}\right) \quad (4)$$

式中: k 为湍流动能, m^2/s^2 ; $U_*=0.19\text{m/s}$ 为地面摩擦速度; κ 为冯卡门常数,取 0.40; C_μ 为标准 $k-\varepsilon$ 闭合方案的常数,取 0.09; $\delta=8\times H_2$ 为计算域的高度.计算域的顶部边界条件设定成 symmetry 以保证计算域顶部平行流的实现.出口边界设置为 outflow

用来模拟街区中自然扰动状态的充分发展流.所有的建筑物表面及地面边界条件设置为无滑移边界.

以工况 [18-42,0.4] 为例,计算域的网格尺寸中(图 5),最小的网格尺寸为 0.5m,网格增长率小于 1.15,离地面 1.5m~2m 处的行人区在第 3 和第 4 个网格.所有工况的网格总数约为 200000~460000,并且已经获得了网格独立解,即增加网格密度已经对计算结果不产生明显影响^[20].

为了便于分析,对汞蒸气浓度进行了无量纲处理,无量纲汞蒸气浓度 C^* 定义为:

$$C^* = \frac{cH_{\text{ref}}}{U_H S_c} \quad (5)$$

式中: c 为汞蒸气的时均浓度; H_{ref} 为汞源高度,60m.

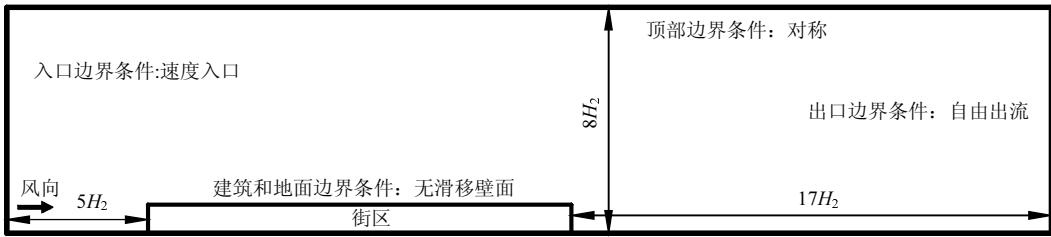


图4 计算域定义尺寸及边界条件

Fig.4 Computational domain and boundary conditions

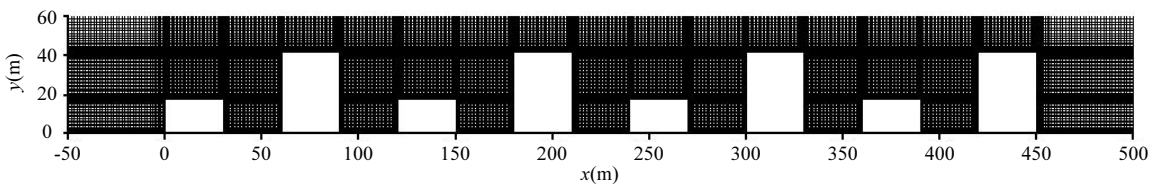


图5 工况[18-42,0.4]的街区部分局部网格示意

Fig.5 Regional street canyon grid arrangements for Case [18-42, 0.4]

2 结果与讨论

图 6 描述了在上风侧模拟的工业排放含汞污染源口($x:-33\sim-30\text{m}$, $y:60\sim63\text{m}$)生成的汞蒸气的影响下,拥有不同高度差建筑群的街道峡谷中,气流组织和汞浓度的分布.由图 6a 中可知,在来流风的作用下,当建筑物高度一致时,街道峡谷内形成与建筑等高的漩涡涡流,在建筑的迎风面风向向下,

在建筑的背风面风向向上(建筑迎风面和背风面的参照街道外的来风方向).而当建筑高度开始出现差别时(图 6b,6c),街道峡谷内在较高建筑背面会形成 2 个漩涡涡流,而较矮建筑背面只有 1 个漩涡涡流形成,并且风流动的方向为在较高建筑的迎风向向下流动,在较高建筑的背风面向上流动.当建筑高度差逐渐增大(图 6d 和 6e),较高建筑背面的 2 个漩涡中位置较高的漩涡跨过较矮建筑顶

部,逐渐与较矮建筑背面的漩涡联通,最终在较矮建筑的顶部和背面形成1个大漩涡,而2个漩涡中位置较低的漩涡也在高度差的持续增长中,有分割成2个漩涡的趋势.但无论漩涡形状如何变化,漩涡的风向始终保持为紧贴着较矮建筑前的为逆时针流动,其余皆为顺时针流动.

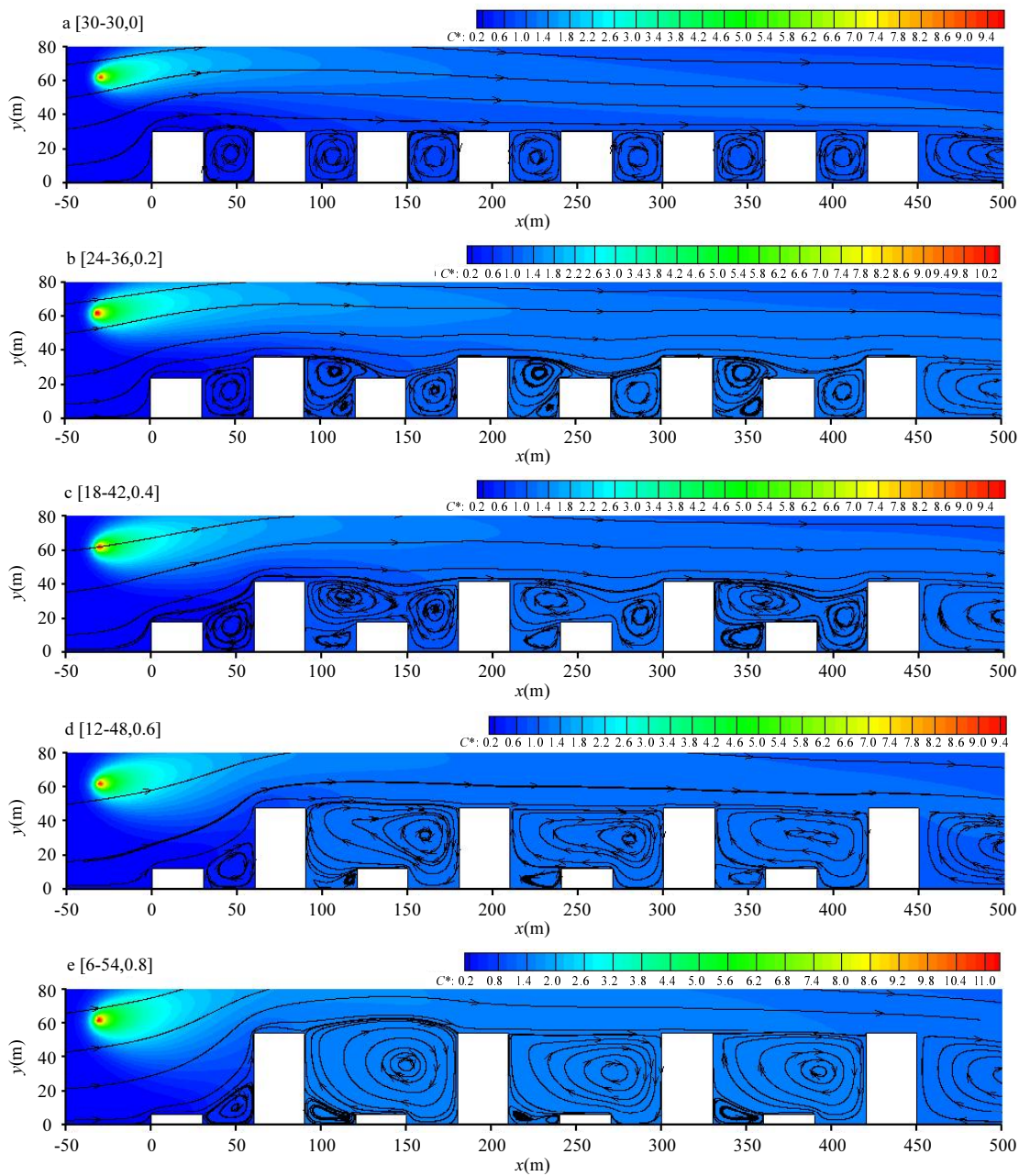


图6 街区中的无量纲汞蒸气浓度云图和流线
Fig.6 Contours of non-dimensional mercury vapour concentration and streamlines within the street canyons.

入口来流将高空污染源中的汞蒸气带到城区,扩散到各个街道,造成城区中各街道不同程度汞污染.将2m以下高度定义为行人区,表2记录了各个街道的水平位置范围.

表 2 街谷水平方向位置范围
Table 2 Horizontal axial range of street canyons

街道名称	横坐标范围(m)
1	30~60
2	90~120
3	150~180
4	210~240
5	270~300
6	330~360
7	390~420

将每个工况下各街道行人区的汞浓度进行对比(图 7):在工况[30-30,0]和工况[24-36,0.2]中,随着街道顺移,汞的浓度增长趋势呈现为一条较光滑曲线,工况[18-42,0.4]中曲线则在街道 2 和街道 4 处出现明显拐角,而在工况[12-48,0.6]和工况[6-54,0.8]中,汞的浓度值在街道 2 中达到区别于街道 1 的比较高值,使得曲线出现拐角,在之后 6 个街道中保持始终远高于街道 1 浓度数值,并在小范围内上下波动;工况[30-30,0]和工况[24-36,0.2]中,汞的最高浓度值出现在城区尾部的街道 7 中,工况[18-42,0.4]中汞的最高浓度值出现在街道 5 中,工况[12-48,0.6]中汞的最高浓度值出现在街道 4 中,工况[6-54,0.8]中汞的最高浓度值出现在街道 3 中;工况[30-30,0]下各街道的浓度值最小,工况[6-54,0.8]下各街道的浓度值最大,每个街道在不同工况下的浓度值都在工况[30-30,0]和工况[6-54,0.8]的浓度值范围之内波动。

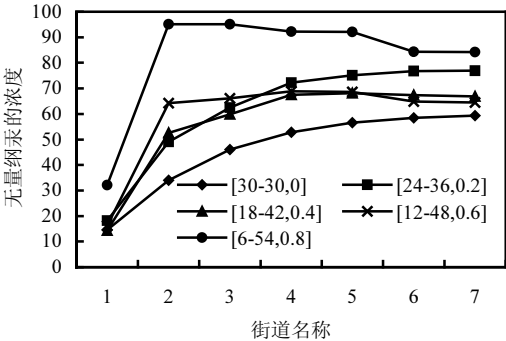


图 7 行人层的空间平均的汞浓度在不同街谷中的分布
Fig.7 Mercury vapour concentration at the pedestrian level within different street canyons

由图 8 可见:当建筑物高度不变时,汞的质量流量基本不变,而当建筑高度变化时,汞的质量流量产生了规律性的变化.建筑高度不变时(工况[30-30,0]),汞的质量流量的数值基本呈现为缓慢的有序下降,即随着街道的顺序迁移,汞的质量流量缓慢下降,在街道 6 中达到相对低值后,在随后出现的街道 7 中有些许回升;当城区建筑高度出现变化时,城区各个街道中汞的质量流量也随之出现波动性变化:较高建筑背部街道汞的质量流量数值始终处于波峰位置,而较矮建筑背部街道的数值则始终比较高建筑背部街道的数值小,处于波谷位置;每个街道中汞的质量流量都在工况[6-54,0.8]中达到最大值,并且各个街道中汞质量流量的数值总量也最大;当建筑高度发生变化时,只有在工况[24-36,0.2]中汞的质量流量的最高值出现在街道 6 中,并依次随着街道 4、街道 2(两个较高建筑背部街道)的顺序,波峰数值减小,而在工况[18-42,0.4]、工况[12-48,0.6]和工况[6-54,0.8]中,汞的质量流量的最高值都出现在街道 2 中,并依次随着街道 4、街道 6(两个较高建筑背部街道)的顺序,波峰数值减小。

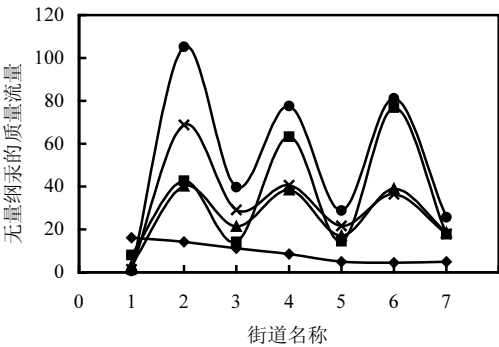


图 8 行人层的汞的质量流量在不同街谷中的分布
Fig.8 Mass flow rate of mercury vapour at the pedestrian level within different street canyons

3 结论

3.1 当街区建筑高度一致时,在建筑的迎风面风向向下,在建筑的背风面风向向上;而当街区建筑高度参差变化时,建筑物之间的风向为紧

贴着较矮建筑前的为逆时针流动,其余皆为顺时针流动。

3.2 汞在参差高度街区中各个街道的沉积能力比在相同高度建筑街区中的沉积能力强。

3.3 随着高度差的增大,汞的最高浓度值出现的街道有序的往城区上游靠近。

3.4 当城区建筑高度参差变化时,处于较高建筑背风面的街道的汞的质量流量比处于较矮建筑背风面的街道大。

参考文献:

- [1] 项剑桥,刘 刚.武汉城区大气汞分布特征及来源分析 [J]. 资源环境与工程, 2008,(S2):27-30.
- [2] 权建农,张晓山,张 蕾,等.我国燃煤汞沉降的数值模拟 [J]. 高原气象, 2009,(1):159-164.
- [3] 朱佳雷,王体健,王婷婷,等.中国地区大气汞沉降速度研究 [J]. 生态毒理学报, 2014,(5):862-873.
- [4] Wang S, Zhang L, Wang L, et al. A review of atmospheric mercury emissions, pollution and control in China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014,8(5):631-649.
- [5] Baratian-Ghorghi Z, Kaye N B. The effect of canyon aspect ratio on flushing of dense pollutants from an isolated street canyon [J]. *Science of the Total Environment*, 2013,443:112-122.
- [6] Hang J, Sandberg M, Li Y, et al. Pollutant dispersion in idealized city models with different urban morphologies [J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(38):6011-6025.
- [7] Hang J, Li Y. Ventilation strategy and air change rates in idealized high-rise compact urban areas [J]. *Building and Environment*, 2010,45(12):2754-2767.
- [8] Huang H, Akutsu Y, Arai M, et al. A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2000,34(5):689-698.
- [9] Xie X M, Huang Z, Wang J S. Impact of building configuration on air quality in street canyon [J]. *Atmospheric Environment*, 2005,39(25):4519-4530.
- [10] 陈 燕,蒋维楣,郭文利,等.珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响 [J]. 环境科学学报, 2005,26(5):700-710.
- [11] 李 磊,吴 迪,张立杰,等.基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估研究 [J]. 环境科学学报, 2012,33(4):946-953.
- [12] Hang J, Li Y, Sandberg M, et al. The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas [J]. *Building and Environment*, 2012,56:346-360.
- [13] 刘德绍,青长乐,杨水平.近地面大气汞的垂直分布 [J]. 西南大学学报, 2001,23(1):39-41.
- [14] Steve Brooks, Ren Xinrong, Cohen Mark, et al. Airborne Vertical Profiling of Mercury Speciation near Tullahoma, TN, USA [J]. *Atmosphere*, 2014,5(3):557-574.
- [15] Swartzendruber P C, Chand D, Jaffe D A, et al. Vertical distribution of mercury, CO, ozone, and aerosol scattering coefficient in the Pacific Northwest during the spring 2006 INTEX-B campaign [J]. *Journal Geophysical Research*, 2008,113: D10305.
- [16] Bert Blocken, Jan Carmeliet, Ted Stathopoulos. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007,95:941-962.
- [17] 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.
- [18] Brown M J, Lawson R E, Decroix D S, et al. Comparison of centerline velocity measurements obtained around 2D and 3D building arrays in a wind tunnel [C]//Int. Soc. Environ. Hydraulics, Tempe, AZ, 2001.
- [19] Buccolieri R, Sandberg M, Di Sabatino S. City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries [J]. *Atmospheric Environment*, 2010,44(15):1894-1903.
- [20] Daeung Kim, The Application of CFD to Building analysis and Design: A Combined Approach of An Immersive Case Study and Wind Tunnel Testing [D]. Blacksburg, Virginia, The Virginia Polytechnic Institute and State University, 2013.
- [21] 田 丰,余 志,蔡 铭,等.双车道街道峡谷内污染物扩散的模拟 [J]. 中国环境科学, 2007,27(5):604-607.
- [22] 贾 英,方 明,吴友军,等.上海河流沉积物重金属的污染特征与潜在生态风险 [J]. 中国环境科学, 2013,33(1):147-153.

致谢: 本研究获得了湖南省建筑节能与环境控制关键技术协同创新中心的大力支持,在此一并致谢。

作者简介: 赵福云(1977-),男,湖南株洲人,教授,博士,主要从事建筑环境流体动力学与建筑节能研究.发表论文 120 余篇。