

街道峡谷内汽车排放污染物浓度分布的观测与数值模拟*

叶 春 王嘉松** 李新令 周校平 黄 震

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海, 200030)

摘 要 在上海某典型街道峡谷内按一定的空间布点, 在一定时段内同时对各布点进行采样并做一氧化碳浓度分析, 同时记录车辆种类、车流量、气象条件等, 分析街道峡谷内污染物浓度的分布. 运用风向频率加权 (WDFW) 方法, 结合大气流动和污染物扩散的 CFD 模型进行数值模拟计算. 结果表明, 数值模拟结果和现场观测结果较吻合, 建筑物低的一侧污染物浓度远高于建筑物高的一侧污染物浓度, 两侧的污染物浓度随着高度的增加而降低.

关键词 风向频率, 汽车尾气, 数值模拟, 现场实验.

近几年国内外学者对城市街道机动车排放污染物的扩散规律做了比较深入的研究^[1-8]. 相关的研究主要是采用固定风向条件下的数值模拟模型来预测, 且多考虑街道两侧的建筑为等高, 但实际上两侧的建筑多为不对称. 风向也是多变的, 因此, 难以用 CFD 的方法直接对真实的大气条件进行模拟.

本文对上海市某典型街道峡谷内汽车排放的污染物浓度分布实地观测, 同时运用模拟实际大气条件污染下污染物浓度的新方法^[9], 结合大气流动和污染物扩散的 CFD 模型, 数值模拟结果与实地监测的结果进行对比, 研究实际大气条件下街道峡谷内汽车排放污染物的浓度分布.

1 样品的采集与分析

选定上海市典型道路 (北京东路) 为实地观测场所, 以一氧化碳作为监测对象, 进行气体污染物浓度的监测及相关条件的测量. 该街道为东西走向, 为一不对称街道峡谷, 路北建筑设为 A 侧, 高 40m, 路南建筑设为 B 侧, 高 18m, 车道宽 12m, 两侧人行道分别为 3m 和 6m. 在 B 侧由下向上分别布置测点 B1(1m), B2(4.5m), B3(10.5m), B4(16.5m); 在 A 侧由下向上分别布置测点 A1(1m), A2(8m), A3(20m), A4(41m). 对上述各点采用微型泵和气体采样袋采集气样, 然后用精度为 $0.1\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 的 GXH-3011 型便携式红外线 CO 分析仪进行浓度分析, 得到各点在不同时段的污染物 CO 的浓度. 用 FYF-1 便携式测风仪在 A 侧建筑物顶部测量风速、风向等. 共进行 7 次测量, 每次 6min, 并记录相应时间段的车流量、车辆的种类构成.

不同时段不同车辆种类的车流量 (每 6min) 如表 1 所示. 大型车、中型车、小型车和摩托车 CO 的排放因子分别是 40.5 、 12.8 、 10.5 和 $1.4\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ^[10].

表 1 不同时段的车流量

Table 1 The number of vehicles passed by in different time range

车型	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组	第七组
大型车	14	8	18	13	17	15	17
中型车	26	30	25	54	39	41	33
小型车	151	120	127	134	151	98	106
摩托车	0	0	1	4	1	0	1

2 数学模型及其求解方法

采用王嘉松等^[9]提出的风向频率加权 (wind direction frequency weighted WDFW) 的方法, 结合求解 N-S 方程、污染物扩散方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型来预测大气流动和污染物扩散规律.

* 国家自然科学基金 (50208011) 资助项目. ** 联系人: jwang@sjtu.edu.cn

设定整个计算域宽度为 151m, 高度为 100m, 街道长度为 100m. 按照不同时间段实际测量的数据分别给定模拟条件, 设污染源的宽度为 5m, 每个时段污染源强由实验中得到的车流量、车辆种类以及排放因子计算得到. 采用 CFD 模拟时, 分别计算东、南、西、北风向条件下, 以相应的速度作为入流边界, 用现场监测数据计算线源源强 Q_L 作为 CFD 模拟的边界条件之一, 得到对应风向条件下的浓度模拟结果, 再利用 WDFW 模型得到综合浓度, 进行模拟与测试结果的比较, 以进行数值计算的验证和分析.

3 模拟结果和实地监测结果对比

表 2 为实测风速风向转化后得到的四个方向的风向频率 (F) 与风速大小 (V). 可见南风 and 东风的频率较高, 其次为西风, 北风的频率较低或为零时, 可以不计.

表 2 四个方向的风向频率与风速

Table 2 Wind direction frequency and velocity in the four directions

组别	南风 (0°)		西风 (90°)		北风 (180°)		东风 (270°)	
	F	$V/m \cdot s^{-1}$	F	$V/m \cdot s^{-1}$	F	$V/m \cdot s^{-1}$	F	$V/m \cdot s^{-1}$
1	0.50	4.163	0.18	1.440	0.00	0.000	0.32	3.433
2	0.32	2.333	0.21	0.556	0.18	0.377	0.29	2.794
3	0.45	2.824	0.22	0.368	0.05	0.000	0.28	2.751
4	0.49	2.868	0.40	0.663	0.01	1.848	0.10	2.958
5	0.50	4.784	0.46	1.986	0.00	0.000	0.04	1.270
6	0.46	4.321	0.38	2.224	0.04	0.542	0.12	1.79
7	0.46	4.045	0.24	1.291	0.04	3.233	0.26	2.000

由于 7 组数据具有一定的相似性, 这里取其中 2 组测量和模拟的数据进行分析. 由此计算的 CO 污染源强、体积排放率和 z 方向的排放速率分别为第 1 组 $6.88 \times 10^{-3} g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$, $7.13 \times 10^{-3} m^3 \cdot s^{-1}$, $1.33 \times 10^{-5} m \cdot s^{-1}$; 第 2 组 $5.45 \times 10^{-3} g \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$, $5.64 \times 10^{-3} m^3 \cdot s^{-1}$, $1.05 \times 10^{-5} m \cdot s^{-1}$.

以第 1 组的结果为例, 图 1 分别给出南风时的流场模拟结果图和对应的浓度图, 这是属于递升型的街道峡谷, 从图 1 可以看出, 峡谷中存在一个顺时针方向的强旋涡, 同时在迎风面建筑的上方存在一个顺时针的旋涡. 在空气的输送作用下, 污染物在街道背风面堆积, 即在街道峡谷地面上的污染物向街道上空扩散的过程中, 背风面浓度普遍高于同一水平面其它点的浓度, 并在建筑物背风面形成新的高浓度区, 使得背风侧街道地面附近污染物浓度较大, 浓度随着高度的递增而减小.

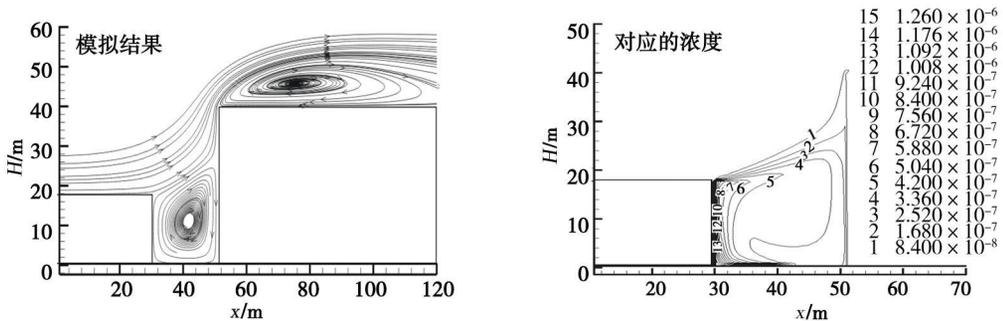


图 1 南风时的流场模拟结果和对应的浓度图

Fig 1 The numerical simulated velocity and concentration field at south wind

图 2 为北风时的流场模拟结果图和对应的浓度图, 属于递降型的街道峡谷. 位于峡谷下方的旋涡为逆时针方向, 在峡谷底部迎风面污染物浓度大于背风面污染物浓度; 位于峡谷上方的旋涡为顺时针方向, 在峡谷顶部背风面污染物浓度大于迎风面污染物浓度. 由此可以预见较低建筑物一侧污染物浓

度较高，这一结论在后面的观测结果分析中可以得到证实。

为了更好地比较出监测值和模拟值性质上的异同和浓度空间分布特点，采取比浓度 R_c （也称为无因次浓度）的比较方法，以建筑物 B 最靠近地面的 B1 点的浓度为标准，得到各点的比浓度。

$$R_{C_i} = C_i / C_{B1} \tag{1}$$

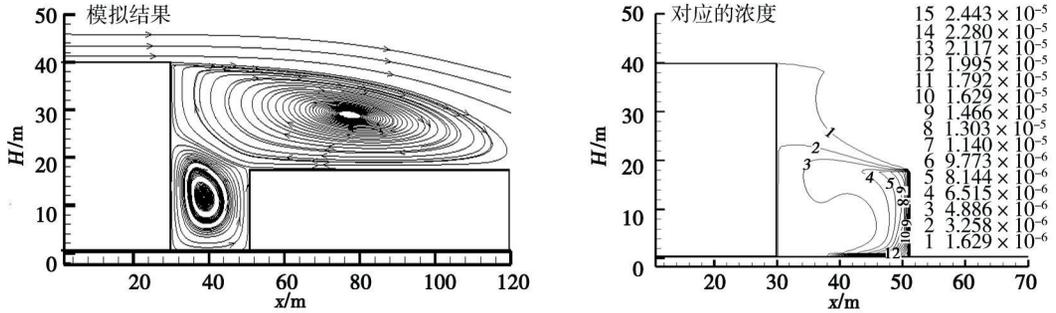


图 2 北风时流场模拟结果和对应的浓度图

Fig 2 The numerical simulated velocity and concentration field at north wind

图 3 为各组比浓度监测值和模拟值的关系曲线。实地观测发现，B 侧的采样点 B1, B2, B3 和 B4 的 CO 浓度明显比 A 侧的 A1, A2, A3 和 A4 大，且 B1 点的浓度最高。由于两侧污染物浓度分布的差异主要受南风 and 北风的影响，数值模拟分析表明，无论是吹南风还是吹北方（本次测试的风速较大）都容易形成稳定的旋涡，由于气流旋涡的作用，污染物都是在 B 侧堆积，因此，数值模拟和观测结果都表明，建筑物高度较低的 B 侧污染物浓度明显高于 A 侧。

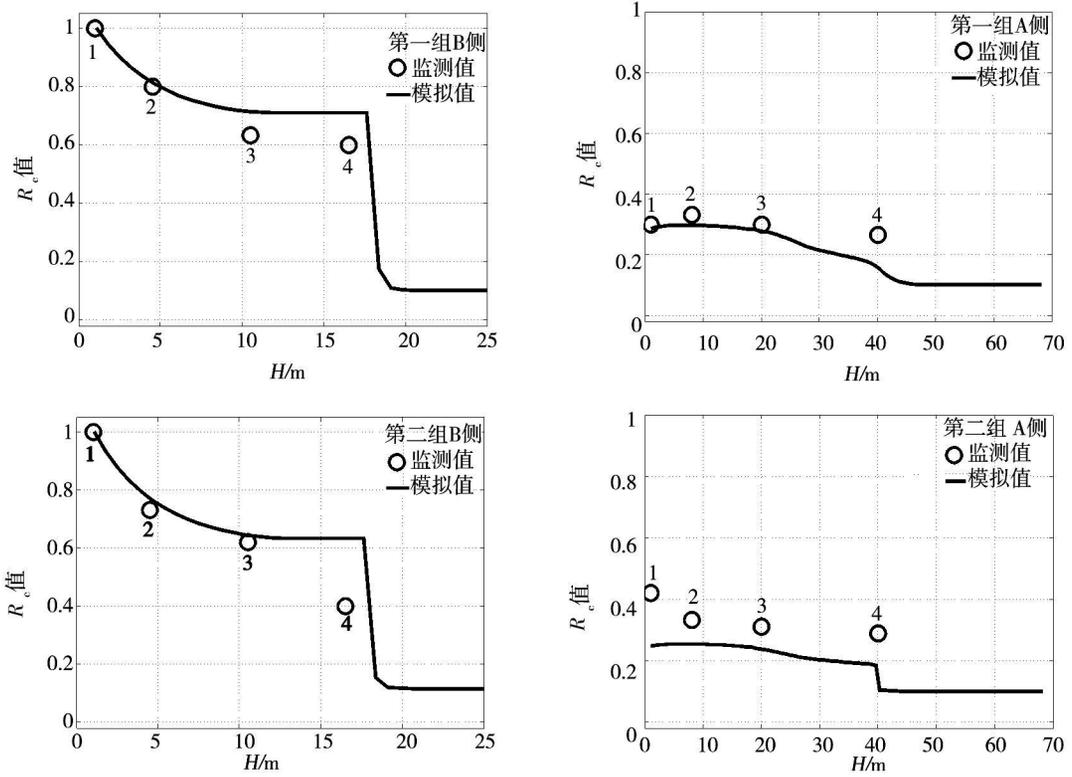


图 3 各组比浓度监测值和模拟值的比较

Fig 3 The numerical simulation and field measurement at both sides of street canyons

另外，模拟值与监测值在趋势上比较一致，但在数值上有一定的差异。这可能是由于：

(1) 排放因子的取值是造成数据差异的主要原因。由于国内排放因子数据资料非常有限,尤其是近年来的数据缺乏,因此,用的排放因子与本实验的实际情况有一定差别。另外,车速对排放因子也有较大的影响,对于不同的车速采用相同的排放因子对于结果也会造成较大的影响。

(2) 目前国内外的研究都是假设污染物源强是连续的线源,但事实上源强是离散的,在车辆处于怠速状态下,很难计算车流量,与实际的情况可能有差别。

(3) 对于 A4 B4 这两点的误差比较大,是因为这两个点都处于建筑物顶部的位置,气体流动比较复杂,另外,建筑物在模拟计算的时候被简化成长方体,与实际的建筑物形状有出入。

(4) 考虑到计算量的原因,数值模拟中忽略了周围其它街道的影响,事实上前后街道对目标街道的流场和浓度场是存在一定影响的。

4 结论

应用 WDFW 模型和 CFD 模型模拟了真实大气条件下污染物的传输扩散过程,同时进行了实地测量,与数值模拟结果对比,二者趋势吻合较好,表明在建筑物低的一侧污染物浓度远高于建筑物高的一侧,两侧污染物的浓度随着高度的增加而降低,在街道两侧,建筑物低的一侧近地面的浓度最高。

参 考 文 献

- [1] Kastner Klein P, Plate E J. Wind-Tunnel Study of Concentration Fields in Street Canyon. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 3973—3979
- [2] Goyal P, Rama Krishna T V B P S. Dispersion of Pollutants in Convective Low Wind: a Case Study of Delhi. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 2071—2079
- [3] Sotiris V, Bernard E A F, Kouli S P et al. Modelling Air Quality in Street Canyons: a Review. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 155—182
- [4] Qin Y, Kot S C. Dispersion of Vehicular Emission in Street Canyons, Guangzhou City, South China (P. R. C.). *Atmospheric Environment*, 1993, **27B** (3): 283—291
- [5] 周洪昌, 吴晓琰. 街道峡谷湍流流动的风洞实验与数值计算. *空气动力学学报*, 1998, **16** (4): 411—418
- [6] 傅立新, 郝吉明, 何东全等. 街道峡谷汽车污染模拟研究. *清华大学学报 (自然科学版)*, 1999, **39** (6): 99—101
- [7] 王嘉松, 黄震. 应用不同湍流模式预测城市街道峡谷的大气环境. *上海交通大学学报*, 2002, **36** (10): 1496—1499
- [8] 王远成, 吴文权, 张懿. 峡谷内机动车排放污染物的数值模拟. *上海理工大学学报*, 2004, **26** (4): 348—352
- [9] Wang J S, Chan T L, Cheung C S et al. Three-Dimensional Pollutant Concentration Dispersion of a Vehicular Exhaust Plume in the Real Atmosphere. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**: 484—497
- [10] 苏小芳, 范炳全, 黄远东等. 城市次干道路段机动车污染物排放因子的测定. *上海理工大学学报*, 2004, **26** (4): 318—322

FIELD MEASUREMENT AND NUMERICAL SIMULATION FOR POLLUTANT DISPERSION FROM VEHICULAR EXHAUST IN STREET CANYON

YE Chun WANG Jia-song LI Xin-ling ZHOU Xiaoping HUANG Zhen

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

ABSTRACT

A field measurement in a street canyon in Shanghai was conducted for analyzing the concentration of CO in several locations at both sides of the street. Traffic parameters, topography and meteorological parameters were simultaneously measured. CFD numerical simulation coupling with the wind direction frequency weighted (WDFW) method was carried out based on the conditions that were measured. It was shown that the simulated results have a good agreement with the field experimental data and the concentration of CO at the side of the lower building is much higher than that of the higher building and the concentration of CO at both sides decreases with the increase of the height of the buildings.

Keywords wind direction frequency, vehicular exhaust, numerical simulation, field measurement