

城市街道汽车污染扩散规律模拟研究*

傅立新 郝吉明 何东全 贺克斌

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084 Email: fuchen@tsinghua.edu.cn)

摘要 如何简单而准确地模拟城市街区汽车污染的扩散规律, 对于城市汽车污染控制决策具有重要的意义. 从大量实测数据, 分析了风速风向等影响街道峡谷污染物扩散的主要因素. 采用丹麦开发的街道峡谷模式 OSPM, 对汽车污染扩散规律进行了模拟研究. 与北京实测数据对比结果表明, 该模式较好地模拟了昼间风速风向对街道峡谷内汽车污染扩散的影响, 比较准确地反映了峡谷中流场和湍流场的主要特征, 以及汽车排放污染物的扩散规律. 污染物浓度与风速的倒数近似成正比.

关键词 街道峡谷, 汽车污染, 扩散模拟, 模式, 风速, 风向.

A Study on Automotive Pollution Dispersion Modeling in Urban Streets*

Fu Lixin Hao Jiming He Dongquan He Kebin

(Dept. of Environ. Sci. and Eng., Tsinghua University, Beijing 100084, China Email: fuchen@tsinghua.edu.cn)

Abstract It is very valuable for decision-making of automotive pollution control to simply describe the dispersion of traffic related air pollution in urban streets. In this paper, large amount of monitoring data were used to analyze the effect of wind speed and wind direction on pollutant dispersion inside a street canyon. An urban street canyon dispersion model OSPM initially developed in Denmark, was adopted for the modeling study. Tested by monitoring data, the model is found to be capable of simulating the effects of wind speed and wind direction on dispersion in daytime, showing that the basic pattern of flow and turbulence field in a street canyon is correctly reflected in the model. Pollution concentration is nearly proportional to the reversal of wind speed with form of $1/u$.

Keywords street canyon, automotive pollution, dispersion modeling, model, wind speed, wind direction.

美国较早的 STREET 模式^[1]和 1986 年开发的峡谷烟羽箱模式 CPBM^[2]等, 是目前国际上较常用的街道峡谷汽车污染扩散模式. 但由于模式精度及通用性等原因, 至今未有一个公认的通用模式. OSPM^[3]正是针对这一需要, 由丹麦国家环境研究所开发的很有应用前景的一个模式. 本文利用该模式对北京的街道汽车污染进行研究, 以期准确地模拟北京街道的汽车污染扩散规律.

1 模式原理

OSPM 模式对风速和风向的模拟, 主要是基于对街道峡谷流场特征的分析 and 简化, 将峡谷内涡流影响的区域, 用循环区的方法来模拟.

循环区的大小与屋顶风速, 建筑高度等因素相关. 模式认为循环区为一个直角梯形, 下边长度为:

$$L_r = 2H_r \quad (\text{上边长度为 } 0.5L_r) \quad (1)$$

式中, H 为建筑物高度, r 是低风速修正因子, 用于低风速时减小循环区范围, 当 L_r 大于街道宽度 L 时, 实际循环区下边长为 L .

在街道峡谷中, 交通污染产生的污染物浓度可以分为 2 部分: 直接由峡谷低部风输送到受体的直接贡献, c_d ; 由于峡谷涡流输送扩散产

* 本课题得到 FORD-中国研究与发展基金资助, 批准号: 9712705 (The Study is Sponsored by Ford-China Research & Development Fund, project numbered 9712705)
作者简介: 傅立新(1967~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染与控制
收稿日期: 1998-11-29

生的循环部分, c_r . 因此, 总的浓度可以表示为两者之和:

$$c = c_d + c_r \quad (2)$$

计算直接贡献所用的基本方程是无限长线源地面浓度高斯公式. 循环贡献部分的浓度 c_r 的大小, 采用一个简化的箱模型, 由循环区内质量平衡进行估算. 主要原理是, 流进循环区的污染物质量流率等于从循环区流出的流率, 而且在循环区内, 污染物是充分混合的. 由此可以求得循环区浓度为:

$$c_r = \frac{(Q/L) d l \sin(\theta)}{\sigma_{wt} d 2 + u^d d 3} \quad (3)$$

其中, Q 为线源的源强, mg/s ;

$$d1 = \text{Min}(L_{\max}, L_r); L_{\max} = L / \sin(\theta); \quad (4)$$

θ 为风向与街道的夹角. σ_{wt} 为峡谷顶部的湍流速度, m/s . u^d 为对流速度, m/s

$$d2 = \text{Min}(L_{\max}, 0.5L_s) \quad (5)$$

$$d3 = \text{Max}[0, (d1/0.5L_s - 1)L_s] \quad (6)$$

其中 L_s 是循环区的侧边长.

2 风速对扩散的影响

在城市街道峡谷中, 由于上层大气会在峡谷内产生一个或几个涡旋, 因而使得峡谷内流场完全不同于上层大气. 80 年代, 很多研究都证实了街道中涡旋回流的存在. Depaul 和 Sheih^[4] 1985 年在芝加哥的一个街道峡谷中进行了一次示踪实验, 结果表明, 当环境风速在 $2 \sim 5\text{m/s}$ 之间并与道路正交时, 街道峡谷中只有一个涡流存在, 当风速降低到小于 $1.5 \sim 2.0\text{m/s}$ 时, 峡谷中的涡流就似乎消失了. Yamatino 和 Gotz^[2] 1986 年发现任何垂直于街道峡谷的气流都会在街道峡谷中产生涡流, 涡流横向速度与建筑物顶面处横向速度分量成正比.

尽管街道峡谷中涡流现象非常复杂, 但有一个规律是相同的, 即上层大气中风速加大时, 峡谷内污染物与上层大气的扩散交换也随之加剧, 从而使得峡谷内污染浓度降低. 这一规律从北京的一条街道实测的污染浓度与风速之间的关系(见图 1)可以得到印证. 根据对该街道交

通流量的调查和北京市机动车污染物平均排放因子, 用 OSPM 模式可以模拟该街道内污染物浓度与风速的关系(见图 2). 结果表明, OSPM 模式能较好地模拟该街道内风速与污染物扩散的关系, 在风速很低的情况下(小于 2m/s), 这种准确性尤其重要, 因为此时污染物浓度值很高, 容易超过环境质量的限值.

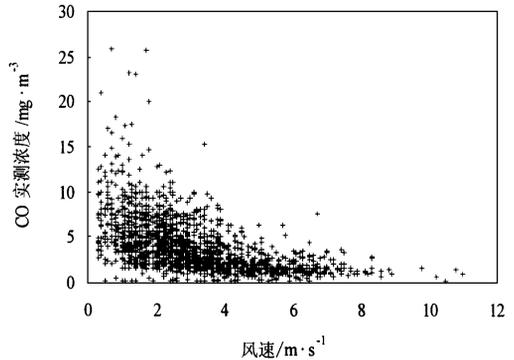


图 1 风速与道路实测污染物浓度的关系(北京)

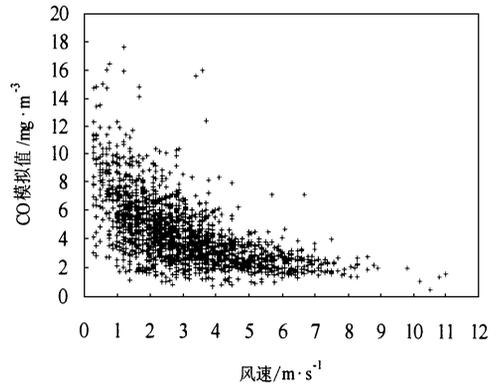


图 2 风速与模拟污染物浓度的关系(北京街道)

3 风向的影响

由于涡流的存在, 街道峡谷内某一特定受体点处的浓度对风向也非常敏感. Johnson^[1] 等人在实验中发现, 街道内 CO 的浓度分布由建筑物顶面处的风向决定, 建筑物背风面 CO 浓度明显高于迎风面. 这个现象表明在街道附近的涡流有一个与建筑物顶面风向反向的速度分量. 于是他们提出了经验模式来计算峡谷内的 CO 浓度. 为了测试这一结果的通用性, Dabberdt^[5] 等人选择了另外几条高宽比分别约

为 1.5 和 2.0 的街道同时进行现场实验, 测试数据表明, 通常只有当风向与道路夹角大于 30 度时, 街道峡谷中才会形成涡流。

实际道路中, 由于街道两侧的建筑物分布不均匀, 与理想的街道峡谷形状存在一定差异, 风向对扩散的影响就更为复杂。Hoydysh 和 Dabberdt^[6,7]进行了一系列模拟气流的风洞实验。他们发现扩散结构强烈依赖于峡谷的不平衡度和房屋的外形。这种复杂的差异在北京的街道实测数据中也可以看得到(见图 3)。OSPM 对街区建筑的形状予以分别考虑, 最多可以计算 10 种变化, 对比模拟的风向与污染物浓度关系结果可见(见图 4), OSPM 模式可以反映风向对扩散影响的主要特征。

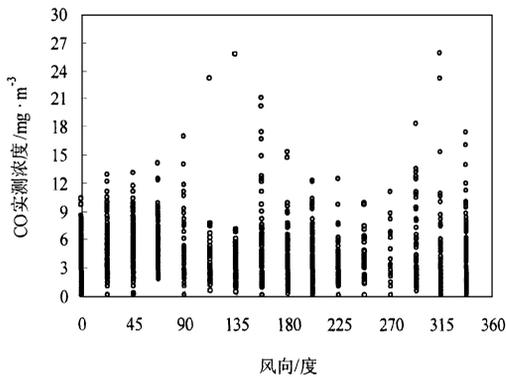


图 3 风向(以北为 0 度)与实测道路污染物浓度的关系(北京)

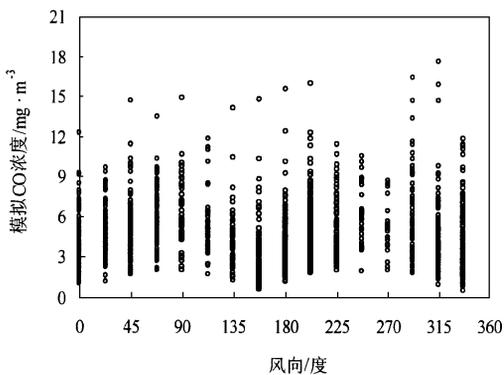


图 4 风向与模拟污染物浓度的关系(北京)

4 日照与峡谷扩散

街道峡谷内一定方向的日照, 使得峡谷一

侧的建筑物受热后温度上升, 而引起局部气流不均匀升温, 改变峡谷内的流场特征, 从而对污染扩散产生明显的影响。Nakamura 和 Oke^[8]对街道中风与温度的分布进行了详细的量测, 结果表明, 由于受日照的不均匀加热作用, 一天中不同时段峡谷内气流在各处稳定程度和扩散能力有明显差别。建筑物上部气流的方向与街道峡谷底部中线处气流的方向之间的关系, 可简单描述为气流相对于墙身的镜面反射, 在低风速条件下, 建筑顶部与峡谷底部风速之间的关系很分散。

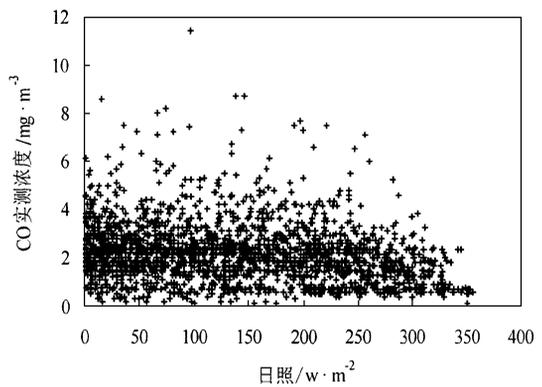


图 5 日照与道路实测污染物浓度的关系(北京)

图 5 所示为北京的街道测得的污染物浓度与日照强度的关系。从中可以看出, 在日照非常强烈的条件下, 峡谷中浓度要略微偏低一些, 这表明了日照对街区内的扩散确实有一定影响。但是, 这一影响在北京的街道中表现并不明显, 其主要原因是北京的街道相对比较开阔, 建筑高度与街道宽度的比值约为 1/3, 在这样的街道中, 峡谷作用影响的局部流场变化对整个街区的扩散影响不大。在目前的 OSPM 模式中, 尚未将日照的影响考虑进去。

5 模式精度验证

从上面分析的几个主要因素对扩散的影响来看, OSPM 模式都能较好地模拟。为了检验将诸多因素综合在一起的实际情况下, 模式的模拟效果, 将模式的模拟值与相应条件下的实际监测值进行了对比, 结果见图 6。可以看出,

该模式较准确地模拟了街道峡谷中污染物的扩散规律,说明该模式对街道峡谷中流场和湍流场的描述是正确的,反映了街道峡谷中风速风向等对污染扩散的影响规律。

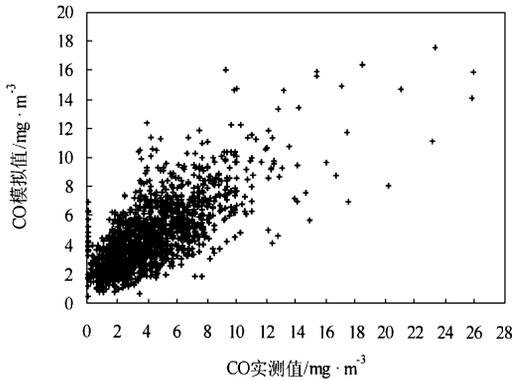


图6 模拟污染物浓度与实测值的比较

6 结论

影响街道峡谷内污染物扩散的主要因素是导致峡谷内产生涡流的上部风场。OSPM 模式采用简化的循环区理论来模拟涡流特征,并基于高斯扩散原理和箱式混合模式模拟街道峡谷内汽车污染的扩散规律。通过对北京街道峡谷的实际监测数据进行分析,结果表明,该模式可以较好地模拟风速风向对街道峡谷内汽车污染扩散的影响,比较准确地反映了街道峡谷中

流场和湍流场的主要特征和街道峡谷中汽车排放污染物的扩散规律。

参 考 文 献

- 1 Johnson W B, Ludwig F L, Dabbert W F et al. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide. *J. Air Pollution Control Association*, 1973, **23**(4): 490 ~ 498
- 2 Yamatino R J, Wiegand G. Development of CPBM models for urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 1986, **20**(14): 2137 ~ 2156
- 3 Hertel O, Berkowicz R. Modelling pollution from traffic in a street canyon: Evaluation of data and model development. DMU Luft-A129. Denmark: National Environmental Research Institute, 1989. 1 ~ 36
- 4 De paul F T, Sheih C M. Measurement of wind velocities in a street canyon. *Atmospheric Environment*, 1986, **20**(3): 455 ~ 459
- 5 Dabberdt W F, Ludwig F L, Johnson W B. Validation and applications of an urban diffusion model for vehicular emissions. *Atmospheric Environment*, 1973, **7**(5): 603 ~ 618
- 6 Hoydysh W G, Dabberdt W F. Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmospheric Environment*, 1988, **22**(18): 2677 ~ 2689
- 7 Hoydysh W G, Dabberdt W F. Concentration fields at urban intersection: fluid modeling studies. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(11): 1849 ~ 1860
- 8 Nakamura Y, Oke T R. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, 1988, **22**(12): 2691 ~ 2700