

高分辨率城市交通污染数值仿真系统研究^{*}

包 芸¹, 金陶胜^{1,2}, 余 志¹

(1. 中山大学智能交通研究中心, 广东 广州 510275;
2. 中国科学技术大学能源与热科学系, 安徽 合肥 230026)

摘 要: 以对流-扩散方程为模型, 采用 50 m 网格的高分辨率对城市中汽车尾气排放所造成的污染分布状况进行模拟, 建立了一个高分辨率城市交通污染数值仿真系统。相比同类研究, 本系统能够更准确地反映城市道路污染源的影响。最后给出了算例。

关键词: 大气污染; 交通; 扩散; 仿真

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2003) 03-0086-03

由于都市化的发展, 城市中汽车尾气排放所造成的污染越来越严重。欧美及日本等工业发达国家自 20 世纪 60 年代末就开始对机动车排气污染扩散模式进行研究^[1], 但一般多是针对高速公路或城市街道等局部问题进行讨论^[2,3], 而利用计算机仿真技术对整个城市中汽车尾气排放所造成的污染分布状况进行模拟和预测的研究尚不多见。这其中的难点在于计算工作量大, 而且影响因素复杂。文献[4]只完成了网格间距为 600 m 的低分辨率二维污染扩散的仿真模拟, 由于间距过大, 该模拟很难准确描述各交通道路对实际污染情况的影响和作用。本文利用计算机仿真技术设计出了一个高分辨率城市交通污染的数值仿真系统。系统的空间分辨率(即网格间距)为 50 m, 因而可以在仿真模拟的过程中很好地再现城市交通道路作为污染源强的作用。本系统能够比较准确地反映出整个城市交通污染状况随时间和空间的分布, 为城市大气污染的分析研究及预测、评估等提供有实际使用价值的工具。

1 基本模式

在城市道路中, 行驶的汽车排放出尾气, 尾气中含有 HC、CO、NO_x 等污染物, 这些污染物在大气中扩散, 形成城市中各处随时变化的污染。一般来说, 影响大气污染物质输送和扩散的主要因素有: 污染物质的排放量及排放源位置、风速、风的湍流强度等。

以 x 为东方向、 y 为北方向、 z 为垂直向上方

向, 建立城市三维空间坐标系。在有源条件下污染物在不可压流体中传输、扩散的偏微分方程为:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial (us)}{\partial x} + \frac{\partial (vs)}{\partial y} + \frac{\partial (ws)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) + f \quad (1)$$

其中, s 为污染物浓度 (mg/m^3), u, v, w 分别为相对于 x, y, z 方向的风速 (m/s), k_x, k_y, k_z 分别为相对于 x, y, z 方向上的扩散系数 (m^2/s), f 为污染源或汇 ($\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$), 在本文中只考虑交通道路污染源。

在计算网格的划分上, 为能比较准确描述城市道路分布, 取 $\Delta x = \Delta y = 50 \text{ m}$; 在 z 方向上考虑山丘地形的影响, 网格沿地面起伏而变化, 但仍是等距网格 $\Delta z = 20 \text{ m}$ (见图 1)。

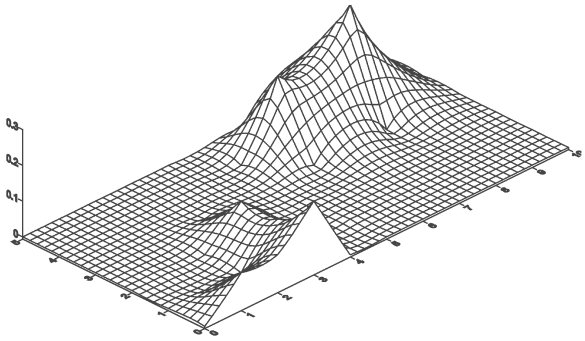


图 1 网格沿地面起伏示意图

Fig 1 The grid varying with the ground

令地面高度函数为 $h(x, y)$, 方程(1)可变换为在 (ξ, η, z) 上的表达式:

^{*} 收稿日期: 2002-07-11

基金项目: 广东省科技计划资助项目 (A10103)

作者简介: 包芸 (1960年生), 女, 副教授; E-mail: stshy@zsu.edu.cn

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial (us)}{\partial \xi} + \frac{\partial (vs)}{\partial \eta} + \frac{\partial \left[w + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} \right] s}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k_x \frac{\partial s}{\partial \xi} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{ys} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(k_z \frac{\partial s}{\partial \eta} \right) + \\ 2 \frac{\partial}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{ys} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial \left[k_z + k_x \frac{\partial h^2}{\partial x} + k_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right] \frac{\partial s}{\partial z}}{\partial z} + f \end{aligned} \tag{2}$$

其中的大气扩散系数 k_x , k_y , k_z 取为高度的函数^[5]。

采用有限体积法数值求解上述对流—扩散方程。对流项采用一阶迎风差分格式，扩散项采用中心差分格式。整个求解是利用半隐式迭代进行的。

2 道路污染源强

污染源强与道路上的车辆行驶状态以及单台车的尾气排放有关。有下列关系式：

$$f = \frac{Lel}{3600\Delta x\Delta y\Delta z} \tag{3}$$

式中， f 为源强 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)， L 为车流量 (辆/h)， e 为单台车的尾气排放中污染物的含量，称为排放因子 ($\text{g} \cdot \text{辆}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$)， l 为网格中道路的长度 (m)。对不同的车型和车速，排放因子是不同的。因此，污染源强除了与车流量有关，还和车速及道路上的车型分布有关。

在本仿真系统的研究中，我们认为一段道路上的污染源强是相同的，但它随着时间变化；而不同路段的污染源强是不同的。我们初步将其划分为若干个等级，以后将逐步完善。

3 算 例

作为城市交通污染高分辨率仿真系统的研究设计，首先在假想的一个城区作数值试验，以检验该仿真系统的有效性。今后的工作中，将结合有关部分，研究实际的道路交通污染情况，对本仿真系统的模拟进行实测验证。

取某一路网区域东西长为 5 km，南北长为 3 km。在区域中道路分布如图 2，并假定将源强分为三个等级。道路 1 的污染源强为道路 3 的 2 倍，道路 2 为道路 3 的 1.5 倍。同时我们给出了一个污染源强随每天中时刻变化的假定曲线，如图 3 所示。

图 4、5 为无风情况下交通污染的近地面分布状况，时间分别为晚上 8 时和午夜 12 时。可以看出，晚上 8 时属于交通高峰期，道路上的污染浓度较高；午夜 12 时因为车流量减小，道路上的污染物浓度降低，但由于无风，城市道路间仍充满了扩

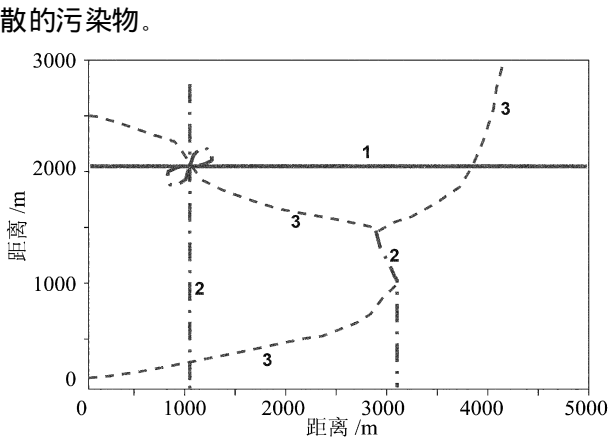


图 2 模拟区路网示意图

Fig 2 The simulated road net

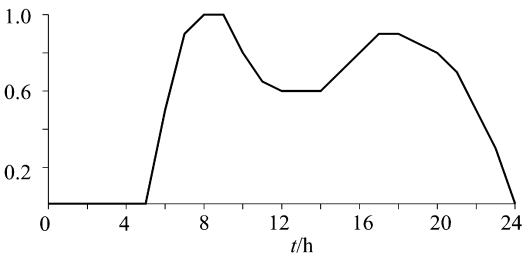


图 3 污染源强随时间变化曲线

Fig 3 The variation of source strength versus time

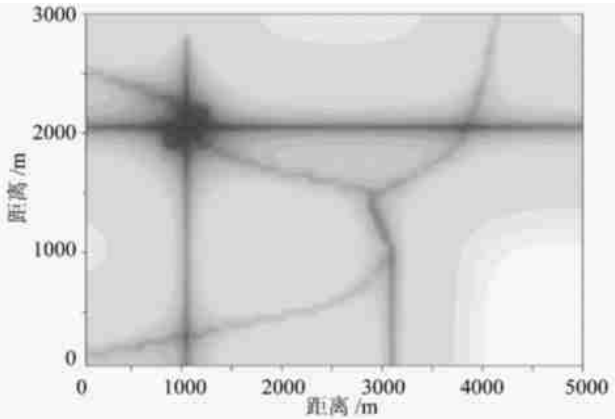


图 4 无风交通高峰期污染浓度分布

Fig 4 The distribution of pollutants during traffic peak at 8 p.m. (no wind)

图 6、7 给出的是在风向西偏南 30°，风速 1 m/s 的均匀风场作用下交通污染的近地面分布情况，时间分别为晚上 8 时和午夜 12 时。图中标出了道路位置。由于风的作用污染物被吹走。在交通高峰期，位于道路下风段的区域仍有污染存在。而午夜交通流减少后，污染物几乎被吹掉。

上述例子中，汽车排放污染物扩散的分布基本合理，说明本文研究的城市交通污染高分辨率数值

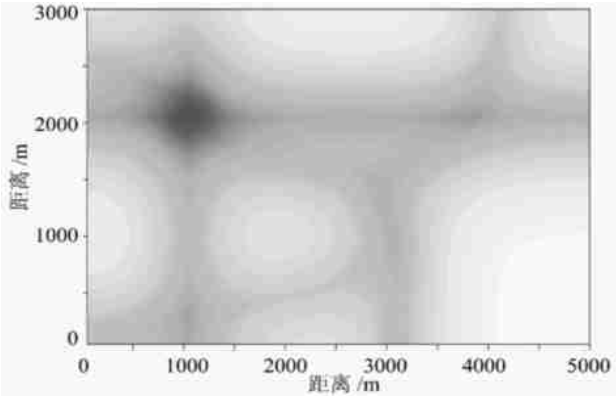


图 5 无风午夜 12 时污染浓度分布

Fig 5 The distribution of pollutants at midnight (no wind)

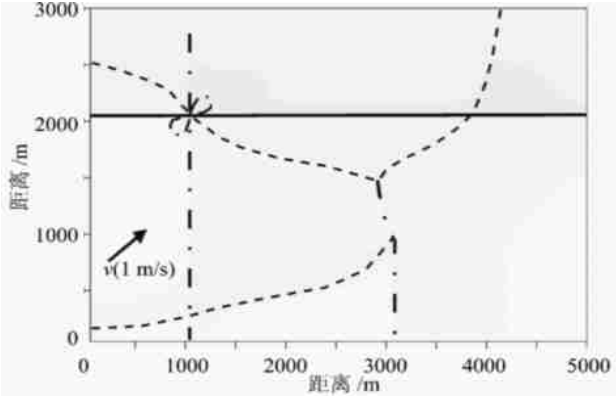


图 6 有风交通高峰期污染浓度分布

Fig. 6 The distribution of pollutants during traffic peak at 8 p.m. (with wind)

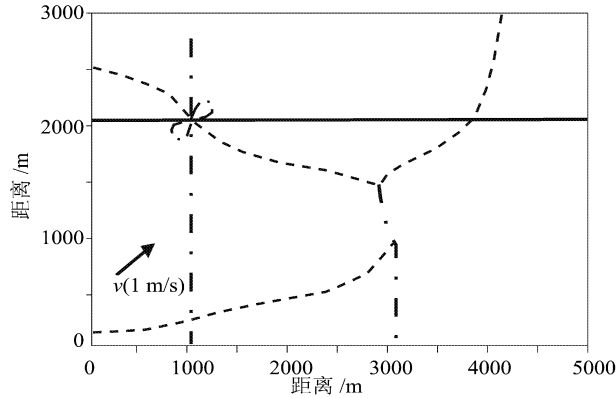


图 7 有风午夜 12 时污染浓度分布

Fig. 7 The distribution of pollutants at midnight (with wind)

仿真系统能有效地模拟出整个城市由于交通污染而造成的污染浓度动态分布。

4 结 论

(1) 城市交通污染高分辨率数值仿真系统能有效地在已知风速的条件下, 根据城市路网分布, 由城市道路交通数据可得到交通污染源强分布, 从而模拟出整个城市由于交通污染而造成的污染浓度动态分布。该仿真系统的最大特点与创新之处在于, 计算步长精确到 50 m, 并采用三维模型, 这可以高分辨率地反映出随时间变化的城市路网交通流所产生的交通污染分布动态结果, 这对城市交通污染的分析研究及预测、评估都具有很大的实际意义。

(2) 由于采用高分辨率小步长后, 要完成一座城市的交通污染仿真模拟, 其计算网点成百上千万, 计算工作量巨大, 计算周期过长, 使得高分辨率的数值仿真无法真正实现或失去实用价值。为解决这一问题, 必须结合高性能计算手段。目前已着手进行该仿真系统的高效并行化处理, 以使该城市交通污染高分辨率数值仿真系统具有实用价值。

(3) 本仿真系统还有待进一步完善扩充, 如要考虑汽车行驶气流的影响、高架桥的影响、建筑物及绿地的影响, 等等。

参考文献:

[1] 谢绍东, 张远航, 唐孝炎. 机动车排气污染扩散模式[J]. 环境科学, 1999, 20(1): 104— 109.
[2] 金陶胜. 城市道路汽车尾气污染扩散模式研究及 GIS 实现[D]. 广州: 中国科学院广州能源研究所, 2000: 11— 13.
[3] 傅立新, 郝吉明, 何东全, 等. 城市道路汽车污染扩散规律模拟研究境科学[J]. 1999, 20(6): 22— 25.
[4] 王珏, 童澄教, 黄善衡. 上海市汽车排放污染物的扩散仿真[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(3): 98— 102.
[5] (英) 帕斯奎尔·F, 史密斯·F·B. 大气扩散[M]. 曲绍厚, 温玉璞, 等译. 北京: 科学出版社, 1989: 52— 55.

A High precision Numerical simulate System of Urban Vehicle Emissions

BAO Yun¹, JIN Tao sheng^{1,2}, YU Zhi¹

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Department of Energy and Thermal Science, University of Science and Technology in China, Hefei 230026, China)

Abstract: Based on the convection diffuse equation, a numerical simulation system of urban vehicle emissions is built, which simulated the diffuse of vehicle emissions by 50 metre grid. Compared with other systems, the system could reflect the effect of line source more accurately. In addition, some examples are given.

Key words: atmospheric pollution; traffic; diffusion; numerical simulation