

广州市全城交通污染宏观仿真模拟研究^{*}

孙艳军¹, 包 芸², 陈胜祥², 彭晓春³, 陈新庚¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275;

2. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275;

3. 国家环境保护总局华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

摘 要: 采用城市交通污染宏观高分辨率三维仿真模型, 对广州市的主要道路路网的交通污染进行了数值模拟。讨论了路网线源强度的计算方法, 并给出了广州市 21.6 km×13.6 km 范围内 100 多条道路的路网分布。为了能精细的反映污染物的分布扩散情况, 采取 $\Delta x = \Delta y = 50$ m, $\Delta z = 20$ m 的高分辨率网格步长, 使计算网格步长与主要道路的宽度具有同样的数量级。两个试算算例的结果表明, 本文的城市交通污染宏观高分辨率三维仿真模型具有良好的可行性, 进一步的研究将为研究和减低城市交通污染提供定性和定量的依据。

关键词: 交通污染; 污染扩散; 三维仿真; 广州市

中图分类号: X511; X823 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 06-0127-04

近年来, 随着城市机动车保有量的增加, 机动车排放的污染物在城市大气中所占的比例越来越大^[1-7]。预测表明城市机动车尾气排放是未来大气环境中 HC、NO_x、CO、O₃ 及其它光化学烟雾浓度高低的主要影响因子之一^[8]。2003 年城市环境质量管理监测结果显示, 广州、北京、上海等大城市大气污染物中机动车排放的 CO、HC、NO_x、细颗粒物所占平均比例为 80%、75%、68% 和 50%, 已成为这些城市空气污染的第一大污染源^[9, 10]。由于机动车排放高度接近人的呼吸带高度, 直接影响了行人和周围居民的健康, 因此研究广州市交通污染的扩散规律对于科学考虑未来城市道路的规划建设, 为城市交通污染监测、评价及防治提供科学依据, 减轻城市空气污染, 改善居民生活环境具有十分重要的意义^[11-17]。

欧洲、美国和日本等国家自 20 世纪 60 年代末对机动车排气污染物扩散模式进行了多方面的研究, 但一般多是针对高速公路和城市典型街道峡谷等局部问题进行讨论^[18]。利用计算机仿真模拟技术对整个城市宏观区域机动车尾气排放造成的交通污染动态分布状况进行仿真模拟和预测的研究尚不多见^[19]。这其中的难点是计算工作量大, 而且影响因素复杂。

本文对整个广州市区的交通尾气污染分布问题进行数值模拟分析研究。根据三维的对流—扩散方程, 利用有限差分法进行求解, 建立起广州城市交

通污染的高分辨率宏观仿真模型, 并对广州市的主要交通路网进行试验性计算。

1 交通污染扩散模式的建立

在城市道路中, 机动车排放的污染物因气象条件的影响在大气层中扩散, 形成了城市中各处随时间变化的程度不同的污染。这样, 以城市地面上近地大气层为研究空间, 以机动车在地面行驶产生的污染物为对象, 以该空间内污染物的流动状况为本文的研究内容, 从而获得城区立体空间中各点随时间变化的污染物浓度的动态分布。

根据流体力学的理论, 在三维的直角坐标系统中, 有源的情况下, 污染物在大气中的传输、扩散遵循以下的对流—扩散方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \left[k_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + s \quad (1)$$

边界条件: $\frac{\partial c}{\partial x_i} \Big|_L = 0$, 其中 L 为除地面以外的求解域边界, x_i 为与所在边界垂直的坐标。式中 c 为 HC、CO、NO_x 和 PM₁₀ 等污染物的浓度 (mg/m³); u, v, w 分别为相对于 x, y, z 方向的混合物位移平均速度分量 (m/s); k_x, k_y, k_z 分别为相对于 x, y, z 方向的混合物扩散系数的分量 (m²/s); s 为源和汇 (mg/m³·s⁻¹), 本文只考虑机动车排放造

^{*} 收稿日期: 2005-03-18

基金项目: 国家发改委“十一五”规划研究课题 (ZBK1043); 广东省自然科学基金资助项目 (04300916)

作者简介: 孙艳军 (1978 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 包芸; E-mail: stsbj@zsu.edu.cn

成的道路污染源。

采用有限体积法数值求解上述的对流—扩散方程。平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 路网线源强度的计算方法

在本文中，我们主要研究城市道路上行驶的机动车所排放的尾气扩散情况，可以把道路看作是不 断排出污染物的线源，线源的强度根据公路的车流量、不同车型的比例和单车污染物排放因子等因素确定。各路段上各污染物的线源排放强度的计算公式如下：

$$E_j = \frac{1}{3600} \sum_{i=1}^n Q_i \times EF_{ij} \tag{2}$$

式中： E_j 为公路线源机动车类污染物排放强度（ $g/km \cdot s$ ）， $j=1, 2, 3$ 分别表示污染物为 HC、CO、 NO_x ； Q_i 为公路上 i 分类型机动车每小时流量（ veh/h ）， $i=1, 2, 3, 4$ 分别表示轻型车、中型车、重型车和摩托车； EF_{ij} 为 i 型机动车排放 j 污染物单车综合排放因子（ g/km ），可由修正的 Mobile6 排放因子模型计算得到^[20]。广州市单车污染排放因子取值如表 1 所示^[21]。

表 1 广州市机动车的排放因子¹⁾
Tab 1 Vehicular pollutants emission factors in Guangzhou

平均车速 ²⁾	污染物	轻型车	中型车	中型车	摩托车
14. 1	HC	3. 34	2. 80	2. 21	2. 0
	CO	33. 50	18. 54	17. 39	14. 40
	NO _x	1. 50	1. 74	5. 36	0. 17
70. 1	HC	1. 26	0. 99	1. 4	1. 6
	CO	11. 22	6. 25	8. 74	13. 80
	NO _x	3. 13	3. 17	7. 32	0. 19

1) 单位为 g/km ，2) 单位为 km/h

在本研究中，把广州市的道路根据车流量划分为三个等级，分别为一级路、二级路和三级路，根据不同等级道路上的车流量、车速和不同车型所占的比例，利用以上公式算出不同等级路的污染源强。同时，考虑到一天中，车流量是随时间而动态变化的，把所得的污染源强在不同的时间段乘以不同的加权值（图 1），从而得到一个动态的污染源强。图 1 所示是道路污染源强在一天中随时间变化曲线，其纵坐标为相对数值，即污染源强最大时该时刻的值为 1. 0。

假设城市处于均匀恒定的风场中，在同一个水平面上的风速是相同的。近地面空气流动受涡流、黏性和地面植被及建筑物等影响，风速较低，风速随着高度 z 的增加而增大^[22]。在本研究中，风速

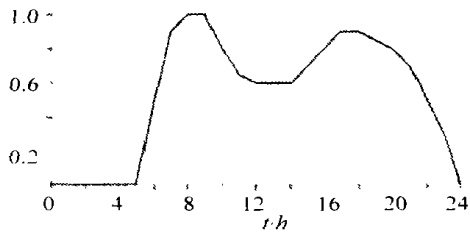


图 1 污染源强在一天中随时间变化曲线
Fig. 1 The variation of source strength versus time

由以下公式给定：

$$v = v_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m \tag{3}$$

式中， v 为在 z 高度处的风速（ m/s ）； v_1 为在 z_1 高度处的已知风速（ m/s ）； m 为风速廓线指数，取决于地面粗糙度和大气稳定度，其值约为 0. 1~0. 5。

3 实际模拟和结果分析

在建立的污染扩散模式基础上，根据广州市的路网结构、交通流量等信息，我们对广州市区的交通污染扩散情况进行了 24 h 的计算模拟。我们选取的广州市区的经纬度范围是：经度： $113^{\circ}11. 43'E \sim 113^{\circ}24. 12'E$ ，纬度： $23^{\circ}3. 05'N \sim 23^{\circ}10. 41'N$ 。大小为 $21. 6 km \times 13. 6 km$ ，包含了整个广州市的范围。为了能精细的反映污染物的分布扩散情况，在计算网格的划分上采取 $\Delta x = \Delta y = 50 m$ 的高分辨率网格步长，使计算网格步长与主要道路的宽度具有同样的数量级。在 z 方向所考虑的最高高度为 200 m， 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 $\Delta z = 20 m$ ，计算总网格数为 $432 \times 272 \times 20$ 。在污染源的选取上，我们选取广州市区的 100 多条的主要道路作为我们的污染源，路网结构如图 2。



图 2 广州市路网结构图
Fig. 2 The framework of roads netting

计算时间是从凌晨 0 点开始到次日的凌晨 0 点结束，共 24 h。为使计算有一定的延续性，在给定初始值时，先模拟计算 24 h，取 23 点的污染浓度

值作为初始值。假定在 10 m 高度上的风速为： $u=2.0\text{ m/s}$ ， $v=1.5\text{ m/s}$ 。图 3 给出的是有风时广州市早上 8 点时地面层的污染分布。由于风的作用，污染物沿风向被吹散。

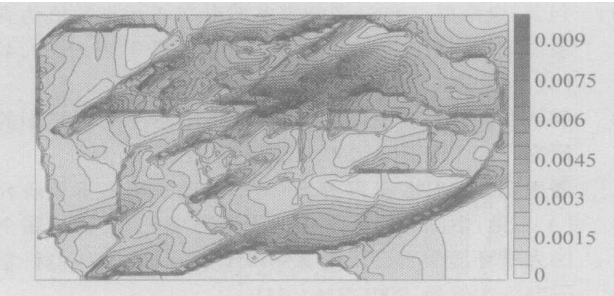


图 3 有风早上 8 点地面层的污染分布情况
Fig. 3 The distribution of pollutants at 8:00 a.m. with wind

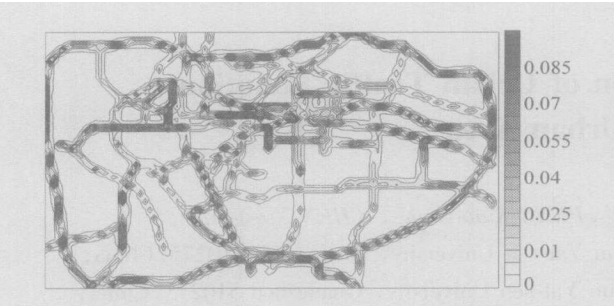


图 4 无风早上 8 点地面层的污染分布情况
Fig. 4 The distribution of pollutants at 8:00 a.m. with no wind

图 4 是无风情况污染物扩散的结果。从图中可以看到，污染物仅沿道路两旁扩散。由于比例尺的问题，看起来污染物似乎就集中在道路上，实际上污染物扩散的宽度大约为 800m 左右，以上两个算例在定性上都是正确的。

本研究中的算例仅为试算例子，采用的污染源强是由实测交通流数据提供的，污染物的动态分布还没有与城市实测交通污染状况进行对比。同时，本研究是针对城市区域交通污染扩散的宏观仿真模拟，对城市道路两侧的建筑物的微观影响进行了概化，没有考虑二次污染问题，进一步研究将对此进行深化。但本文建立的城市交通污染宏观高分辨率仿真模型通过以上两个算例，可以证明该仿真模型在实际应用中的可行性。通过进一步的研究，城市交通污染宏观高分辨率仿真模型将在研究和减低城市交通污染和城市交通路网规划工作中发挥良好的作用。

4 结 语

为适应城市规划建设和可持续发展战略的需要，建立用于评估城市交通污染对环境影响的数值

模拟技术愈来愈成为人们关注的重要课题。本文根据广州市的路网分布、交通流分布、地形和气象等数据，采用高分辨率城市交通污染宏观仿真模型，分析和研究广州市交通污染的宏观分布状况，取得了定性的研究结果。当然，对于实际复杂的城市交通污染环境模拟而言，这是比较粗糙的，如何确定交通源的分布和变化、建筑物及绿地、高架桥的影响都是尚待完善的。进一步研究将为城市机动车排放控制，城市道路规划建设，交通流量控制，城市大气污染评价及防治提供定性和定量的科学依据，为环境保护部门和交通规划部门提供一个有力的参考数据。

参考文献:

[1] PARK S K, KIM S D, LEE H. Dispersion characteristics of vehicle emission in an urban street canyon[J] . Science of total Environment, 2004, 323: 263— 271.

[2] ZHANG Y H, XIE S D, ZENG L M, et al. Traffic emission and its impact on air pollution in Guangzhou area[J] . Journal of Environment Science, 1999, 11(3): 355— 360.

[3] 唐永奎, 陈新庚, 刘攸弘. 广州汽车尾气污染的动态规律及对策研究[M] . 广州: 中山大学出版社, 1992.

[4] 贺克斌, 郝吉明, 傅立新等. 我国汽车排气污染现状与发展[J] . 环境科学, 1996, 17(4): 80— 83.

[5] QIN Y, CHAN L Y. Traffic source emission and street level air pollution in urban areas of Guangzhou, South China[J] . Atmospheric Environment, 1993, 27B: 275— 282.

[6] CHAN L Y, HUANG W T, QIN Y. Assessment of vehicular emission dispersion models applied in street canyons in Guangzhou, PRC[J] . Environmental International, 1995, 21(1): 39— 46.

[7] VARDOULAKIS S, FISHER B E A, PERICLEOUS K, GONZALEZ N. Modelling air quality in street canyons: a review [J] . Atmospheric Environment, 2003, 37: 155— 182.

[8] 房小怡, 蒋维楫, 季崇萍等. 北京交通环境污染诊断模拟初步研究[J] . 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 214— 222.

[9] 刘蔚. 机动车排放污染已成城市空气质量大患[EB/OL] . <http://www.cenews.com.cn/news/2004-09-06/38475.php>, 2004— 9— 6.

[10] 刘蔚. 机动车排放对城市大气污染贡献率将达 79% [EB/OL] . <http://www.cenews.com.cn/news/2004-12-10/41216.php>, 2004— 12— 10.

[11] ZHAO L R, WANG X M, HE Q S, et al. Exposure to hazardous volatile organic compounds, PM10 and CO while along streets in urban Guangzhou, China[J] . Atmospheric Environment, 2004, 38(36): 6177— 6184.

[12] KINNEE E J, TOUMA J S, MASON R, et al. Allocation of onroad mobile emission to road segments for air toxics

modeling in an urban area[J] . Transportation Research Part D, 2004, 9: 139—150.

[13] JOHNSON W B. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide [J] . Atmospheric Environment, 1991, 23B: 490—498.

[14] LEE I Y, PARK H M. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons [J] . Atmospheric Environment, 1994, 28: 2343—2349.

[15] PARK S K, KIM S D, LEE H. Dispersion characteristics of vehicle emission in an urban street canyon[J] . Science of the Total Environment, 2004, 323: 263—271.

[16] 谢拯, 吴志军, 黄震. 城市街道峡谷机动车排气污染扩散研究现状[J] . 吉林工业大学自然科学学报, 2001, 31 (4): 91—95.

[17] 吴志军, 黄震, 谢拯, 等. 城市街峡谷机动车污染物扩散的模拟研究[J] . 吉林大学学报: 工学版, 2002, 32 (4): 28—32.

[18] 谢绍东, 张远航, 唐孝炎. 机动车排气污染物扩散模式[J] . 环境科学, 1999, 20(1): 104—109.

[19] 包芸, 金陶胜, 余志. 高分辨率城市交通污染数值仿真系统研究[J] . 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42 (3), 86—88.

[20] 郝吉明, 吴烨, 傅立新, 等. 北京市机动车污染分担率的研究[J] . 环境科学, 2001, 22(5): 1—6.

[21] 潘南明, 汪道明, 孙群, 等. 广州市机动车污染排放研究[A] . 见: 中国环境科学学会大气环境分会. 第八届全国大气环境学术会议论文集[C] . 北京: 中国环境科学研究院大气所, 2001: 326—331.

[22] 高绍凤, 陈万隆, 朱超群. 应用气候学[M] . 北京: 气象出版社, 2001.

Macroscopic Numerical simulation of Urban Traffic Pollution
in Guangzhou Urban Area

SUN Yan jun¹, BAO Yun², CHEN Sheng xiang², PENG Xiao chun³, CHEN Xin geng¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
3. South China Institute of Environmental Science, SEPA, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Traffic pollution in Guangzhou was numerically analyzed by using three dimensional numerical simulation model with high resolution and the computation methodology of linear source strengthen was discussed. The distribution of more than 100 roads was identified in the range of the whole Guangzhou city. High resolution grid spacing of $\Delta x = \Delta y = 50$ and $\Delta z = 20$ meters was applied for reflecting the distribution and diffusion of vehicle emission pollutants precisely. Accordingly, computational grid spacing was provided with identical scalar with main roads width. The results of two tentative calculation examples show that three dimensional numerical simulation model with high resolution for traffic pollution is practicable. The simulative results will give the qualitative and quantitative instructions for investigating and controlling urban traffic pollution.

Key words: traffic pollution; pollution diffusion; three dimensional numerical simulation; Guangzhou city