

文章编号: 1000-2022(2005)03-0423-10

公路和城市街渠机动车大气污染物扩散模式发展综述

彭 军¹, 张 明², 王体健¹

(1 南京大学 大气科学系, 江苏 南京 210093; 2 国电环境保护研究所, 江苏 南京 210031)

摘 要: 随着城市机动车数量的增加, 机动车尾气污染已经成为城市污染物的重要来源。研究机动车尾气扩散规律, 可为公路建设, 车流量控制, 街道大气污染的监测、评价与防治提供科学依据。对公路机动车污染物扩散模型的发展进行了回顾, 详细论述了高斯模式、数值模式、统计模式等模式的发展历程及其目前存在的问题, 并比较了几种典型模式的性能优劣及其各种条件下的适用性。随后对城市街渠峡谷机动车污染物扩散模型进行专述, 指出了街渠峡谷模式研究的难点在于街渠流场模拟, 介绍了国外最新街渠流场研究方法。最后提出了当前机动车大气污染物扩散模型存在的主要困难, 展望了其解决途径和发展的方向。

关键词: 机动车污染; 扩散模型; 城市街道峡谷

中图分类号: P461.3 **文献标识码:** A

全球城市化进程的不断加快引发了日趋严峻的环境问题。城区大气环境与城市规划、城市空气污染及住区模式选择等已逐渐受到人们的重视。城市作为一个工厂众多、交通繁忙、建筑物林立、人口高度密集的生存空间, 其空气质量状况与人们的健康状况、生活质量直接相关。随着城市机动车数量的增加, 机动车尾气污染已经成为城市污染物的重要来源。城市规模与现代化程度愈高, 因机动车辆的排放产生的污染所占城市大气污染物源强的比例越大。20世纪70年代纽约、洛杉矶和东京等城市的空气污染物中有90%来自汽车尾气, 目前我国许多大城市的情况与此类似。城市中污染最严重的地区及人类活动最频繁的地区往往在城市街渠中。因此研究城市街渠中各种气象场特征, 湍流场特征, 从而进一步研究机动车尾气扩散规律具有重要的科研价值和实践意义, 可为城市公路建设、车流量控制、街道大气污染的监测、评价与防治提供科学依据。

机动车污染物扩散问题的研究最早起始于20世纪30年代, 在70年代以后逐渐成为研究热点, 并且发展了很多用于模拟公路和城市街渠污染物扩散的模式。近20a来, 又不断有新的模式开发。这些模式主要是以解析解为基础的烟流烟团模式, 基于微分方程的数值模式, 基于观测结果和风洞模拟的半经验模式, 还有一些统计模式, 以及基于人工智能的模式等。本文主要对公路机动车污染物扩散模型的发展进行回顾, 并对这些模型进行综述和评价, 指出了当

收稿日期: 2003-10-23 改回日期: 2004-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40333027)

作者简介: 彭 军(1968-), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 硕士, 研究方向: 大气边界层和大气扩散。

前机动车污染物扩散模式所面临的困难,解决的途径和方向,最后还对机动车污染物扩散领域的热点—城市街渠污染物扩散模型作了概述。

1 公路扩散模式综述

至今为止,从简单的箱模型到高斯模式再到复杂的数值模式,各种各样的机动车污染物扩散模型都有所报道。

1.1 高斯模式

早期的公路机动车污染物扩散模型以高斯模型为主,通常认为是 Sutton^[1]开创了机动车污染物扩散方面的研究,他最早研究了风向垂直于无限长线源污染物的扩散问题,指出当接受点距离线源很近时,线源可以被看作无限长,从而简化了扩散问题。随后, Csanady^[2]曾经发展过一个仅适用于垂直风向的有限线源模型,对于有限线源来说必须考虑边界效应。由于很难给定一个具体的方程来描述不同风向条件下有限源的扩散问题,因此有必要把线源描述为一系列点源的集合。然而早期这样做对于多线源问题的处理,就需要耗费大量的计算时间。 Espin^[3]给出了一种高效率的有限线源扩散近似计算方法,在该方法中只对风向角小于 15°的情况用点源集合来模拟线源。在此之前, Luhar 等^[4]曾提出过一个通用有限线源模型 (GFLSM),通过对坐标的转换,使模型适用于任何风向。Khare 等^[5]应用印度德里的交通和气象条件对 GFLSM 进行了检验并给出了一些模型修改建议。

早期发展了很多公路模型来描述公路污染物的分布,这些模式都能够一定程度上估计在特定条件下污染物的时空分布。模拟值通常都是气象、街区几何形状和下风向接受点的函数。在美国,国家环保局于 1969 年开始组织发展机动车污染物扩散模式。在 20 世纪 70 年代,一系列以 CALNE、EGAMA 和 HWAY 为代表的模式出现了。

EPA 发展的 HWAY 是一个比较流行的公路机动车尾气扩散高斯模式^[6]。对于平坦路面,公路被看作是一系列的有限线源,对每个车道视为直的、连续的、污染物排放速率均匀的有限线源分别进行计算,然后将线源模拟成一系列连续的点源并通过积分高斯点源方程得到线源浓度。然而一些研究指出 HWAY 会过高估计靠近公路的接受点污染物浓度,尤其是当大气处于稳定状态,风向与公路近乎平行,并且风速较小的情况下。Peterson^[7]将扩散参数表示为风脉动量的函数,发现这样可以明显地改善原有 HWAY 模式的性能。Rao 等^[8]对 EPA-HWAY 的改进提出了一些建议,并且在 GM 扩散实验数据研究和 New York State(NYS)研究的基础上提出了一种新的应用于公路污染物浓度估算的扩散曲线。当这种扩散曲线取代原有的 Pasquill-Gifford(P-G)曲线,并且将空气动力学拖曳因子考虑在内后,HWAY 模式的性能有显著提高。1980 年 HWAY-2 面世了,与原来的版本比较,新版本由于对扩散算法进行了改进,因此对污染物浓度的预报更趋于合理化。HWAY-2 抛弃了原先的 6 类 P-G 扩散廓线,而是把随距离变化的扩散廓线与三种稳定度域(不稳定,中性,稳定)相联系。HWAY-2 允许用户同时模拟多条公路和多时段模拟,因此有利于对公路十字路口进行模拟及进行敏感性分析。Chock^[9]基于 HWAY 模型发展了一个高斯扩散模式 GM,这个模式舍弃了传统高斯模式点源假设所带来的积分的麻烦,采用无限长线源并且直接将扩散参数作为风与车道夹角和距源距离的函数。此外,该模式还考虑了相当稳定和微风条件下车道上烟羽的抬升。

另外一个高斯模式是 CALNE 模式^[10],该模式对平行和垂直于街渠的风向采用不同的公式计算并应用了混合区域的概念来表征污染物的扩散特征。模式运算中实际上是将公路划分为若干个单元,每一单元近似成一个通过单元中心点且与风向垂直的有限长线源,下风向浓度

看成是所有单元的贡献之和。不久以后将高斯烟羽模型与箱模型相结合的 CALNE-2 模式出现了。2 a 后, CALNE-3 面世了, 它允许同时计算 10 条有限线源, 20 个受点的污染物浓度, 并且自动将每个受点来自于各个线源的贡献相加。这个模式中有很多 HWAY 所没有的特征, 比如对时间的平均, 对表面粗糙度, 干沉降速度, 路面起伏的考虑。Benson 等^[11]又进一步修改了 CALNE-3 开发出 CALNE-4, 可用于估计交通路口、桥梁、停车场和有起伏公路的 CO、NO_x、惰性气体和颗粒物的浓度。在这个模式的应用中, 高斯方程基于两点假设: 一是均一的水平风场, 二是一定时间段内街道上空大气状态保持同一稳定性。这也意味着当处理复杂地形时, 会发生渠道效应。由于 CALNE-4 是一个短期模式, 主要计算 1 h 平均污染物浓度, 因此要求输入逐时气象数据, 车流源排放和混合层高度。

MM 是一个可以用来预报选定点 CO 浓度的模式^[12], 这个模式中考虑了十字路口各种类型机动车加速减速行驶状态所增加的 CO 排放, 扩散参数则考虑了环境大气的扩散情况及机动车运动所引起的扩散。英国运输与公路研究实验室 (TRRL, UK) 的 Hickman 等^[13]也曾经发展了一个用于模拟高速公路污染物扩散的高斯模型, 并对其进行了经验修正。该模式的输入量如车流量、流速、街道形状、屋顶风向、风速等较易获得。TRRL 于 1994 年又发展了一个高斯模型 DMRB 用来预测现有公路及将建公路的污染水平。Burden 等^[14]将 DMRB 和 CALNE-4 用于立体交叉路口 NO_x 浓度的预测, 但是没有得到比较满意的结果。

1.2 数值模式

除高斯模式外, 也有很多数值模式应用于公路扩散问题。Danard^[15]发展了一个二维欧拉模式 DANARD, 这个模式用数值方法来求解物质守恒方程。Ragland 等^[16]用与 Danard^[15]同样的边界条件, 用一种高效的矩阵转置方法来求解连续方程, 同时对扩散律进行了修正。这个模式在预测污染物浓度时, 当风向与道路成一定夹角或垂直时忽略了边界效应, 但对平行风向则考虑了边界效应并在三维方向上数值求解。Kirsch 等^[17]发展了 MROAD-2 模式, 这同样是一个二维欧拉格点模式。格点的数目可以自行确定, 并且模式允许同时存在多条高度起伏的线源。Pitter^[18]发展了 ROADS 模式, 该模式通过 Lax-wndroff 有限差分法求解大气水平扩散和化学反应方程组来估算污染物浓度。

另外一个较有影响的模式是 ROADWAY^[19], 这是一个用来预报靠近公路处污染物浓度的微分模式, 这个模式通过表层相似理论和汽车轨迹影响假定了一个表面层, 从而也可以用来预测沿公路的风速和湍流。ROADCHEM 是另外一个版本的 ROADWAY 模式, 这个版本考虑了 NO、NO₂ 和 O₃ 间的相互转换以及平流输送和扩散作用, 用表层相似理论来产生垂直方向的湍流廓线。其他与此类似的模型还包括 PAL 和 PALDS。

另外, 芬兰气象中心研制的 CAR-EM I^[20], 荷兰国家环境健康研究所 (RMM) 和荷兰应用科学研究中心 (TNO) 联合发展的 CAR 模式, 挪威空气研究中心 (NILU) 发展了适用于开阔公路的 ROADAR 和 CONTLENK 模式, 以及适用于城市街道峡谷的 NERIOSRM 模式等也是较有影响的数值模式。

1.3 统计模式

在公路机动车模型中还有一类是统计模型, 特别适用于实时的或者短期的预报。McCollister 等^[21]用历史的 CO 浓度作为预报因子发展了一个线性随机模型用来预报洛杉矶逐时和逐日的 CO 最高浓度。Tiao 等^[22]通过交通密度, 风速, 逆温层高度拟和了洛杉矶市中心 CO 的变化。Aron 等^[23]发现洛杉矶地区日 CO 极值与预报日之前的 CO 浓度、附近气象站的气压差、气温、日照时间、日照强度及逆温层高度有很大的关联。Jakeman 等^[24]应用解析和随机相结合

的模式来预测城市 CO 小时平均浓度的周期性极值。Miles 等^[25]发现随机模式在进行城市交通高污染事故发生概率方面明显优于解析模式。Liu 等^[26]等应用 Monte Carlo 方法模拟台北的 CO 浓度。Karim 等^[27]于 1998 年发展了一个用来预测城市街渠内 CO 和 NO_x 浓度极值的随机模式。树回归技术通常用来分析不同变量之间的关系。Camrie 等^[28]发展了一个多变量树回归模型,在这个模型中应用了各种变量及它们与夜间稳定性和 CO 时间序列的相关作用项。Shama 等^[29]运用极值理论来预测城市十字路口污染物超标情况。对同一十字路口,Shama 等^[29]也运用 Box-Jenkins 模型技术进行实时机动车源污染预报,并对有关机动车控制法规对街道污染物水平的影响进行评价。

1.4 其他模式

最近,一些诸如人工神经网络(ANN)、模糊逻辑理论(FLT)也被应用于机动车污染物扩散模型研究领域。Raimonde 等^[30]应用 FLT 发展了一个 APM 模型,FLT 在改良空气污染模型方面被广泛地认为有很大的发展前景。Moseholm 等^[31]认为人工神经网络对于研究街道十字路口处交通量、风向、短期 CO 浓度之间的复杂关系有很好的应用前景。Drozlowicz 等^[32]在研究阿根廷罗萨利奥市 CO 污染时发展了一个基于人工神经网络的模型。Garner 等^[33]在预报伦敦市区逐时 NO₂ 和 NO_x 浓度时基于基本的逐时气象资料发展了一个多层感知器模型(MLP),结果表明该模型优于传统的回归模型,MLP 神经网络特别适用于处理各种非线性关系。Tao 等^[34]在对鞍山市交通环境影响评价时运用了多层次模糊簇分析方法。

1.5 模式评价

伴随着公路污染物扩散研究的发展,建立了许多模式。很多研究同时也应用观测资料对这些模式的优劣进行了评价。Noll 等^[35]比较了 HWAY, CALNE 和 CALNE-2 模式,敏感性分析发现对于风向与街道成一定夹角的情况,HWAY 的模拟值比 CALNE 和 CALNE-2 高,而对于平行风向而言,CALNE 预测的浓度值更高一点。就模拟值与实测值比较发现,所有 3 种模式对平行风向浓度的估计值都偏大,而对垂直于街渠或与街渠成一定夹角条件下的污染物浓度偏小。Sistla 等^[36]基于 NYS 示踪剂试验较全面地对当时的高斯模式及数值模式进行了比较,其中包括 4 个高斯模式: HWAY, GM, AIRPOL-4 和 CALNE-2, 4 个数值模式: DANARD, MROAD2, RAGLAND 和 ROADS。结果表明 4 个高斯模式中 GM 和 HWAY 模式性能优于另外 2 种模式,而其他 4 种数值模式的性能与上述 2 种高斯模式相当。平行风向下,GM 模式明显优于另外 7 种模式。Rao 等^[37]应用 GM 示踪剂试验数据比较了 4 种高斯模式和 3 种数值模式,研究表明模拟的准确率依次为: GM, AIRPOL-2, HWAY, CALNE, DANARD, MROAD-2, ROADS。Kono 等^[38]通过 SF6 试验值比较了 OMG VOLUME-SOURCE, JEA, TOKYO, WAY-2 四种模式,结果表明 OMG VOLUME-SOURCE 模式模拟值最准确,能够较好地代表实际的大气扩散情况。此外,Okamoto 等^[39]也对许多街道的 NO_x 扩散模式作过比较。

2 城市街渠峡谷模式

由于机动车污染物排放,城市中污染最严重的地方往往发生在两侧有紧密高大建筑物的街道峡谷内。城市街道峡谷污染模式着重反映了污染物在街道峡谷内部的传输、扩散及消散的运动规律。对街道峡谷污染扩散这种微尺度扩散问题而言,环境因素,街渠的几何条件对其影响最大。街道两侧建筑物的密集程度,高度及高度分布均匀度,街道的高宽比等对街渠内的大气流场有很大影响,从而决定了街渠内污染物浓度分布。

2.1 非数值模式

过去 20 a 内, 很多简单的模式被用来模拟街道峡谷内机动车源排放的扩散问题, 包括经验半经验模式、箱模式和高斯扩散模式。

20 世纪 70 年代初期发展了很多城市街道峡谷模式, 以经验模式为主。其中很多模式假定, 街渠内的风速可以通过街渠屋顶风速线性推得。峡谷下风向的污染物浓度水平与受点的高度成线性关系, 并且和风速及街道宽度成一定比例。斯坦福研究中心 (SR I) 于 1973 年提出了一个街道峡谷模式 SRI 用来预测峡谷内的空气质量^[40]。该模式把某一高度内的谷间视为一个箱体, 并假设污染物在垂直方向均匀分布, 拟合实测数据得到预测污染物浓度的经验公式。Nicholson^[41]开发的箱模式把峡谷内平均浓度看作是屋顶处平均上升气流的函数。基于街道峡谷内污染物质量守恒求浓度。通过输入箱下边界的风速、风向和污染物总排放, 以预测街道峡谷内污染物体积平均浓度。

Yanartino 等^[42]通过对城市街渠内流场和湍流场的描述发展了一个峡谷烟羽箱模式 (CPBM), 该模式含有箱模式和高斯型模式的特征。当峡谷内无涡流时, 假设烟羽沿峡谷方向移动, 于是对于每一个交通车道的污染物扩散, 通过对高斯烟流方程沿峡谷长度进行数值积分求污染物浓度; 当峡谷内存在涡流时, 将高斯烟羽模式的概念与因涡流致使反复循环的污染物箱模式的概念相结合便得到该模式。这个模式对 CO 的模拟好于 SRI 街道峡谷子模式 APRAC 及 MAPS 模式, 而且这个模式中没有限制模式通用性的必须针对不同街渠所取的特定参数。

Berkowicz^[43]发展了一个功能强大又易于操作的街道污染物扩散模式 OSPM。OSPM 模式认为受点的污染物浓度主要是由扩散的浓度和由于街渠内气流涡旋造成污染物循环形成的浓度构成。对于直接扩散造成的污染物浓度, 采用简单高斯烟羽模式计算, 将排放源处理成一系列垂直于风向的微小有限长线源, 污染物循环引起的浓度采用简单的箱模式。这个模式在对丹麦、挪威、荷兰、英国街渠污染物的逐时预报中都得到了满意的结果, 国内将这个模式应用于北京、澳门街渠污染物模拟也取得了良好的效果。随后 Buckland^[44]应用以前一些模式的结果发展了一套 AEOLUS 模式。

2.2 数值模式

随着计算机技术和计算技术的迅速发展, 计算流体力学 (CFD) 已从最初的简单应用发展到今天应用于解决复杂的实际工程问题。流体力学中描述流体运动的核心是 Navier-Stokes 方程, 各种数值模式都建立在该方程基础之上, 可以针对不同的研究对象做不同的简化得到各自适用的模型。在街道峡谷扩散模型中, 由于流体速度较低, 流体均被视为不可压缩的。

就湍流场而言, 城市街道峡谷内空气扩散与开阔平坦的公路也有很大不同。Depaul 等^[45]所做的一个外场试验使人们对风向垂直于街渠情况下污染物的扩散理解有了飞跃性的发展。Hotchkiss 等^[46]人用 MAC 法求解三维风速场, 将粒子法应用于污染物质的扩散模拟。日本机械学会于 70 年代初开发出 APPS 模式, 含有处理峡谷内浓度分布的 APPS-RDM 和处理道路交叉点周围浓度分布的 APPS-LDM 子模式。APPS-RDM 是计算峡谷内气流和浓度的二维差分模式, 风速场从运动量守恒方程中除去压力项后, 置换成涡度和流函数求解, 以得到的风速分布为基础进行污染物质的扩散计算。Kotake 等^[47]也曾以涡度和流函数的风速场解法处理城市市区内 NO_x 扩散预测, 建立了一个三维场模式。然而机动车的污染物排放并不是一个稳定和连续的源, 诸如交通信号的影响, 每个车道的交通流量、不同车型和大气环境对源排放的影响在这些模型中都没有加以考虑。更复杂的模式考虑了更多的影响参数, 例如环境温度、机动车速度、季节因素、行驶工况等。

Lee 等^[48]发展了一套理想的参数化方案,在该方案中,城市街渠的污染物浓度可以应用二维非定常流场从源、气象条件、街区几何形状参数化得来。将与时间相关的二维气流模式用于评价城市街道峡谷中污染物扩散特征。为了确定街道峡谷和可变气流条件下上部空气之间以及不同高宽比率(建筑物高度和街道宽度)下污染物的交换比率,研究了城市街道排放的污染物在街道峡谷内传输和扩散的过程。定义时间常数为街道峡谷平均污染物浓度下降到 e^{-1} 时需要的时间,是以峡谷横向断面面积、流量强度、雷诺数、佩克莱特准数和高宽形状比率进行参数化。为了较好地估算排放比率,时间常数可直接应用于城市空气质量模式。研究结果表明当接到的高宽比大于 2.4:1 时,街区内部会形成 2 个高低位置不同的漩涡。

1995 年 Zoumakis^[49]应用街道峡谷内和街道峡谷上面测量的空气污染物浓度,研究城市环境中机动车车辆污染物浓度的垂直廓线。由在平坦地面上的近地面水平面的源扩散得到指数率垂直浓度分布 $\exp(-\beta z^q)$,该思想被假设推广到城市街道峡谷,经验参数 β 和 q 通常取决于大气稳定性和峡谷的空气动力学特征。

Li 等^[26]发展了一套可以用于街渠峡谷的空气质量随机模式,该模式包含两部分:一个是根据街渠屋顶风速得出街谷内部流场分布的风场模式,一个是 Monte Carlo 扩散模式,但是这个模式只能用于与街渠垂直风向情况下的模拟。对于复杂街渠而言,这种气象与扩散耦合模式具有很好的发展前景。

对城市街渠峡谷污染扩散的模拟,要求解湍流扩散方程的数值解,先要知道流场分布。随着计算机技术的发展,数值分析成为处理此类问题的有效工具。由于街渠复杂的几何形状,便于处理复杂边界的有限元方法通常用来求解此类问题。描述高雷诺数流体流场通常有两种方法。一种是湍流模型和大涡模拟;另外一种是直接对 $N-S$ 方程求解速度场和压力场。对高雷诺数 $N-S$ 方程有限元求解存在很大困难,较常采用的 Galerkin 方案会导致数值解的伪震荡。近年来 Murakami 等^[50]采用 $K-\epsilon$ 模式和 LES (Large Eddy Simulation 大涡模拟) 等湍流模式,开发了用差分法求解三维风速场和浓度场的模式。Jean 等^[51]在模拟无限长的非对称街道峡谷污染物浓度分布时,根据近地层经典假设和标准 $K-\epsilon$ 两方程模型,建立了一个数值模式,研究了街道内和屋顶上大气污染物迁移和垂直方向上的交换。模式计算时考虑了能量方程,详细地分析了街道污染物的热力学特性。研究表明街道峡谷内部的温度分布对污染物的输送和扩散有着较大的影响,街道表面热源的不同会使街道内部流场结构从单一的涡旋向多个涡旋转变。同时还给出了污染物浓度分布与峡谷结构间的关系。Li 等^[52]应用大涡模拟来描述城市街渠的流场和湍流结构,并且模拟了污染物在街渠中的输送机制,发现大涡模拟结果与风洞试验的结果相吻合。

流体力学发展至今,已有多种商用软件问世,较流行的有英国 CHAM 公司的 PHOENICS,美国航空航天局主持开发的 CFX 和在城市大气污染扩散研究中运用较多的美国 Fluent 公司的 Fluent 等。Hasson 采用 PHOENICS 计算了在街道峡谷两旁建筑物等高的情况下,不同高宽比时街道内部的二维浓度场和速度场。该计算采用 $K-\epsilon$ 模型,并作了适当简化,且没有考虑能量方程,结果表明该方法具有一定的可行性。将上述软件包加以改进应用于城市街渠污染物扩散研究也具有较好的前景。

2.3 模式评价

Chan 等^[53]比较了几个简单通用的街渠空气扩散模式 APRAC 模式、广州模式、CALNE-4 模式和 PWILG 模式,研究表明这四个模式对地面极大浓度的预测相对来说都比较准确。街渠中 CO 浓度预测的准确性更大程度上取决于车辆组成的假设,而源的不确定性则对 NO_x 浓度

的预测有很大的影响。Okamoto等^[54]将Li等^[26]发展的模式与SRI模式和日本机械协会开发的APPS三维模式进行了比较,结果表明这个模式与SRI的预测水平相当,优于APPS。Kono等^[55]发展了OMG VOLUME-SOURCE模式用来估算城市街道峡谷两侧的污染物浓度,这个模式的性能在应用中优于JEA模式、TOKYO模式和EPA HWAY-2模式。

3 结论与展望

随着各国政府法规对城市工业源的限制及交通源的增加,城市污染源构成发生了很大变化。交通源已经被认为在城市空气污染中起主导作用。街道污染模式有助于深入研究机动车污染对城市空气质量的影响。APMS在空气污染消减对策中所扮演的角色要求模式在对邻近街道处污染物的预测应该尽可能的准确可靠。本文在对现有的机动车排放污染物模式进行综述的基础上,对模式的优劣性进行了比较,并着重介绍了城市街渠机动车污染扩散模型研究。综上,高斯型模式能较好的模拟开阔平坦公路上机动车排气污染物的扩散,而不适用于存在密集高层建筑物的公路。数值模拟模式可处理结构复杂的街道大气扩散,但过程十分复杂,不利于普遍推广,且梯度理论用于模拟小尺度扩散在理论上的可靠性尚需要进一步研究。经验模式方法简单,但缺乏正确的理论基础,限制了模式的普遍应用。目前机动车排气污染物扩散研究的难点和热点主要存在于解决机动车行驶引起的大气机械混合作用、机动车排热引起的大气热湍流和伴随着的浮力效应、以及建筑物导致的大气湍流对污染物扩散的影响,NO-NO_x的光化学转换研究等。

目前对机动车排气污染模式的改进方法主要有:将风洞试验与现场观测相结合,为数值模拟方法提供有效的验证手段。随着测量技术的飞速发展,一些先进的测量手段如激光技术开始逐步应用于街道峡谷内部的流场测量,成为研究城市街道峡谷机动车污染物扩散的有效手段。另外先进的计算流体力学算法,高性能计算机的发展也为数值模拟的发展提供了广阔前景。现有的机动车污染模式较少采用随机扩散模式,实际上随机扩散模式对短期实时的污染预报,特别是污染控制立法所要求的突发性污染事件的模拟具有很大的优势。近年来,随着人工智能的快速发展,基于人工神经网络(ANN)和模糊控制理论(FLT)模式的发展也为模拟街道污染物扩散开创了一条新的道路。

参考文献:

- [1] Sutton O G. A theory of eddy diffusion in the atmosphere[J]. Proc R Soc London, 1932 A135(826): 143-148
- [2] Csanady G T. Turbulent diffusion in the environment[M]. Boston: D Reidel Publication Company Dordrecht, 1973. 120-125
- [3] Espin G J. Approximate explicit solution to the general line source problem[J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(12): 1459-1463
- [4] Luhar A K, Patil R S. A general finite line source model for vehicular pollution prediction[J]. Atmospheric Environment, 1989, 23(3): 555-562
- [5] Khare M, Sham A P. Performance evaluation of general finite line source model for Delhi traffic conditions[J]. Transp Res, 1999 D4: 65-70
- [6] Zimmerman JR, Thompson R S. User's guide for HWAY, a highway air pollution model(EPA-650/4-74-008) [R]. Research Triangle Park: EPA, 1975.
- [7] Peterson W B. A Pilot Study on Dispersion Near Roadways(EPA-600/4-78-044) [R]. Research Triangle Park: EPA, 1978
- [8] Rao K S, Keenan M T. Suggestions for improvement of the EPA-HWAY model[J]. J Air Pollut Assoc, 1980, 30: 247-256
- [9] Chock D P. A simple line-source model for dispersion near roadways[J]. Atmospheric Environment, 1978, 12: 823-829
- [10] Beaton J L, Ranzieri A, J Shirley E C. Mathematical approach to estimating highway impact on air quality (Fed Highway Ad-

ministration Report No. FHWA-RD-72-36) [R]. Sacramento: California Department of Public Works, 1972.

- [11] Benson P E, Nokes W, Cramer R L. Evaluation of the CALNE-4 line source dispersion model for complex terrain application [J]. *Transp Res* 1986(1058): 7-13.
- [12] EPA. Carbon monoxide hot spot guidelines vol 4 Users Manual for Intersection Milblock Model(EPA-450/378-037) [R]. Research Triangle Park: EPA, 1978.
- [13] Hickman A J, Colwill D M. The estimation of air pollution concentrations from road traffic[C]. Transport and Road Research Laboratory Assessment Division Crowthorne Transport System Department, 1982.
- [14] Burden N C, Whitwell I, Longhurst J W S. Testing the tools of air quality management: a comparison of predictions of nitrogen dioxide concentrations by CALNE-4 and DMRB models with monitored levels at the M4/M5 interchange in Bristol UK [C] // Power H, Tirabassi T, Brebbia C A. Fifth International Conference on Air Pollution Modelling Monitoring and Management Boston: Computational Mechanics Publications, 1997: 335-346.
- [15] Danard M B. Numerical modeling of carbon monoxide concentrations near a highway [J]. *J Appl Meteor* 1972(11): 947-975.
- [16] Ragland K W, Pierce J J. Boundary layer model for air pollutant concentrations due to highway traffic [J]. *J Air Pollut Control Assoc* 1975, 25: 48-51.
- [17] Kirsch J W, Mason B F. Mathematical models for air pollution studies involving the Oregon I205 highway project (SSS-R-76-2744) [R]. La Jolla: Systems Science and Software Report, 1975.
- [18] Pitter R L. Users Manual ROADS PSMG, V IS [R]. Beaverton: Oregon Graduate Center, 1976.
- [19] Eskridge R E, Thompson R S. Experimental and theoretical study of the wake of a block-shaped vehicle in a shear-free boundary flow [J]. *Atmospheric Environment* 1982, 16: 2821-2836.
- [20] Harkonen J, Valkonen E, Kukkonen J. An operational dispersion model for predicting pollution from a road [J]. *Int J Environ Pollut* 1995, 5(5): 602-610.
- [21] McCollister G M, Wilson K R. Linear stochastic models for forecasting daily maxima and hourly concentrations of air pollutants [J]. *Atmospheric Environment* 1975, 9: 417-423.
- [22] Tiao G C, Box G E P, Hamming W J. A statistical analysis of the Los Angeles ambient carbon monoxide data 1955-1972 [J]. *J Air Pollut Control Assoc* 1975, 24: 1129-1136.
- [23] Aron R H, Aron I. Statistical forecasting models: carbon monoxide concentrations in the Los Angeles Basin [J]. *J Air Pollut Control Assoc* 1978, 28: 681-684.
- [24] Jakeman A J, Bai J M, Miles G H. Prediction of seasonal extremes of 1-h average urban CO concentrations [J]. *Atmospheric Environment* 1991, 25: 219-229.
- [25] Miles G H, Jakeman A J, Bai J A. A method of predicting the frequency distribution of air pollution from vehicle traffic; basic meteorology and historical concentrations to assist urban planning [J]. *Environ Int* 1991, 17: 575-580.
- [26] Liu J J, Chan C C, Jeng F T. Predicting personal exposure levels to carbon monoxide (CO) in Taipei based on actual CO measurements in microenvironments and a Monte Carlo simulation method [J]. *Atmospheric Environment* 1994, 28: 2361-2368.
- [27] Karim M M, Matsui H. A mathematical model of wind flow, vehicle wake, and pollution concentration in urban road microenvironments. Part I: Model description [J]. *Transp Res* 1998, D3: 81-92.
- [28] Comrie A C, Dim J E. Climatology and forecast modeling of ambient carbon monoxide in Phoenix, Arizona [J]. *Atmospheric Environment* 1999, 33: 5023-5036.
- [29] Shama P, Khare M, Chakrabarti S P. Application of extreme value theory for predicting violations of air quality standards for an urban road intersection [J]. *Transp Res* 1999, D4: 201-216.
- [30] Ramonde F M, Roland F, Vitale. Short-time fuzzy DAP predictor for air pollution due to vehicular traffic [C] // Jose R S, Brebbia C A. Measurements and Modelling in Environmental Pollution. Boston: Computational Mechanics Publications, 1997: 189-200.
- [31] Moseholm L, Silva J, Larson T. Forecasting carbon monoxide concentration near a sheltered intersection using video surveillance and neural networks [J]. *Transp Res* 1996, D1: 15-28.
- [32] Drozdowicz B, Benz S J, Santa Cruz et al. A neural network based model for the analysis of carbon monoxide contamination in the urban area of Rosario [C] // Power H, Tirabassi T, Brebbia C A. Air Pollution V. Boston: Computational Mechanics Publica-

- tions 1997: 677-684.
- [33] G amer M W, Doring S R. Neural networks modeling and prediction of hourly NO_x and NO_2 concentrations in urban London [J]. *Atmospheric Environment* 1999; 33: 709-719.
- [34] Tao Y, Ximiao Y. Fuzzy comprehensive assessment fuzzy clustering analysis and its application for urban traffic environment quality evaluation [J]. *Transp Res* 1998; D3: 51-57.
- [35] Noll K E, Miller T L, Cloggett M. A comparison of three highway line source dispersion models [J]. *Atmospheric Environment* 1978; 12: 1 323-1 329.
- [36] Sistla G, Samson P, Keenan M, et al. A study of pollutant dispersion near highways [J]. *Atmospheric Environment* 1979; 13: 669-685.
- [37] Rao S T, Sistla G, Wilson J S. An evaluation of some commonly used highway dispersion models [J]. *J Air Pollut Control Assoc* 1980; 30: 239-246.
- [38] Kono H, Ito S. A comparison of concentration estimate by the OMG-volume-source dispersion model with three line source dispersion models [J]. *Atmospheric Environment* 1990; 24: 253-260.
- [39] Okamoto S, Kobayashi K, Ouo N, et al. Comparative study on estimation methods for NO_x emissions from a roadway [J]. *Atmospheric Environment* 1990; 24: 1 535-1 544.
- [40] Johnson W B, Ludwig F L, Dabberdt W F. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide [J]. *J Air Pollut Control Assoc* 1973; 23: 490-495.
- [41] Nicholson S E. A pollutant model for street-level air [J]. *Atmospheric Environment* 1975; 9: 9-31.
- [42] Yanartino R, Wegand G. Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon [J]. *Atmospheric Environment* 1986; 20: 389-400.
- [43] Berkowicz R. Street scale models [C] // Fenger J, Hertel O, Palmgren F. *Urban Air Pollution—European Aspects*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [44] Buckland A T. Validation of a street canyon model in two cities [J]. *Environmental Monitoring and Assessment* 1998; 52: 255-267.
- [45] Depaul F T, Sheh C M. Measurements of wind velocities in a street canyon [J]. *Atmospheric Environment* 1986; 20: 455-459.
- [46] Hotchkiss R, Harlow F H. Air pollution transport in street canyons (EPA-R4-73-029, NTIS PB-233252) [R]. Los Angeles: Prepared by Los Angeles National Laboratory for US Environmental Protection Agency, 1973.
- [47] Kotake S, Sano S. Simulation model of air pollution in complex terrains including streets and buildings [J]. *Atmospheric Environment* 1980; 14: 1 001-1 009.
- [48] Lee I Y, Park H M. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons [J]. *Atmospheric Environment* 1994; 28: 2 343-2 349.
- [49] Zoumakis N M. A note on average vertical profiles of vehicular pollutant concentration in urban street canyons [J]. *Atmospheric Environment* 1995; 29(24): 3 719-3 725.
- [50] Murakami S, Mochida T. Three dimensional numerical simulation of turbulent flow around buildings using the K -turbulent model [J]. *Building & Environment* 1989; 24: 51-64.
- [51] Jean S, Mestayer P G. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons [J]. *Atmospheric Environment* 1996; 30(15): 2 659-2 677.
- [52] Liu C H, Mary C B. Large-Eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon [J]. *J Appl Meteor* 2002; 41: 660-673.
- [53] Chan L Y, Hung W T, Qin Y. Assessment of vehicular emission dispersion models applied in street canyons in Guangzhou, PRC [J]. *Environ Pollut* 1995; 11: 553-559.
- [54] Okamoto S, Lin F C, Yamada H. Evaluation of a two-dimensional numerical model for air quality simulation in a street canyon [J]. *Atmospheric Environment* 1996; 30: 3 909-3 915.
- [55] Kono H, Ito S. A micro-scale dispersion model for motor vehicle exhaust gas in urban areas: OMG-volume source model [J]. *Atmospheric Environment* 1990; 24: 243-251.

Review of Vehicular Pollution Dispersion Models of Roadway and Urban Street Canyons

PENG Jun¹, ZHANG Ming², WANG T i jian¹

(1 Department of Atmospheric Sciences Nanjing University, Nanjing 210093, China)

2 National Environment Protect Research Institute, Nanjing 210031, China)

Abstract There has been a substantial growth of road traffic over the years and consequently, of air pollution caused by the vehicular exhausts which is now considered as one of the primary source of urban air pollution. So the research of vehicular exhaust dispersions can serve the road construction, vehicle control, monitor assessment and decrease of air pollution over road. A comprehensive overview of the road vehicular pollution dispersion models is presented in this paper. The emphasis is on the progress together with the existing limitations of various models including Gaussian models, numerical models and statistical models. Then the accuracy along with the suitability in various conditions are compared. Subsequently, the review specializes at the dispersion models of urban street canyons. It points the primary difficulty of current model research existing at the simulation of the flow in urban street canyon, at the same time, introduces the progress in the simulation. At last, several crucial barriers in developing vehicular pollution dispersion models are presented, and the possible solution ways are also given.

Key words vehicular pollution; dispersion model; urban street canyon