机动车排气污染物扩散模式*

谢绍东 张远航 唐孝炎

(北京大学环境科学中心环境模拟与污染控制国家联合重点实验室, 北京 100871)

摘要 机动车排气污染物扩散模式可分为高斯型模式、经验模式、数值模拟模式和箱模式, 按此分类介绍了各种模式, 并比较了它们的优劣和指出开发新模式的难点及需要解决的问题.

关键词 机动车排气污染, 扩散模式, 污染物扩散, 街道峡谷, 公路.

Dispersion Models for Vehicle Exhaust Pollutant

Xie Shaodong Zhang Yuanhang Tang Xiaoyan

(State Key Lab of Environmental Simulation and Pollution Control, Center of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract The dispersion models for the vehicle exhaust pollutant are classified as Gaussian model, empirical model, numerical simulation model and box model. Based on these classification, the kinds of models are described and their advantage are compared. Furthermore, the difficulty in developing the new model is indicated and the key problem is discussed.

Keywords vehicle exhaust pollution, dispersion model, pollutant diffusion, street canyon, highway.

欧洲、美国和日本等国家自 60 年代末对机动车排气污染物扩散模式进行了多方面研究, 主要是研究适用于公路扩散和城市街道扩散的模式. 于 70 年代初提出了很多模式, 20 多年来又不断改进和开发新模式. 这些模式大体是以扩散微分方程的解析解为基础的烟流、烟团模式, 其次是直接求解微分方程的数值模拟模式, 还有基于观测结果的半经验模式, 模式的开发和校验通常以现场监测、野外示踪剂试验和风洞模拟试验的结果为基础. 本文对这些模式进行综述和评价, 旨在为我国目前有关研究提供参考.

1 高斯型模式

初期著名的高斯烟流模式是 Zimmermann 等人[1]开发的 HIWEY 模式、Beaton 等人[2]的 CALINE 模式, 以它们为基础又发展起来了 HIWEY-2[3,4]、CALINE-4[7]等模式, 还有 GM (General Motors)[8]、ISMAP[9]、TEXIN-2[10]和 GFLSM[11]模式等. 这些模式成为 70 年代的主流, 近年来又有新的发展.

1.1 HIWAY 模式

HIWAY 模式是美国 EPA 于 1975 年开发的第一个公路扩散模式, 1980 年 Rao 和 Petersen 等人[3,4]以 GM 和纽约实验数据为基础对 HIWAY 模式进行修改得到 HIWAY-2 模式. 该模式视公路排放为一系列有限线源, 而每一个交通车道可视为直的、连续的和具有均匀排放速率的有限线源. 然后, 将线源模拟成为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为:

$$c = \frac{q}{u}\int_0^{\infty} f\, dl \qquad (1)$$

式中, q 为线源源强; u 为风速; f 为点源扩散方程式, 可根据源高及有无混合层反射等情况选择适当的表达式. 对于直线型线源等简单的情形, 可求出连续线源浓度的解析公式, 主要用于模拟开阔高速公路下风向的污染物浓度. HIWAY 模式通过外插 PG 图估算扩散参数, 初始扩散参数 σ_{z0} 设为 1.5m; HIWAY-2 模式则以 GM 扩散实验数据估算扩散参数 σ_z.

1.2 CALINE 模式

* 中国博士后科学基金资助项目, 国家教委 "跨世纪优秀人才计划"基金资助项目
收稿日期: 1998-03-17

CALINE[2]模式在70年代提出,基于高斯扩散方程和使用混合区域的概念表示车道上污染物扩散特征: Ward 等人[5]修改 CALINE 开发出 CALINE-2 模式; Benson[6] 将道路处理成为一系列与风向垂直的短的连接线开发出 CALINE-3,改善了 CALINE-2 在稳定和平行风时预测结果偏大的缺陷: Benson[7] 又进一步修改了 CALINE-3 开发出 CALINE-4,可用于道路交叉口、停车场. CALINE 将公路划分成若干单元,每一个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.

1.3 GM 模式

Chock[8]基于 GM 实验数据提出 GM 模式,虽回避了点源假设,但应用了无限线源方法,并定义一个扩散参数,该参数是风与车道方位角和距源的距离的函数. 此外,模式还考虑了在相当稳定和微风条件下车道上烟羽的抬升. 根据下式计算污染物浓度:

$$c = \frac{q}{\sqrt{2\pi}U\sigma_z}\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_0}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

式中, q 为线源源强; U 为公路横风向有效风速与风速校正因子的和; H_0 为烟羽高度. 水平和垂直扩散对浓度分布的影响通过定义 σ_z 来体现,即:

$$\sigma_z = (A + BFX)^C \quad (3)$$

式中, X 为受体距车道中心的距离; $F = 1 + \beta|(\theta - 90)/90|^{\gamma}$, θ 为风相对于公路的角度; A、B、C、β 和 γ 是根据稳定度条件确定的经验参数. 烟羽高度 H_0 根据下式确定:

$$H_0 = \left[\frac{RG(\rho_0 - \rho)}{\alpha\rho_0 u^2}\right]^{1/2} x \quad (4)$$

式中, R 为烟羽的宽度, G 为重力加速度, ρ_0 和 ρ 分别为环境空气和烟羽的密度, α 为传输系数, u 为线源横风风速, x 为距公路的距离.

以现场监测数据对 CALINE、HIWAY、GM 等以高速公路为对象的平坦地扩散模式进行验证,多数研究表明 GM 模式的准确度最高[12].

1.4 高斯分布型的烟流·烟团方程

日本开发的高斯型模式是以通常的高斯型烟流、烟团方程为主体的扩散模式[13,14].

烟流方程:

$$c(x,y,z;H) = \frac{q}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left[\exp\left(-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (5)$$

烟团方程:

$$c(x,y,z;H) = \frac{q}{(2\pi)^{3/2}\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_y^2}\right)\left[\exp\left(-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (6)$$

烟流方程应用于有风条件的扩散计算,而烟团方程应用于无风条件的扩散计算. 于是,

①有风时($u \geq 0.4\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$):

$$c(x,y,z;H) = \sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\exp\left(-\frac{y_i^2}{2\sigma_y^2}\right)\left\{\exp\left(-\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right\} \quad (7)$$

②静风时($u < 0.4\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$):

$$c(x,y,z;H) = \sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{(2\pi)^{3/2}\alpha^2\beta}\left[\frac{1}{\frac{r_i^2}{\alpha^2} + \frac{(H-z)^2}{\beta^2}}\exp\left\{-\frac{1}{2T^2}\left(\frac{r_i^2}{\alpha^2} + \frac{(H-z)^2}{\beta^2}\right)\right\} + \frac{1}{\frac{r_i^2}{\alpha^2} + \frac{(H+z)^2}{\beta^2}}\exp\left\{\frac{1}{2T^2}\left(\frac{r_i^2}{\alpha^2} + \frac{(H+z)^2}{\beta^2}\right)\right\}\right] \quad (8)$$

综上所述,高斯型模式几乎是以高速公路为对象,特别注意车辆行驶引起的初始扩散参数,其值是根据实测数据估算,因而间接考虑了车辆行驶引起的湍流效应. 高斯型模式适用于建筑物少和建筑物低矮的道路扩散,以及适用于道路周围平坦的高速公路机动车污染物的扩散模拟,但不适用于道路两侧存在高层建筑物时污染物的扩散模拟.

2 经验模式

以美国 Johnson 等人提出的 APRAC-1A(SRI)[15] 街道峡谷模式为代表,是用经验的扩散法则求得浓度分布. Maldonado 等人[16] 开发的半经验模式 TRAPS,考虑风和扩散的幂指数规律建立模式. 日本环境厅的 JEA 模式[17] 和产业公害防止协会的均匀混合模式等属于非高斯型的模式,也是半经验模式.

2.1 SRI 模式

Johnson 等人把街道两侧存在高层建筑物的道路称为街道峡谷,以街道峡谷内现场监测数据为基础提出 SRI 模式. 其基本原理是把街谷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. 对于二维街道峡谷,当屋顶风向与街道垂直时,街谷内的气流会形成旋涡环流,街谷地面风向与建筑物屋顶风向相反,污染物被输送于相对屋顶风向的上风测,导致上风侧污染物浓度高于下风侧. SRI 峡谷模式给出:

$$c_{\mathrm{Lee}} = c_b + \frac{Kq}{(u+u_0)(x^2+z^2+L_0)} \quad (9)$$

$$c_{Luv} = c_b + \frac{Kq(H - z)}{(u + u_0)(U + 0.5)HB} \quad (10)$$

式中, c_{Lee}和 c_{Luv}分别为街道峡谷内相对屋顶风的上风侧和下风侧的污染物浓度; c_b 为峡谷上面的背景浓度; u 为屋顶风速; u_0 为最小稀释参数, 设定为 0.5(m · s^{-1}); q 为交通车道的排放强度(g · m^{-1} · s^{-1}); x 和 z 分别为受体水平和垂直方向距车道中央的距离; L_0 为污染物初始混合长度; H 和 B 分别为街道宽度和建筑物高度; K 为经验常数, Johnson 等人的值为 7. 藤谷等人监测东京都峡谷内 CO 浓度后得到 SRI 模式中参数 K 在 1.6—39 之间, 大气稳定度为弱不稳定时 K 值小. 东京都基于测定的 NO_x 数据得到 K 值为: 不稳定、中性时为 1/0.228, 稳定时为 1/0.153.

2.2 均匀混合模式

垂直方向浓度均匀方程是日本产业公害防止协会开发的模式[14], 假设在城区建筑高度以下的地层浓度在垂直方向上均匀分布, 其浓度分布方程为:

$$c(x, y, z) = \frac{q}{(2\pi)^{1/2} u\sigma_y h} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (11)$$

式中, h 为排放气体的混合区域高度, 是垂直方向扩散参数的 2.15 倍, 即在高斯分布中浓度为 1/10 处的高度. 如果以 σ_{z0}为初始扩散参数, 则 h 可以写为:

$$h = 2.15(\sigma_z + \sigma_{z0}) \quad (12)$$

在静风时, 应用烟流方程的 σ_z 替换上式中的 σ_z 来求 h.

2.3 JEA 模式

日本 EPA 开发的 JEA[17] 模式为非高斯, 是基于 Roberts 解和大阪示踪剂实验数据的半经验模式. 东京府用在东京获得的 NO_x 数据修改 JEA 模式开发出东京 JEA 模式, 可应用于高架道路和道路断面. JEA 方程是将风速和扩散系数作为高度的函数求解微分方程, 并以大阪府扩散实验数据为依据确定出扩散参数. 对于垂直风(40 ≤ θ< 90)、平行风(0 ≤ θ< 40)、静风时分别用以下各式计算.

①垂直风:

$$c(x, y, z; H) = \frac{q}{(u\sin\theta)^{1/2}} \frac{A}{X^S} \exp\left(-f_B \frac{z_p}{X}\right) W_1(x : y_1, y_2) \quad (13)$$

式中, θ为风向与线源构成的角, $(x : y_1, y_2)$ 用下式表示成有限线源效应的函数.

$$W_1(x : y_1, y_2) = \frac{1}{2}\left\{\mathrm{erf}\left(G\frac{y_2}{X^{1/2}}\right) - \mathrm{erf}\left(G\frac{y_1}{X^{1/2}}\right)\right\} \quad (14)$$

y_1、y_2 是有限线源的端点坐标, erf(x) 为误差函数, S、G、f_B 是在一定辐射输入输出量、风速和地表面粗糙度条件下由实验确定的值.

②平行风:

$$c(x, y, z; H) = \frac{q}{(u\cos\theta)^{1/2}} \frac{A}{(y^2 + G_2 z^2)^{1/2}} \cdot W_2(y : x_1, x_2) \quad (15)$$

式中, $W_2(y : x_1, x_2)$ 为有限线源效应, 即

$$W_2(y : x_1, x_2) = \mathrm{erf}\left\{\frac{G_1}{(x_1)^{1/2}}(y^2 + G_2 z^2)^{1/2}\right\} - \mathrm{erf}\left\{\frac{G_1}{(x_2)^{1/2}}(y^2 + G_2 z^2)^{1/2}\right\} \quad (16)$$

而且, x_1、x_2 为有限线源的端点坐标, A、G_1、G_2 是取决于风速、辐射输入输出量和地表面粗糙度条件的参数.

③静风时(u< 1m · s^{-1}):

$$c(x, y, z) = \frac{\pi A q}{(x^2 + Gz^2)^S} W(x : y_1, y_2) \quad (17)$$

其中,

$$W(x : y_1, y_2) = \frac{1}{\pi}\left\{\tan^{-1}\left(\frac{y_2}{(x^2 + Gz^2)^{1/2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{y_1}{(x^2 + Gz^2)^{1/2}}\right)\right\} \quad (18)$$

(17) 式中, A、G、S 是取决于辐射输入输出量的参数. 该模式应用 HIWAY 模式的扩散参数时, 初始扩散参数 σ_{z0}设为 3.0m.

3 数值模拟模式

数值模拟模式是从大气湍流流体动力学理论出发, 给出边界条件及确定湍流扩散系数 K 后用数值方法求解. 迄今已报道了几个二维和三维的数值模拟模式, 并考虑了机动车运动时形成的尾流区对污染物扩散的影响. 梯度理论的湍流扩散方程为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla cV = \nabla \cdot (K \nabla c) + E + R \quad (19)$$

如果给出假设条件便可得到扩散方程的解析解, 而数值模式是离散化这个方程, 常用差分和有限元方法进行数值求解. 数值模式的运行取决于湍流扩散参数 K 值的选取, 边界条件的设定以及数值求解方法. 街道峡谷数值模拟模式通常采用雷诺时间平均方程和 K-ϵ 方程联立构成闭合方程组求解流场, 再由 K 理论的湍流扩散方程求解浓度场.

日本机械学会于 70 年代初开发出 APPS 模式[18, 19], 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-IDM 子模式. APPS-RDM 是计算峡谷内气流和浓度的二维差分模式, 风速场从运动量守衡方程中除去压力项后, 置换成涡度和气流函数求解, 以得到的风速分布为基础进行污染物质的扩散计算. APPS-IDM 是 1 个将道路周围处理为三维的模式, 将风速主流方向成分以及垂直成分作为高度的函数给出, 用差分法进行扩散计算. 后

来,随着 NO_x 污染问题的突出,Kotake 等人[20]以涡度和气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1个三维场模式.近来对沿道 NO_x 污染问题进行了再次研究[21,22],进而再次验证了 APPS 模式[23].日本机械学会、Hotchkiss 等人[24]、杉山[25]、森口等人[26]用三维差分模式计算围绕高层建筑物道路内的浓度.日本汽车研究所[27]的 JARI-APPS 模式是 APPS-LDM 的修改版,杉山[25]开发的 JARI-APPS 是 APPS-LDM 的修改版,均为三维扩散模式.

欧美在70年代也进行了大量研究.Egan 等人[28]开发的 EGAMA 模式为二维扩散模式,计算垂直横断面的浓度分布.Hotchkiss 等人[24]用 MAC 法求解三维风速场,将粒子法应用于污染物质扩散.Danard[29]于1972年,在对数风速分布、垂直扩散参数随高度按正比例增大的条件下,用差分法求解浓度场计算了平坦道路、开挖很深的道路周围的浓度分布.1975年 Ragland[30]也报道了同样的模式.Eskridge 等人[31]开发的 ROADWAY 模式,考虑车辆行驶风引起的湍流后用差分法求解,该模式含有机动车引起的湍流和 NO_x 的化学反应.

私市和俊等人[32]于1987年和森口 一等人[26]于1988年报道了街道峡谷内的气流和扩散的数值模式,均应用湍流扩散 Navier Stokes 方程式进行数值求解气流场,并解微分方程求解扩散.私市和俊等人计算了二维街道峡谷内示踪剂扩散浓度、NO、NO_2、NO_x 等的浓度.森口 一等不仅计算了二维,还计算了三维城市街道的气流和扩散,不仅能计算道路和建筑物周围污染物的浓度分布,也能计算高架道路等在道路上加一个盖时的气流和扩散.

求解湍流方程的数值解,先要知道流场分布.上述这些数值解模式的风速场多数是作为解析解给出,然后再求解污染物的扩散,很少应用数值解求解风速场.近年来 Murakami 等人[33]采用 $K-\epsilon$ 模式和 LES(Large Eddy Simulation)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.

1996年,Sini Jean-Francois Anquetint 等人[34]为了模拟城市天空范围内小尺度大气气流,根据近地层经典假设和"标准 $K-\epsilon$ 2个方程湍流模式,建立了1个数值模式.应用这个模式在接近无限长街道峡谷的情况下,研究街道内和屋顶上大气层界面的污染物迁移和垂直方向上的交换.详细研究街道几何结构高宽比率的影响后,得到 Oke 推广改进的3种形式的气流分类,不仅考虑了建筑物对屋顶上面表面层气流的影响,而且也考虑了街道内重复循环气流的结构.街道峡谷内和行人水平面处污染物浓度的时间发展被分解为几何结构的函数,并提出了污染物剂量.街道峡谷内涡流结构的数量和分布较大地影响了垂直方向的交换速率.初步研究表明,街道表现的不均匀加热能较大地影响气流的传输和交换污染物的容量.事实上,街道表面的不均匀加热甚至能改变街道内气流结构从一种状态到另一种状态,即从一个涡流气流到几个相反循环涡流的气流.

1995年 Zoumakis N M 等人[35]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平均垂直廓线.由在平坦地面上的近地面水平面的源扩散得到指数律垂直浓度分布 $\exp(-\beta z^q)$,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度和峡谷的空气动力学特征.

Lanzani 等人[36]于1995年提出了一个新的适用于城市地形中一次污染物大气扩散的微尺度拉格朗日算法的粒子模式.当微尺度风场和湍流结构已知时,可以研究给定城市地形内的扩散.该模式是基于 Thomson 提出的非均匀湍流的拉格朗日方法描述的算法.给出了专门研究街道峡谷的模式、敏感性分析的结果和关于2个试验周期测量的首次确证试验.

Lee 等人[37]1994年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(建筑物高度与街道宽度)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.

4 箱模式

Nicholson[38]开发的箱式扩散模式,是作为峡谷内平均上升气流的函数给出,基于街道峡谷内污染物质量守衡求浓度.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.模式假设建筑物和街道上方的风速符合对数风速廓线并利用连续方程预测涡流速度,当风向平行于街道时,通过假设峡谷内风速符合指数律风速廓线预测风速.

1986年 Yamartino R J 等人[39]提出了一个街道峡谷烟羽箱模式(CPBM),该模式含有箱模式和高斯型模式的特征.当峡谷内无涡流流动时,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.另外,该模式还考虑了清洁空气的侵入和夹卷引起下风侧浓度的不均匀性,含有沿峡谷向排放速率的变化,并允许交通十字路口的出现.模式根据现场监测数据得到城市街道峡谷内气流和湍流场的简单模式,然后作为模式的输入.

5 结语

高斯型模式能较好地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.

机动车排气污染物扩散的研究,关键是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.在高斯型等模式中,通过引入初始扩散参数考虑上述影响,但定量描述这些影响还十分困难.数值模拟模式是用近地层气象资料确定风速和扩散参数,因此未考虑车辆行驶对平均风向风速和湍流的影响.

目前研究机动车排气污染物扩散模式的难点和热点主要为:道路两侧存在高层建筑物时对气体扩散的影响及城市街道峡谷内气流和湍流的数值模拟;机动车行驶引起的机械湍流模拟;城市街道峡谷内垂直方向污染物浓度分布模拟;机动车排气污染物的二次污染物模拟;即模拟光化学反应.

参 考 文 献

1 Zimmermann J R, Thompson R S. User's guide for HIWAY, A highway air pollution model, U. S. EPA, EPA-650/4-74-008, 1975

2 Beaton J L, Ranzieri A J, Shirley E C et al. Mathematical approach to estimating highway impact on air quality. California Department of Public Works, Division of Highways, FHWA-RD-72-36, 1972

3 Rao S T, Keenan M T. Suggestion for improvement the EPA-HIWAY model. J. Air Poll. Control Assoc., 1980, **30**: 247—256

4 Petersen W B. User's guide for HIWAY-2, A highway air pollution model. U. S. EPA, EPA-600/8-80-018, 1980

5 Ward J C E, Ranzieri A J, Shirley E C. CALINE-2-An improved micro-scale model for the dispersion of air pollutants from a line source. California Department of Transportation, FHWARD-77-74, 1977

6 Benson P E. CALINE-3 Vessatile dispersion model for predicting air pollutant levels near highway and arterial streets. California Department of Transportation. FHWA-CA-TL-79-23, 1979

7 Benson P E. CALINE4-A dispersion model for predicting air pollutant concentrations near roadways. California Department of Transportation. FHWA-CA-TL-84/15, 1984

8 Chock D P. A simple line-source model for dispersion near roadways. Atmospheric Environment, 1979, **12**: 823—829

9 Dabberdt W F, Sandys R C, Buder P A. ISMAP-A Traffic/Emission/Dispersion model for indirect sources. 68th annual meeting Air Poll. Control Assoc., 1975: 75—44

10 Hlavinka M W, Korpics J J, Bullin J A. TEXIN-2: A Versatile model for predicting carbon monoxide concentrations near intersection. J. Air Poll. Control Assoc., 1987, **37**: 819—822

11 Luhar A K, Patil R S. A general finite line source model for vehicular pollution prediction. Atmospheric Environment, 1989, **23**: 555—562

12 Sistla G, Samson P, Keenan M et al. A study of pollutant dispersion near highways. Atmospheric Environment, 1979, **13**: 669—685

13 冈本真一, 小林惠三, 北林舆二. 自动车排出ガス扩散モデルの比较评价. 公害, 1985, **20**(5): 269—285

14 北林舆二. 道路沿道におけゐ大气扩散の实测及びシミユレ——シヨンモデル. 公害, 1990, **25**(**1**): 1—23

15 Johnson W B, Ludwig F L, Dabberdt W F et al. An urban diffusion simulation model for carbon monoxide. J. Air Poll. control Assoc., 1973, **23**: 490—498

16 Maldonado C, Bullin J A. Modeling carbon monoxide dispersion from roadways. Environment Science Technology, 1977, **11**: 1071—1076

17 环境厅大气保全局. 窒素酸化物总量规制マニユアル, 公害研究对策センター, 1982

18 自动车排出ガスによゐ大气污染にかんすゐ研究分科会, 自动车排出ガスによゐ大气污染にかんすゐ研究の中间报告. 日本机械学会会, 1970, **73**: 1597—1601

19 自动车排出ガスによゐ大气污染にかんすゐ研究分科

会,自动车排出ガスによぬ大气污染にかんすぬ分科会报告.日本机械学会会 ,1972,**75**:274—281

20 Kotake S and Sano S. Simulation model of Air Pollution in Coplex Terrains Including Streets and Buildings. Atmospheric Environment, 1980: **15**: 1001—1009

21 山田浩明,林复基,盐泽清茂等.都市部道路におけぬ自动车排出扩散ガスシミユレ—シヨンモデルの构造.第32回大气污染学会讲演要旨集.1991:434

22 林复基,山田浩明,盐泽清茂等.都市部道路におけぬ自动车排出扩散ガスシミユレ—シヨンモデルの开发.第34回大气污染学会讲演要旨集.1993:384

23 林复基,山田浩明,盐泽清茂等.都市部道路におけぬ扩散ガスシミユレ—シヨンモデル(APPSモデル)の检证.第32回大气污染学会讲演要旨集.1991:435

24 Hotchkiss R S et al. Air pollution transport in street canyons. U.S.EPA,EPA-R4-73-029,1973

25 杉山博海.风速の影响を考虑した交叉点付近の自动车排出ガスの扩散モデル.日本自动车研究所速报,1973:14

26 森口 一,上原清,内藤正明.沿道大气污染の预测手法(Ⅲ)数值计算と风洞 验によぬ道路沿道构造の影响评价—.第30回大气污染学会讲演要旨集.1989:274

27 (财)日本自动车研究所,大气污染解析研究委员会.自动车排出ガスによぬ大气污染の 态调查よ污染预测の研究.日本自动车研究所速报,1972:9

28 Egan B A, Lavery T F. Application of a numerical simulation model to the dispersion of vehicular emissions near highways. Proc. Int. Third Clean Air Cong., 1973. IU APPA,B7-B9

29 Danard M B. Numerical Modeling of Carbon Monoxide Concentration Near a Highway. Journal of Applied Meteorology, 1972, **11**: 947—957

30 Ragland K W, Pierce J J. Boundary layer model for air pollutant concentration due to highway traffice. J. Air Poll. control Assoc., 1975, **25**: 48—51

31 Eskridge R E, Rao S T. Turbulent diffusion behind vehicles: experimentally determined turbulence mixing parameters. Atmospheric Environment, 1986, **20**: 851—860

32 私市和俊,中西干郎.沿道における二酸化窒素生成モデムルについて.第27回大气污染学会讲演要旨集.

33 Murakami S and Mochida. Three dimensional numerical simulation of turbulent flow around buildings using the K-ϵ turbulent model. Building & Environment, 1989, **24**: 51—64

34 Sini Jean-francois Anquetint S and Mestayer P G. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. Atmospheric Environment, 1996, **30**(15): 2659—2677

35 Zoumakis N M. A note on average vertical profiles of vehicular pollutant concentration in urban street canyons. Atmospheric Environment, 1995, **29**(24): 3719—3725

36 Lanzani G and Tamponit M. A micro-scale lagrangian particle model for the dispersion of primary pollution in a street canyon sensivity analysis and first validation trials. Atmospheric Environment, 1995, **29**(23): 3465—3475

37 Lee I Y and Park H M. Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons. Atmospheric Environment, 1994, **28**(14): 2343—2349

38 Nicholson S E. A pollution model for street-level air. Atmospheric Environment, 1975, **9**: 19—31

39 Yamartino R J and Wiegand G. Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within an urban street canyon. Atmospheric Environment, 1986, **20**(11): 2137—2156