

黄江平, 王喜全, 王自发. 2012. 城市环境对重气扩散的影响及其验证 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 274-280, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10095. Huang Jiangping, Wang Xiquan, Wang Zifa. 2012. The effect of urban condition on denser-than-air gas dispersion and its validation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 274-280.

城市环境对重气扩散的影响及其验证

黄江平^{1,2,3} 王喜全¹ 王自发¹

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100083

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 航空气象研究所, 北京 100085

摘要 开发了适合城市环境下的应急重气扩散模型——SLAB_URBAN模型, 该模型能够对城市环境下重气的传输扩散过程进行模拟。模型的原理基于重气扩散浅层理论, 采用了新的城市边界层和扩散参数的参数化方案。该方案考虑了城市冠层内特有的风和湍流扩散的特征, 能够体现城市边界层和湍流对重气扩散的影响。对美国盐湖城 Urban 2000 的城市扩散试验进行模拟, 主要验证下风方向观测弧所观测到的气体最大小时平均浓度与源释放速率的比值。结果表明, 模型能够比较好地模拟出下风方向上浓度的分布特征。另外, 与国外同类城市扩散模型的比较来看, SLAB_URBAN模型的模拟能力居于前列。

关键词 重气扩散模型 模拟验证 应急模型 城市气象

文章编号 1006-9585 (2012) 03-0274-07 **中图分类号** X928 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10095

The Effect of Urban Condition on Denser-than-Air Gas Dispersion and Its Validation

HUANG Jiangping^{1,2,3}, WANG Xiquan¹, and WANG Zifa¹

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Institute of Aviation Meteorology, Beijing 100085

Abstract To simulate the urban dispersion of denser-than-air gases, an urban denser-than-air dispersion model known as SLAB_URBAN model was developed. The model is based on the shallow layer theory. A new urban boundary and dispersion coefficients parameterization representing the urban wind and turbulence features is applied to the model. Tests were performed during the field campaign Urban 2000 which was held in October 2000 in Salt Lake City. The tracer data sets are adopted to demonstrate the SLAB_URBAN model performance. The focus of the comparisons is on the maximum concentration, on a given monitoring arc, normalized by the emission rate. At Urban 2000, for all samples and release times, the predictions of the SLAB_URBAN model are shown to agree with observations. Furthermore, SLAB_URBAN model is evaluated by comparison with other urban dispersion models.

收稿日期 2010-07-26 收到, 2012-01-18 收到修定稿

资助项目 国家高技术研究发展计划项目《重点城市群大气复合污染物综合防治技术集成示范》

作者简介 黄江平, 男, 1979 年出生, 博士, 主要从事城市空气污染预警和预报研究。E-mail: hjptfq@126.com

The SLAB_URBAN model predictions are shown to perform well in all urban dispersion models.

Key words denser-than-air dispersion model, modeling evaluation, emergency responding model, urban meteorology

1 引言

在城市化与工业化不断发展的同时,近年来突发性大气污染事件时有发生,已成为当前社会普遍关注的环境安全问题。事故发生后,轻则会造成较大的经济损失,重则可能会造成人民生命与财产的重大损失,并且会对人们赖以生存的生态环境造成难以估量的损害。因此研究应急大气扩散模型,特别是适用于城市环境的大气扩散模型,对当前社会有重大的意义。

近年来城市化的进展速度正在加快,由于城市化作用使城市的空气动力学参数发生变化,包括粗糙长度的增加和零平面位移的增加(殷达中和洪钟详,1999)。城市复杂下垫面的存在,城市的大气扩散过程表现出异于郊区的特点。由于城市冠层和城市摩擦副层的存在,使城市边界层形成特殊的风场结构和湍流特征,直接对污染物的传输和扩散产生影响。本文发展的城市重气扩散模型 SLAB_URBAN,是在前期工作的基础上进一步开发的(黄江平等,2010)。模型结合近年来城市微气象的研究成果,运用了新的城市边界层和扩散参数化方案,模型中除了考虑城市中特有的风场特征还考虑到了由于城市密集建筑物的影响产生的湍流特征,这两个特征对危险气体在城市中的扩散过程有重要的作用。利用该模型对美国盐湖城 Urban 2000(以下简称 Urban 2000)大型外场试验(Allwine et al., 2002)进行模拟验证,主要关注运用新的参数化方案对污染物扩散模拟能力的提高。此外,为了验证 SLAB_URBAN 模型同其他城市扩散模型模拟能力的差异,本文也将其它城市扩散模型在 Urban 2000 试验的模拟结果同 SLAB_URBAN 的模拟结果进行了比较。

2 模型理论基础

SLAB_URBAN 模型由重气浅层模型发展而来,重气浅层模型是基于浅层理论(浅水近似)

而得到的。浅水近似在海洋学和气象领域有着悠久的历史,对于重气扩散也可近似适用,在许多研究中采用该方法模拟重气云扩散过程(Ermak, 1997)。其依据是气云侧风方向的尺寸比高度方向尺寸要大得多。Hankin and Britter (1994)假定任意点处重气的层高为 h , x 方向速度为 u , y 方向速度为 v , 密度为 ρ , 空气的密度为 ρ_a , 不可压缩流体的二维浅层扩散方程通式为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = E - D, \quad (1)$$

其中, t 表示时间, U 、 F 、 E 、 G 、 D 分别表示方程通式中的第 1~5 项,

$$\begin{aligned} U &= \begin{cases} h, \\ h \rho, \\ h \rho u, \\ h \rho v, \end{cases} \\ F &= \begin{cases} h u, \\ h \rho u, \\ h \rho u^2 + \frac{1}{2} g (\rho - \rho_a) h^2, \\ h \rho u v, \end{cases} \\ E &= \begin{cases} u_{\text{ent}}, \\ u_{\text{ent}} \rho_a, \\ u_{\text{ent}} u_a \rho_a, \\ u_{\text{ent}} v_a \rho_a \end{cases} \\ G &= \begin{cases} h v, \\ h \rho v, \\ h \rho u v, \\ h \rho v^2 + \frac{1}{2} g (\rho - \rho_a) h^2, \end{cases} \\ D &= \begin{cases} 0, \\ 0, \\ c_f \frac{1}{2} \rho u |u|, \\ c_f \frac{1}{2} \rho v |v|. \end{cases} \end{aligned}$$

将 U 、 F 、 E 、 G 、 D 分别代入方程通式即成为一个包含体积守恒方程、连续性方程、 x 方向动量方程、 y 方向动量方程 4 个方程的方程组。夹卷

速率

$$u_{\text{ent}} = u_e + u_t,$$

u_e 和 u_t 分别为四周空气的夹卷速率和顶部空气的夹卷速率, 曳力系数

$$c_f = \tau / 0.5\rho |u_1|^2$$

一般为雷诺数的弱函数, τ 为应力, u_1 为流体速度。

3 城市边界层和扩散参数化

城市边界层通常分为 4 个次层, 分别为城市冠层、摩擦副层、惯性副层和混合层。在城市冠层内, 平均风速和湍流均直接受到城市建筑物和街渠的影响, 无论是平均风速廓线还是湍流扩散系数都同郊区有着很大的差异。城市冠层以上, 有研究表明由于并不直接受到城市建筑物的影响, 传统的对数风速廓线和湍流扩散系数在城市冠层以上仍然基本适用 (Hanna and Britter, 2002)。因此本文所采用新的城市边界层和扩散的参数化方案主要考虑到城市冠层以下和城市冠层以上的差异。

3.1 城市平均风速廓线

本文利用城市形态学参数化的方法来推算城市冠层内的平均风速廓线。采用的是 Bentham and Britter (2003) 提出在城市冠层内风速 u_c 的计算公式

$$u_c = u^* (2/\lambda_f)^{1/2}, \quad (2)$$

其中, u^* 为摩擦速度; λ_f 为城市形态学参数, 表示在一定范围内 ($>1 \text{ km}^2$) 城市建筑物的迎风面的截面积与建筑物占据总面积之比。公式 (2) 用于计算城市地面到城市冠层高度 z_c 之间的风速。

Hanna et al. (2003) 认为在城市中由于强的机械湍流的作用, 往往处于近似中性的稳定条件, 于是在高于 z_c 的风速对数廓线计算公式为

$$u = (u^* / 0.4) \ln[(z - d)/z_0], \quad (3)$$

其中, z 为高度, z_0 为表面粗糙长度, d 为零平面位移。通过公式 (2) 和公式 (3) 可以求解出

$$z_c = z_0 \exp[0.4(2/\lambda_f)^{1/2}] + d. \quad (4)$$

在 $z > z_c$ 时, 可利用公式 (2) 来计算中性条件下的风速。

公式 (2) 中对于 u^* 的计算, Hanna et al. (2003) 认为采用测量高度大于 H_b 、而小于 $2H_b$ (H_b 代表建筑物的平均高度) 的风速通过公式

(3) 来计算, 这样通过确定 λ_f 就可以将城市冠层以下风速廓线计算出来。Hanna and Britter (2002) 指出在建筑物密集的城市中 $\lambda_f > 0.3$, 这时粗糙度计算公式为 $z_0 = 0.15H_b$, 零平面位移的计算公式为 $d = 0.5H_b$ 。这样通过确定 z_0 , d 就可以通过公式 (3) 将城市冠层以上的风速廓线计算出来。

3.2 城市扩散系数

Urban 2000 试验的情景为持续排放, 即在整个试验过程的各序列的释放速率恒定。SLAB — URBAN 模型采用的是浅层模型烟羽扩散的三维体积浓度的计算公式 (Ermak, 1997):

$$C(x, y, z) = 2BhC(x)C_1(y, b, \beta)C_2(z, Z_c, \sigma), \quad (5)$$

其中, B 和 h 为污染云宽度的 1/2 以及高度,

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{y+b}{\sqrt{2}\beta} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{y-b}{\sqrt{2}\beta} \right) \right],$$

$$C_2(z, Z_c, \sigma) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{\sigma} \left\{ \exp \left[-\frac{(z-Z_c)^2}{2\sigma^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z+Z_c)^2}{2\sigma^2} \right] \right\},$$

其中, erf 为概率分布函数, $\exp$ 为指数函数; $C(x)$ 为横风体积浓度, $C_1(y, b, \beta)$ 为浓度水平廓线函数; $C_2(z, Z_c, \sigma)$ 为浓度垂直廓线函数; b 和 β 为宽度参数。

计算 $C_1(y, b, \beta)$ 和 $C_2(z, Z_c, \sigma)$ 分别需要计算水平浓度分布标准偏差和垂直浓度分布标准偏差 (也称扩散参数) σ_y 和 σ_z , 其值为下风向距离 x 和稳定度类型的函数, 该值是通过一系列外场试验所得到的。对 σ_y 和 σ_z 进行城市化的改造, 使其能考虑到城市中由于街渠建筑物造成的源区域的强烈的初始混合以及适用于计算城市中污染云的浓度分布状况。

Hanna and Britter (2002) 指出了污染源释放的高度在城市冠层内的扩散参数方法,

$$\frac{\sigma_y}{H_b} = \sqrt{2} \frac{\sigma_v}{u_c} \left(\frac{x}{H_b} \right)^{1/2}, \quad z < H_b \quad (6)$$

其中 σ_v 为水平横风方向上的湍流速率; u_c 为平均风速。从大量的外场试验以及风洞试验的结果可以得出

$$\frac{\sigma_v}{u^*} = 1.4.$$

此外根据冠层内风速计算公式 (2) 可以推出

$$\frac{\sigma_y}{H_b} = \sqrt{2} \times 1.4 \left(\frac{\lambda_f}{2} \right)^{1/2} \left(\frac{x}{H_b} \right)^{1/2}, \quad z < H_b \quad (7)$$

此外, Hanna and Britter (2002) 也提出低于 H_b 的 σ_z 的计算公式为

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = A \frac{\sigma_w}{u_c}, \quad z < H_b \quad (8)$$

其中, A 为常数, σ_w 为垂直方向上的湍流速率, $\sigma_w/u^* = 1.1$; 加上冠层内风速计算公式 (2) 可以推出

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = 1.1A \left(\frac{\lambda_f}{2} \right)^{1/2}, \quad z < H_b \quad (9)$$

由公式 (7) 和 (9) 可以看出, 对于低于 H_b 的 σ_y 和 σ_z 都考虑到了 λ_f 。

对于在污染云高于 H_b 即高于城市冠层的湍流扩散系数 σ_y 和 σ_z 均采用原先 SLAB_URBAN 模型中所使用计算公式 (Ermak, 1997)。

4 Urban 2000 外场试验简介

Urban 2000 外场试验于 2000 年 9~10 月在美国犹他州的盐湖城进行, 该试验隶属于美国能源部的国家生化安全计划项目。Allwine et al. (2002) 对该试验的观测站点的分布和观测地点的地形进行了详细的描述, Hanna et al. (2003) 对该试验的城市微气象观测和 SF_6 气体扩散观测试验的数据进行了详细的分析。扩散试验均在夜间进行, 释放的示踪气体为 SF_6 气体, 释放的位置在一座高大的建筑物旁边 (离地面大约 1.5 m)。外围 3 个观测弧的位置, 分别为离释放源 2 km、4 km 和 6 km; 4 个内部的观测弧的位置分别距离释放源 156 m、394 m、675 m, 由于距离源最近的观测弧为 156 m, 这个距离已经超过一个街区的范围, 污染物浓度已经不是受单一建筑物的影响, 而是由许多建筑物组成的一个区域的影响了。SLAB_URBAN 模型中考虑到正是这种区域对污染物扩散的情况, 而不是考虑到单个建筑物对污染物扩散的影响。此外, Urban 2000 试验也包括了城市微气象观测, 得到的数据表明整个试验期间风速较小, 大约为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

5 模拟结果及其比较分析

5.1 输入参数

SLAB_URBAN 模型采用了新的参数化方案,

针对风廓线和湍流扩散系数的计算需要输入的量有 z_0 、 d 、 H_b 和 λ_f 。针对 Urban 2000 的模拟, Hanna and Britter (2002) 认为盐湖城的 λ_f 为 0.3、 H_b 为 15 m、 $z_0 = 0.15H_b = 2.25 \text{ m}$ 、 $d = 0.5H_b = 7.5 \text{ m}$, 此外可以通过测量高度大于 H_b 、而小于 $2H_b$ 的站点的风速作为输入变量, 通过公式 (3) 来计算 u^* 。因此本文采用 Urban 2000 试验中的气象观测站点 M_{08} (M_{08} 的测风高度为 23 m, 符合要求) 的风速数据来计算 u^* 。于是利用公式 (2) 和公式 (3) 就可以计算出城市中的平均风速廓线和城市湍流扩散系数。此外, 模拟所需要其他关于 Urban 2000 试验的气象数据和源的释放数据均由 Allwine et al. (2002)、Hanna and Britter (2002) 中公布的数据获得, 以加密观测期 02 次 (Intensive Operating Period 02, IOP02) 试验序列的输入参数为例 (如表 1), 其他试验序列根据具体的情况略有不同。SLAB_URBAN 模型的输入参数基本同上。

表 1 IOP02 试验输入参数

Table 1 The input parameters in Expt IOP02

参数	参数设置
释放物质	SF_6
熔点温度/K	210
源面积/ m^2	0.0004
浓度的平均时间/s	3600
稳定度类型	4
释放类型	垂直喷射
源物质温度/K	298.15
源持续时间/s	3600
下风方向距离/m	6000
摩尔质量/ $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	0.14605
源的排放速率/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.001
风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.28

5.2 模拟结果分析

从图 1 中可以看出 SLAB_URBAN 模拟与观测的 $C_{\max}/Q$ 值有着更好的一致性, 其中 $C_{\max}$ 为下风方向不同观测距离的气体观测的最大小时平均浓度, Q 为源释放速率。

由于 SLAB_URBAN 模型在扩散部分计算过程中运用了新的参数化方案, 该方案中重点考虑

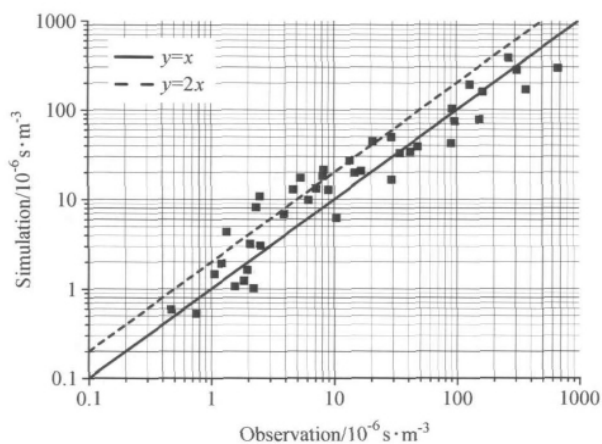


图1 Urban 2000 试验 7 列示踪气体观测弧的观测值和 SLAB _URBAN 模型模拟小时平均 $C_{\max}/Q$ 值散点图 (实线为模拟值等于观测值, 虚线代表模拟值等于 2 倍观测值)

Fig 1 The scatter plot of Urban 2000 observed versus predicted hourly averaged $C_{\max}/Q$ by SLAB _URBAN model for seven monitoring arcs (the solid line indicate the one-to-one relationship and the dashed line denote a factor of plus two agreement)

到了城市冠层内和冠层以上风和湍流扩散的差异, 这部分的差异最终使模拟值更加接近观测值。

5.3 模拟误差分析

模式的模拟结果与观测的统计误差分析采用 BOOT 统计模型误差分析方法 (Chang and Hanna, 2004), 该误差分析方法已经被广泛应用于大气扩散模型的评价中。该方法的误差分析包括 F_B (平均分数偏差)、 M_G (几何平均偏差)、 V_G (几何平均方差)、 N_{MSE} (归一化均方)、 F_{AC2} (模拟值与实测值之比在 0.5~2 倍之间的模拟值占总模拟值的比值) 等统计误差, 各误差的表达式分别如下 (假设 $X=C/Q$):

$$F_B = 2 (\overline{X_o} - \overline{X_p}) / (\overline{X_o} + \overline{X_p}),$$

$$M_G = \exp(\overline{\ln X_o} - \overline{\ln X_p}),$$

$$V_G = \exp[\overline{(\ln X_o - \ln X_p)^2}],$$

$$N_{MSE} = (\overline{X_p} - \overline{X_o})^2 / (\overline{X_p} \times \overline{X_o}).$$

其中下标 p 和 o 分别代表模拟值和观测值。观测与模拟的误差的理想值为 $F_B = 0$ 、 $M_G = 1$ 、 $V_G = 1$ 、 $N_{MSE} = 0$ 、 $F_{AC2} = 1$ 。Chang and Hanna (2004) 分析了大量的扩散模型的结果与观测结果的对比, 得出扩散模型模拟结果可接受的误差范围。一个可接受的或模拟好的模型的 F_B 应该在 -0.67~0.67 的范围, N_{MSE} 应该小于 4, F_{AC2} 应当大于 0.5

且小于 1。

5.4 与国外城市扩散模型对比

Hanna et al. (2004) 利用了 6 个城市扩散模型对 Urban 2000 试验进行了模拟验证。这 6 个模型分别是 AERMOD 模型、Baseline Urban Dispersion Model 模型、BLM 模型、HPAC 模型、SUDC 模型、UDM 模型。本文将 SLAB _URBAN 模型的模拟结果进行统计误差计算与以上 6 个城市扩散模型的统计误差结果进行了比较。从表 2 中可以看出: SLAB _URBAN 模型的 F_B 为 0.19、 N_{MSE} 为 1.47、 F_{AC2} 为 0.57, 均在 Chang and Hanna (2004) 推荐的标准范围。此外还可以看出, AERMOD 模型的 F_B 和 N_{MSE} 超过了推荐值的范围, AERMOD 模型、HPAC 模型和 UDM 模型的 F_{AC2} 不在推荐值的范围。只剩下 Baseline 模型、SUDC 模型和 BLM 模型在推荐值范围内。

表 2 各模型模拟的误差值比较

Table 2 Statistical errors of the simulation results by the models

模型	F_B	M_G	V_G	N_{MSE}	F_{AC2}
SLAB _URBAN	0.190	0.83	1.50	1.47	0.570
Baseline	0.373	1.22	1.55	1.90	0.720
HPAC	-0.226	0.54	2.94	1.32	0.477
UDM	0.414	3.15	17.60	1.76	0.346
AERMOD	0.684	3.25	9.73	4.87	0.234
SUDC	-0.090	1.46	2.40	1.48	0.542
BLM	-0.054	0.93	1.70	2.50	0.710

此外, 还应当分析 M_G 和 V_G , 通常据 M_G 为横坐标、 V_G 为纵坐标画图, 以各模型在图中的位置来评价扩散模型对于外场试验模拟的可靠性。图 2 表示的是 Baseline 模型、SUDC 模型、BLM 模型和 SLAB _URBAN 模型对 Urban 2000 外场试验的统计误差的 M_G - V_G 图, 其中的理想位置是 (1, 1) 点, 表示模拟和观测结果最符合的情况。如果模拟在图中的位置越接近这一点, 那么就表明模拟的结果越可靠。Chang and Hanna (2004) 认为模型的位置在左边虚线的位置之间表示模拟值是观测值的 2 倍, 在右虚线的位置表示模拟值是观测值的 0.5 倍, 模拟的结果如果在这两条线的范围之间均是是可以接受的。从图 2 中可以看出 4 个模型都在虚线的范围之内, 表示这 4 个模型的结

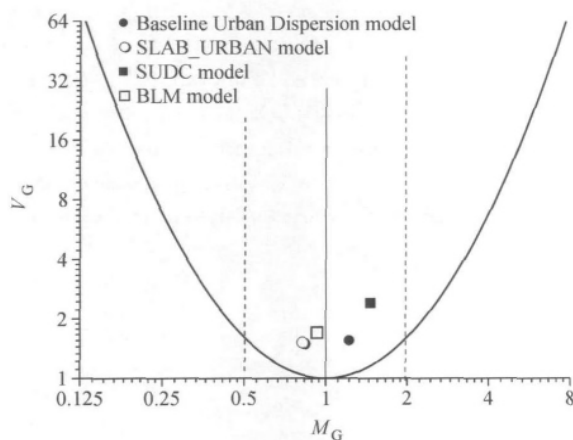


图2 各模型对 Urban 2000 试验模拟的几何平均偏差 (M_G) 和几何平均方差 (V_G) 图 (曲线表示 M_G 值对应的最小 V_G 值, 虚线表示模拟与观测值上下两倍区间线)

Fig. 2 Geometric mean bias (M_G) versus Geometric variance (V_G) for Urban 2000 data sets by the models (the parabola indicates the minimum V_G for a value of M_G and the dashed lines represent a factor of two agreements between mean predictions and observations)

果是可以接受的。SLAB_URBAN 模型以及 BLM 模型其位置在左虚线与实线之间, 表示模拟的结果要高于观测结果。而 Baseline 模型、SUDC 模型模拟的结果要低于观测结果, 其原因可能在于这两个模型都非重气扩散模型, 没有考虑到重气效应的影响。从总体效果上看, SLAB_URBAN 和 Baseline 模型的模拟结果更加接近 (1, 1) 点, 而 SLAB_URBAN 模拟的结果要高于观测结果, 从实际工作的角度上看模拟值要略高于观测值更加满足安全方面考虑的要求, 所以 SLAB_URBAN 模型能够适用于实际应急响应工作的需要。

6 结论

本文研制开发了适合城市环境下的应急重气扩散模型 SLAB_URBAN 模型, 该模型能够模拟城市环境下重气的传输扩散过程。模型中考虑了城市冠层内特有的风和湍流扩散的特征, 能够体现城市边界层对重气扩散的影响。通过对 SLAB_URBAN 模型模拟的 Urban 2000 试验的 $C_{\max}$ 与源的释放速率 Q 进行归一化处理后的结果 $C_{\max}/Q$ 与实际观测数据的 $C_{\max}/Q$ 进行对比验证。结果表明, SLAB_URBAN 模型的模拟与观测的 $C_{\max}/Q$

值有着很好的一致性。从误差统计的结果得出应用了城市风和湍流的参数化方案的 SLAB_URBAN 模型适用于城市重气扩散的模拟。

此外, 针对 SLAB_URBAN 模型其他 6 种城市扩散模型在 Urban 2000 试验的模拟结果的误差统计表明 SLAB_URBAN 模型模拟的结果要优于除 Baseline 模型以外其他模型的模拟结果, 但是从实际工作的角度上对安全方面的考虑, SLAB_URBAN 模型比 Baseline 模型更加适合于城市应急反应的要求。

但是模型目前还存在一些问题: 第一, 模型目前只是处于研究阶段, 离具体应用还有一定的差距。第二, 对于目前的参数化方案中的城市形态学参数的获取, 需要采用城市的数字遥感图像利用数字图像处理等的技术手段来得到, 但是目前我国这方面的数据相对成本较高。第三, 模型的进一步验证还需要进行更多的城市扩散试验, 目前我国在这方面由于受各种原因的制约, 这方面的研究相对比较落后。下一步的工作主要是针对以上问题进一步对城市重气扩散模型进行深入的研究。

参考文献 (References)

- Allwine K J, Shinn J H, Streit G E, et al. 2002. Overview of URBAN 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83 (4): 521-536.
- Bentham T, Britter R E. 2003. Spatially averaged flow within obstacle arrays [J]. Atmos. Environ., 37 (15): 2037-2043.
- Chang J C, Hanna S R. 2004. Air quality model performance evaluation [J]. Meteor. Atmos. Phys., 87 (1-3): 167-196.
- Ermak D L. 1997. User's manual for SLAB: An atmospheric dispersion model for denser-than-air releases [R]. USA: Lakes Environmental, 144pp.
- Hankin R K, Britter R E. 1994. The shallow water approximations in dense gas dispersion over complex terrain [M] // Flow and Dispersion over Topography. UK: Oxford University Press, 223-245.
- Hanna S R, Britter R E. 2002. Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial and Urban Sites [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons, Inc., 208pp.
- Hanna S R, Britter R E, Franzese P. 2003. A baseline urban dispersion model evaluated with Salt Lake City and Los Angeles tracer data [J]. Atmos. Environ., 37 (36): 5069-5082.

- Hanna S, Fabian P, Chang J, et al. 2004. Use of Urban 2000 field data to determine whether there are significant differences between the performance measures of several urban dispersion models [C]. In: 5th Conference on the Urban Environment, Vancouver, Canada: 23-26.
- 黄江平, 王喜全, 王自发, 等. 2010. 城市重气扩散模型 SLAB _URBAN 外场试验模拟验证 [J]. 安全与环境学报, 10 (5): 181-184. Huang Jiangping, Wang Xiquan, Wang Zifa, et al. 2010. Field test simulation verification of an SLAB _URBAN dispersion model of the denser-than-air gas [J]. Journal of Safety and Environment (in Chinese), 10 (5): 181-184.
- 殷达中, 洪钟详. 1999. 北京地区严重污染状况下的大气边界层结构与参数研究 [J]. 气候与环境研究, 4 (3): 303-307. Yin Dazhong, Hong Zhongxiang. 1999. Study on the boundary layer structure and parameters under heavy pollution conditions in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (3): 303-307.