

室外空气污染对室内空气质量的影响研究

谢海英¹, 陈康民^{2*}

1. 上海理工大学 城建学院, 上海 200093

2. 上海理工大学 动力学院, 上海 200093

摘要: 利用数值模拟方法, 研究了单个建筑物外存在点污染源时室外空气污染对室内空气质量的影响。首先利用点污染源时单个建筑物周围污染物扩散的风洞实验验证了计算模型和方法的正确性, 再利用自然通风的风洞实验, 计算了不同污染源位置和建筑物进风口时的室内外速度场和污染物浓度场。结果表明: 速度场的计算结果与风洞实验结果基本吻合, 无量纲通风量的计算值略小于实验值; 建筑物迎风面回流区上方的气流进入室内; 当点污染源位于建筑物前的距离和建筑物高度之比约等于 1 时, 污染源在地面处的室内污染物浓度要小于源在建筑物高度一半处的; 建筑物进风口的挡风板对室内污染物浓度的影响不大; 根据壁面上污染物浓度的分布来改变进风口位置, 是减少室内空气受室外污染影响的有效方法。

关键词: 室外空气污染; 室内空气质量; 自然通风; 流场; 浓度场

中图分类号: X169 文献标识码: A 文章编号: 1001-6929(2008)02-0073-06

Study of Outdoor Air Pollution Impact on the Indoor Air Quality

XIE Hai-ying¹, CHEN Kang-min²

1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2. College of Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: The impact of outdoor air pollution on the indoor air quality by the way of numerical simulation was studied. Firstly the simulation models and methods were proved by using the wind tunnel test of point source air pollution diffusion around an isolated building, and then the outdoor and indoor concentration fields were simulated with different source positions and inlet conditions, whose velocity fields were verified well by the wind tunnel test for the natural ventilation. The results showed that dimensionless ventilation rates were a little smaller than the test and the building inlet flows were from the upper zone of the backflow in front of the building. The indoor concentration was lower with the source on the ground than the source as high as one half of the building height. The windbreak panel had little effect on decreasing the indoor concentration, while adopting the low concentration inlet was more effective for the different pollution distribution on the building walls.

Key words: outdoor air pollution; indoor air quality; natural ventilation; flow field; concentration field

由于机械通风的高能耗, 人们在室外空气温度适宜时, 选择自然通风方式来改善室内空气质量; 但是近年来机动车尾气已对城市空气质量造成较大的影响, 在建筑外空气处于高浓度污染时, 通风的作用可能不是稀释室内空气污染, 而是恶化室内空气品质。室外空气污染在街区尺度下的扩散规律已有不少理论研究^[1-5], 结果表明, 屋顶形状、建筑物分布和气象等因素都会造成建筑物周围污染物浓度的集聚。但对于室外空气污染对室内空气质量影响的理

论研究还不多见, 目前国内外研究者普遍采用现场测量室内外空气污染物浓度的方法获得该问题的解^[6-10], 然而由于现场情况的不同、影响因素的不可控性, 所得的结论既不便于推广, 又不能确定各种因素的影响程度, 因此无法从机理上对该问题进行解释。实际上, 机动车尾气中的污染物浓度分布主要受建筑内外气流的影响, 因此如能用数值模拟法对室内外流场给出正确的描述, 那么室内外污染物浓度的分布也就不难得到。Chang 等^[11]采用大涡模拟法, 考察了二维情况下室外污染源对室内空气质量的影响, 但流场和浓度场都没有实验验证。目前国内鲜见利用风洞研究室内外空气污染的影响问题, 而现场测量的实验数据由于测点相对较少且干扰因素多, 某些边界条件未明确给出, 所以不宜用于考察

收稿日期: 2007-06-28 修订日期: 2007-10-29

基金项目: 上海市世博会科技攻关重大项目(06dz05809)

作者简介: 谢海英(1973-), 女, 江苏启东人, 讲师, 博士研究生,
xiehaiying_usst@163.com.

* 责任作者, alyang@usst.edu.cn

数值模拟法在室内、外空气污染影响问题上的可行性。因此笔者先用单个建筑物外部浓度分布的风洞实验来验证计算模型与方法的正确性^[12],在此基础上,用自然通风的风洞实验数据来验证流场^[13],考察室内外空气污染的影响问题。

数值模拟的控制方程为连续性方程、动量方程(Navier-Stokes 方程)、污染物(组分)输运方程和湍流模型方程。由于笔者研究的是有关建筑物的钝体绕流问题,会遇到分离、回流和漩涡等复杂的流动现象,因此选用 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型,该模型对上述流动现象具有较好的预测能力^[1,14-15]。

1 计算模型的验证

图 1 的建筑物模型由 1 个主体建筑物和置于其屋顶上呈 L 形的附属建筑物组合而成,图 1 中长度单位为 mm,坐标系原点位于地面上。 x 、 y 和 z 方向的速度分别为 u_1 、 u_2 和 u_3 。按风洞实验^[12],来流的风速廓线为 $u_2/U_0 = (z/H_0)^{0.15}$,其中, U_0 为 0.6 m/s, H_0 为 0.1 m, $u_1 = 0$, $u_3 = 0$;实验以 CH₄ 作为示踪物,为避免气体浮力的影响,将 CH₄ 和 Ar 按体积比约为 2:1 进行混合(混合后气体密度接近空气密度);污染源位于建筑物正前方 0.75 m 处的地面上,喷嘴直径为 8 mm,方向同来流风向,速度取 0.01 m/s。由于污染源的释放速度较小,污染源的气流基本不会影响主流。为方便与实验值比较,将 $z = 50$ mm 与 $z = 130$ mm 的平面与建筑物各侧面形成的交线端点从迎风面起沿逆时针方向取位置为 0, 1, 2, ..., 11, 其中位置 0 与 4 重合, 5 与 11 重合, 见图 1。按实验定义 CH₄ 浓度(K_{CH_4} , 无量纲)为:

$$K_{CH_4} = \frac{c U_0 A}{Q_s} \quad (1)$$

式中, c 为 CH₄ 体积分数; A 为主体建筑物模型侧面面积,为 0.027 m²; Q_s 为污染物的体积流量,为 0.5 mL/s。

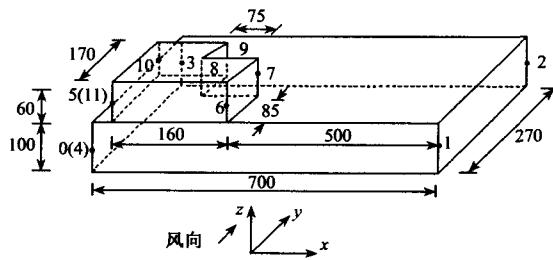


图 1 验证模型使用的建筑物模型

Fig. 1 Building model for verification

计算域 x 方向边界各距离主体建筑物两侧墙面为 $5H_0$; y 方向上, 来流距离建筑物迎风面为 $5H_0$, 出流距离建筑物背风面为 $15H_0$; z 方向高度距离地面为 $5H_0$ 。来流采用实验给定的速度进口;出流处设定各物理量沿 y 方向的导数为 0;计算区域上边界面的 u_1 和 u_2 沿 z 方向导数为 0, $u_3 = 0$;计算区域 x 方向边界的 u_2 和 u_3 沿 x 方向导数为 0, $u_1 = 0$;所有固壁面采用速度无滑移条件。控制方程中的对流项采用二阶迎风格式,压力与速度耦合采用 Simple 算法,方程迭代采用欠松弛技术,固壁面处采用壁面函数法。

图 2 为建筑物壁面位置 0~11 处 K_{CH_4} 分布的计算值与实验值比较。在 $z = 50$ mm 的壁面上, K_{CH_4} 最大值位于迎风面中心附近,然后沿 x 正负方向迅速降低,在建筑物背风面中心附近有一峰值,但较迎风面要小许多,侧面值较低;而附属建筑物壁面附近的变化不大,值较小。图 2 中位置 1, 2, 3 的计算值小于实验值。图 3 给出了 CH₄ 在 $z = 50$ mm 平面上的 K_{CH_4} 等值线图。由图 3 可知,由于建筑模型的非对称性, K_{CH_4} 等值线图在建筑物附近也具有非对称性。以上分析表明,笔者的数值模拟方法能对污染物的扩散情况进行较好的预测。

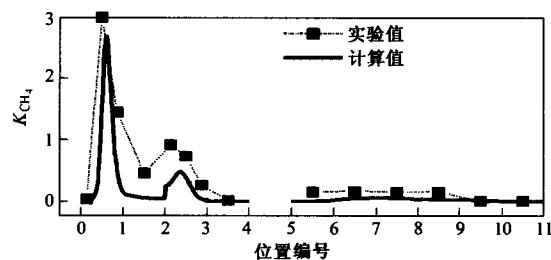


图 2 CH₄ 浓度(K_{CH_4})的计算值与实验值比较

Fig. 2 Comparison between computational and test values for CH₄ concentration (K_{CH_4})

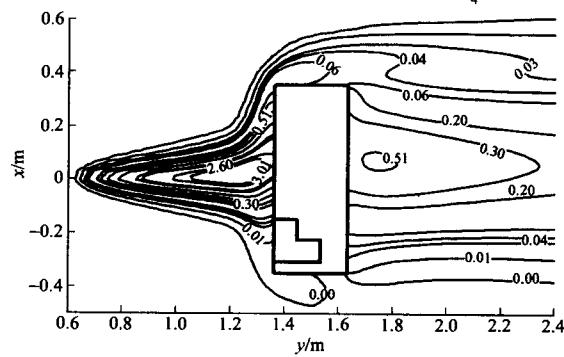


图 3 $z = 50$ mm 处 CH₄ 浓度(K_{CH_4})等值线图

Fig. 3 CH₄ concentration (K_{CH_4}) contour at $z = 50$ mm

2 室外污染对室内空气质量影响的模拟

在原有的通风实验上^[13],附加类似于验证模型的点污染源,研究自然通风方式下,室外污染对室内空气质量的影响.风洞实验的建筑物模型如图4所示, $H = 180$ mm,建筑物墙厚3 mm,室内屋顶距离地面为160 mm,建筑物气流进出口为30 mm×30 mm,坐标系原点位于地面上.计算域类似于验证模型的取法,来流速度按实验取为 $u_2/u_H = (z/H)^{0.25}$, $u_1 = 0$, $u_3 = 0$, u_H 是 H 处来流未受影响的速度,取4.17 m/s;其余的边界条件和计算方法均类似于验证模型.污染物设为CO,源位于建筑物正前方0.2 m处,源强为1.6 mL/s,沿 z 方向释放,速度为0.1 m/s,喷嘴直径为4.5 mm.为了研究污染源位置对浓度场的影响,笔者将污染源分别设在 $z = 0$ 和 $z = H/2$ 处,分别命名为 $PS = 0$ 和 $PS = H/2$.风洞实验还在上述建筑物模型内距离迎风面外墙为36 mm处加设了挡风板,其大小同进风口尺寸,厚度为6 mm,笔者将其命名为Model-d,而没有挡风板的模型命名为Model-wd.

2.1 速度场

污染源的速度和主流风速相比较小,因此污染物的释放速度和位置基本不会对流场造成影响,计

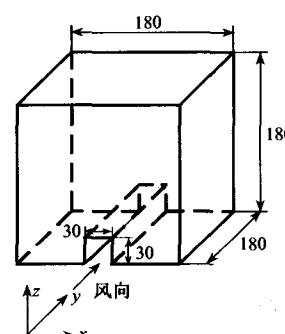


图4 自然通风的建筑物模型

Fig.4 Building model for natural ventilation

算结果证明了上述结论.图5是Model-wd在 $PS = 0$ 时建筑内外的速度计算值和实验值比较.在建筑物对称面($x = 0$)上沿 y 方向分别距离前后外墙面33 mm取a,b,c和d 4个位置(见图5(a)).由图5(b)~(e)可看出,风速场的计算值在 $z/H > 0.1$ 时和实验值吻合较好,在地面附近与实验值略有差别. Model-wd在 $PS = H/2$ 时的速度分布与 $PS = 0$ 几乎相同. Model-d在 $PS = 0$ 及 $H/2$ 时的a和d位置的速度分布基本类似于Model-wd的情况,图6是Model-d在 $PS = 0$ 时b和c位置的速度分布.

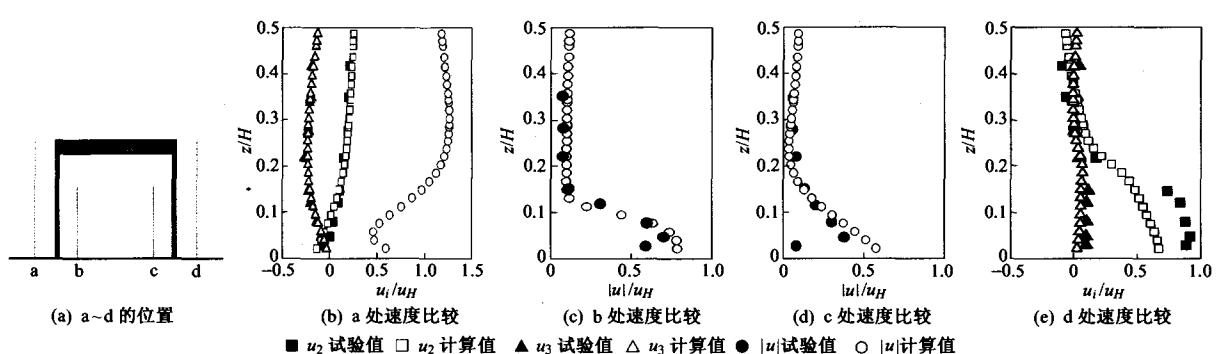


图5 Model-wd, $PS = 0$ 时建筑物内外的速度分布

Fig.5 The indoor and outdoor velocity distribution for Model-wd, $PS = 0$

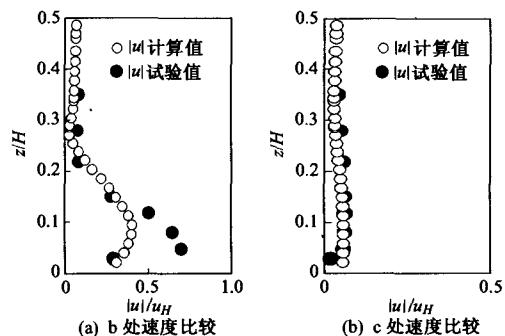


图6 Model-d, $PS = 0$ 时建筑物内的速度分布

Fig.6 Indoor velocity distribution for Model-d, $PS = 0$

2.2 通风量

表1是通风量($\bar{Q} = Q/(u_H \times H^2)$,无量纲)与实验值的比较.由表1可看出,计算值比实验值略小,污染源位置对通风量几乎无影响.

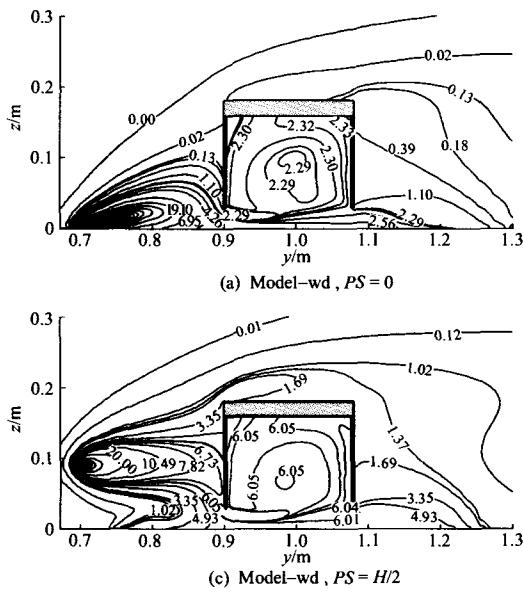
表1 \bar{Q} 的计算值和实验值比较

Table 1 The comparison of dimensionless ventilation rate

\bar{Q}	Model - wd		Model - d	
	$PS = 0$	$PS = H/2$	$PS = 0$	$PS = H/2$
计算值	0.0125	0.0122	0.0104	0.0102
实验值		0.014		0.012

2.3 浓度场

定义 CO 浓度(K_{CO} ,无量纲)同式(1).图 7 给出



了 Model-wd 和 Model-d 在 $PS = 0$ 及 $H/2$ 情况下, $x = 0$ 面上 CO 浓度(K_{CO})的分布.

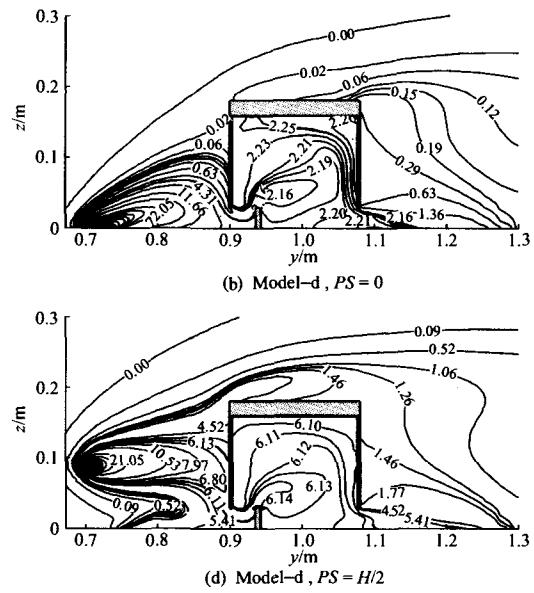


图 7 $x = 0$ 面上 CO 浓度(K_{CO})等值线分布

Fig. 7 The CO concentration (K_{CO}) contour at $x = 0$

从图 7 可知,在污染源附近, K_{CO} 接近于高斯分布;而在地面和建筑物附近,由于流场的改变, K_{CO} 分布情况复杂.尽管建筑物进风口位于地面附近,但 $PS = 0$ 时室内 K_{CO} 较 $PS = H/2$ 时的小.有无挡板时室内 K_{CO} 取决于污染源的位置,当 $PS = 0$ 时,有挡板的(Model-d)室内 K_{CO} 略小于无挡板的(Model-wd);当 $PS = H/2$ 时,有挡板的室内 K_{CO} 略大于无挡板的,但总的看来,挡板对室内 K_{CO} 的影响不大.这可通过建筑内外的流场分析进行解释.

图 8 给出了 Model-wd 在 $PS = 0$ 和 Model-d 在 $PS = H/2$ 时 $x = 0$ 面上的速度矢量图.由图 8 可

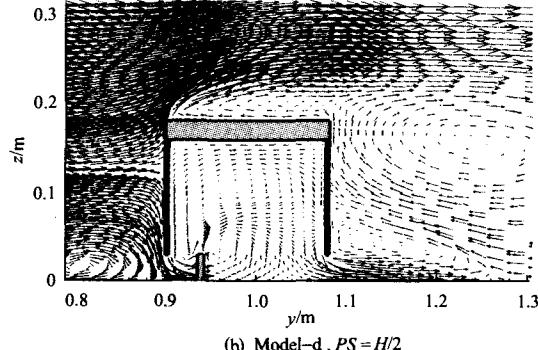
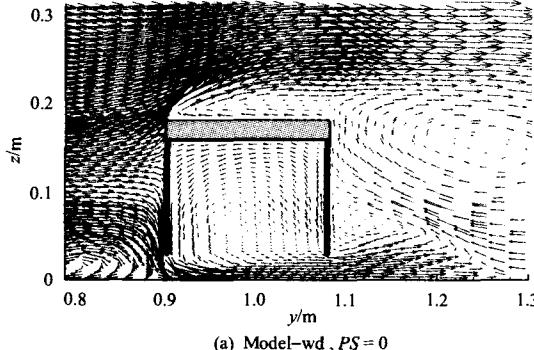


图 8 速度矢量图

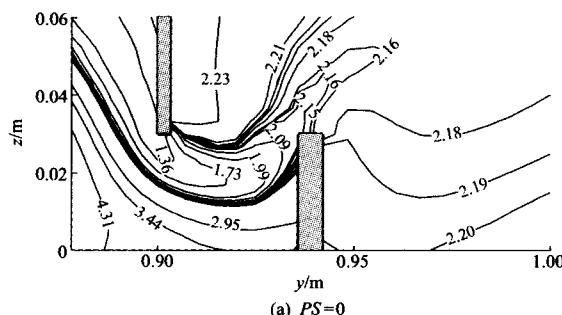
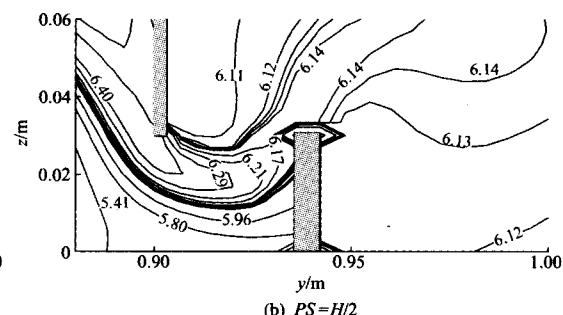
Fig. 8 The velocity vector

知,来流遇到建筑物时,在建筑物前下方形成回流区,因此进入建筑物内的气流与进口不同高,来自回流区上部的气流进入建筑物内;气流在建筑物顶部分离;在建筑物背风面出口上方有一较小的回流区,该回流区的上方是一个大回流区.建筑物内的挡板仅对建筑内和进出口附近的流场产生影响,对 $z > H/2$ 以上的外部流场几乎无影响.正是由于上述的流场特点,形成了图 7 的 K_{CO} 分布.由于进入建筑物内的气流来自于建筑物前回流区的上部,因此建筑物内的 K_{CO} 和地面上的浓度无关,而与该回流区上部的浓度相近,见图 7.当 $PS = H/2$ 时, $z = H/2$

的水平线附近的 K_{co} 较高, 建筑物前的回流区使得靠近该区域的气流进入室内; 当 $PS = 0$ 时, 建筑物外 K_{co} 高值区在地面附近, 且由于建筑物前回流区而略有抬升, 但进入室内的气流离 K_{co} 高值区较远, 所以建筑物内 K_{co} 较低。当然, 由于 $PS = 0$ 时, 源附近的风速较小, 使得 CO 扩散减慢, 更加减小了建筑物进口气流的 K_{co} 。当进口有挡板时, 增加了进口气流的阻力, 所以一部分低速气流无法进入室内; 当 $PS = 0$ 时, 地面上方离 K_{co} 高值区近的气流速度相对较小, 低值区的速度较大, 所以进入室内的气流浓度相对较低, 见图 7(a) 和 (b); 当 $PS = H/2$ 时, $z = H/2$ 水平线下方离 K_{co} 高值区近的气流速度相对较大(见图 5(b)), 因此这部分气流进入室内, 建筑物内的 K_{co} 也略高, 见图 7(c) 和 (d); 但总的看来, 由于挡板造成的浓度差别并不显著。

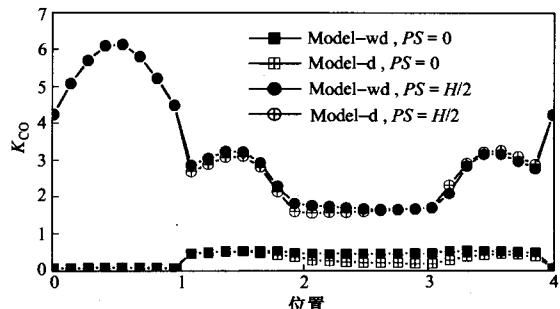
在无挡板(Model-wd)时, 由于进出口间无障碍, 建筑物内气流混合较均匀, 空间上的 K_{co} 差别较

小, 见图 7(a)和(c); 有挡板时, 建筑物内部流场较复杂, 挡板后上方形成小的回流区, 而在建筑物内 $z > H/2$ 处形成类似于无挡板情况的大回流区, 进出口间的气流和无挡板时相比, 速度明显降低, 见图 8(a)和(b)。Model-d 在 $PS = 0$ 时, 进口附近 K_{co} 低, 越靠近建筑物内墙, 浓度越高; Model-d 在 $PS = H/2$ 时, 进口附近 K_{co} 高, 而靠近墙壁处浓度变低, 尽管二者变化的绝对量并不大, 见图 7(b)和(d)。上述 Model-d 模型建筑物内 CO 浓度分布不同的原因可用图 9 进行解释。图 9 中厚的灰框表示建筑物进口的挡风板, 薄的灰框表示建筑物的墙面。 $PS = 0$ 时, 进口处气流的 K_{co} 在断面上呈中间低、两边高, 见图 9(a); 而 $PS = H/2$ 时, 情况正好相反, 见图 9(b), 由于挡板造成建筑物内底部气流速度明显减少, 室内气流的混合程度减弱, 进口处的 CO 浓度分布特点在建筑物内仍基本维持, 因此出现了图 7(b)和图 7(d)的建筑物内 CO 浓度分布。

(a) $PS=0$ (b) $PS=H/2$ 图 9 Model-d 进口附近 $x=0$ 面 K_{co} 分布Fig.9 The CO concentration (K_{co}) contour at inlet for Model-d

从建筑物内的 CO 浓度分布看, 为了减少室内污染程度, 建筑物进风口的选取很重要, 图 10 给出了 $z = H/2$ 时建筑物外墙上的 K_{co} 分布, 图 10 位置的取法同验证模型, 将 $z = H/2$ 平面与建筑物各侧面形成的交线端点沿逆时针方向取为位置 0~4, 其中位置 0 和 1 位于迎风面, 0 与 4 重合。从图 10 得知, $PS = H/2$ 时的外墙污染物浓度要远大于 $PS = 0$ 的情况, 由于建筑物及污染源位置的对称性, 壁面 K_{co} 沿 $x = 0$ 面对称分布。 $PS = H/2$ 时, 进口选在背风面时室内 K_{co} 最小, 选迎风面时最大; $PS = 0$ 时, 壁面 K_{co} 均较小, 且变化不大, 因此对进口位置的选取无要求。此外, $PS = H/2$ 时, 计算模型迎风面的 CO 浓度分布特征与验证模型相似, 这是因为验证模型的建筑物高度与源和建筑物之间的距离之比较

小, 而且来流风速较小, 所以源的高度对其浓度分布影响不大; $PS = 0$ 时, 模型高度和源与建筑物之间的距离之比约为 1, 而 $PS = H/2$ 时, 该比值约为 0.5,

图 10 $z = H/2$ 时建筑物外墙面 CO 浓度 (K_{co})Fig.10 The CO concentration (K_{co}) at outdoor wall when $z = H/2$

显然 $PS = H/2$ 与验证模型相似, 所以二者的迎风面浓度有相似性。由于验证模型的形状与计算模型不同, 且其顶部有附属建筑物, 在背风面及侧面, 验证模型和计算模型的浓度分布有所不同。

3 结论

a. 由于建筑物对流场的影响, 点源在建筑物附近的污染物浓度分布不再符合高斯扩散模式, 而是和流场情况有较大关系, 气流的流动特征决定了浓度分布, 因此正确模拟流场是用数值模拟方法研究室内外空气污染影响问题的前提。

b. 模拟的建筑物进出口在地面附近, 由于进口前回流区的存在, 使得进入建筑物内的气流和进口不同高, 回流区上部的气流进入建筑物内, 建筑物内的污染物浓度与进口气流的浓度基本一致。

c. 进口气流的浓度大小和源位置有关。当源位于地面时, 进口气流的浓度较低; 当源位于 $H/2$ 时, 浓度较高。这种分布与源所在处的风速有关, 也与进口气流离开污染物高浓度区的距离有关。源所在位置的风速越小, 污染物扩散越慢, 进口气流离开高浓度区的距离越小, 进口气流的污染物浓度越高。

d. 进口附近设挡风板, 增加了进口阻力, 阻挡了低速气流进入建筑物内, 建筑物内的流动情况变复杂, 室内气流的混合程度变弱, 这些因素改变了进口气流和建筑物内的污染物浓度分布的特点, 但影响较小。

e. 通过改变进口位置, 可以有效地减少室内空气受室外污染的程度, 但可能在通风量方面也有相应的变化。

由于笔者在数值模拟室外空气污染对室内空气质量的影响时只有流场验证, 缺少污染物浓度场的实验数据, 因此上述结论的正确性还有待实验的进一步证明。

参考文献(References):

[1] 尤学一, 李莉. 污染源对建筑小区影响的数值模拟[J]. 环境

- 科学研究, 2006, 19(3):13-17.
- [2] 蒋德海, 蒋维楣, 苗世光. 城市街道峡谷气流和污染物分布的数值模拟[J]. 环境科学研究, 2006, 19(3):7-12.
- [3] 汪立敏, 王嘉松, 赵宝芹, 等. 非孤立街道峡谷大气流动及污染物扩散特征[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6):18-22.
- [4] 谢海英, 陈康民. 屋顶形状对街道峡谷内污染物扩散的影响[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3):27-32.
- [5] 王宝民, 柯咏东, 桑建国. 城市街谷大气环境研究进展[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(1):146-153.
- [6] Li Chunlei, Fu Jiamo, Sheng Guoying, et al. Vertical distribution of PAHs in the indoor and outdoor $PM_{2.5}$ in Guangzhou, China[J]. Building and Environment, 2005, 40:329-341.
- [7] 钟珂. 室内外空气污染物浓度演化关系的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.
- [8] 郎畅, 王学军, 刘娅囡, 等. 北京大学非采暖期室内空气中的气态多环芳烃[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4):655-660.
- [9] Jo Wankuen, Lee Joon-Yeob. Indoor and outdoor levels of respirable particulates (PM_{10}) and carbon monoxide (CO) in high-rise apartment buildings[J]. Atmos Environ, 2006, 40: 6067-6076.
- [10] Blondeau P, Iordache V, Poupart O, et al. Relationship between outdoor and indoor air quality in eight French schools[J]. Indoor Air, 2005, 15: 2-12.
- [11] Chang Tsang-Jung, Huang Meiyu, Wu Yuting, et al. Quantitative prediction of traffic pollutant transmission into Buildings [J]. J Environ Sci Health A, 2003, A38(6):1025-1040.
- [12] Higson H L, Griffiths R F, Jones C D, et al. Concentration measurements around an isolated building: a comparison between wind tunnel and field data[J]. Atmos Environ, 1994, 28: 1827-1836.
- [13] Shinsuke Kato, Shuzo Murakami, Akashi Mochida, et al. Velocity-pressure field of cross ventilation with open windows analyzed by wind tunnel and numerical simulation[J]. J Wind Eng Industrial Aerodynamics, 1992, 41/44:2575-2586.
- [14] 谢海英, 张道方. 前后通风的建筑内外流动湍流模型比较[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(5):449-452.
- [15] Chan T L, Dong G, Leung C W, et al. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon [J]. Atmos Environ, 2002, 36:861-872.

(责任编辑:孙彩萍)