

城市建筑群环境有毒有害气体扩散数值模拟

郑茂辉¹, 金敏¹, 许建明²

(1. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092; 2. 上海市气象局, 上海 200135)

摘要:应用计算流体力学(CFD)原理和方法建立街区尺度点源泄漏扩散的数值模型,并经风洞试验结果验证其正确性.对街区建筑物扰动和两种来流风速($1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下近地面气云扩散过程及特性进行模拟与分析.结果表明:给定合适的计算参数,基于RNG $k-\epsilon$ 模型和SIMPLE算法能够有效模拟复杂障碍物条件下有毒有害气体的扩散过程;近地面气云扩散受道路、建筑物布局和来流风速的影响明显,建筑物周围测点浓度同该处源距、方位、高度以及风向偏离程度存在密切联系;较大的来流风速加快气云水平输送,同时有利于浓度的稀释;泄漏停止后建筑物密集区间浓度稀释相对滞缓,可能对人群健康构成威胁.

关键词:有毒有害气体;扩散;数值模拟;浓度场;街区尺度

中图分类号: X928.5; X169

文献标志码: A

Numerical Simulation of Hazardous Gas Dispersion Around Buildings in Urban Environment

ZHENG Maohui¹, JIN Min¹, XU Jianming²

(1. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200135, China)

Abstract: A street-level computational fluid dynamics (CFD) model was established to simulate the movement characteristics of the released gas and the concentration distribution around the complex arrangement of buildings. A wind tunnel experiment about release and dispersion in building array was used to validate the model. Then numerical simulations were carried out with two different reference wind speeds, $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $3.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, in a genuine urban area. The results show that, given appropriate parameters, the RNG $k-\epsilon$ closure and SIMPLE algorithm can be employed to predict the dispersion process accurately in obstacle terrain. The time-varying concentration distributions near the ground highlight the influences of wind speed, road

and building arrangement, on the dispersion. The sampling concentration around buildings is strongly affected by the positions of sampling points relative to source, including height, distance from the source, angle from wind direction, and so on. The higher wind velocity speeds up plume propagation, as well as concentration dilution process. The results also confirm that, among dense buildings the hazardous gas may stay much longer, which constitutes a threat to public health and safety.

Key words: hazardous gas; dispersion; numerical simulation; concentration field; street-level

城市建筑群环境中有毒有害气体的扩散受到道路、建筑物布局和局地气象条件等多种因素的影响,扩散机理十分复杂^[1].研究街区尺度有毒有害气体扩散的规律和特性,可对扩散过程及后果进行科学有效的模拟,能在事故预防和应急决策方面发挥积极而必要的作用,是当前城市微气象环境和公共安全领域的研究热点之一^[2].

国内外针对意外泄漏扩散开展了大量的试验^[3-4]和理论模型^[5-7]研究.不过,早期研究主要面向平坦或孤立障碍物地形,难以反映街区非均匀下垫面对流动和扩散过程的影响.近些年,出于生化防恐、城市环境安全等需要,欧美一些发达国家的主要城市相继开展了若干现场试验^[8-10].与此同时,由于基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的扩散模型能够详细描述复杂地形条件下的流场结构、湍流细节及其对浓度的影响,得到越来越多的研究和关注^[11-15]. Pullen等^[12]采用FAST3D-CT和高斯烟羽模型对华盛顿和芝加哥局部区域的污染物扩散进行模拟和分析; Moussafir等^[13]对意大利 Bologna市中心 $500\times 500\text{ m}^2$ 范围进行了模拟,并对建筑物背风面的气体浓度进行了评估; Xie

收稿日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(41001217);“十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ11B01);中央高校基本科研业务费专项资金
第一作者: 郑茂辉(1976—),男,讲师,理学博士,主要研究方向为地理信息系统、环境过程模拟. E-mail: zmh@tongji.edu.cn

等^[14]对伦敦市区示踪气体试验进行数值模拟,结果表明近源浓度分布与周围建筑物几何分布密切相关,而远源浓度分布所受影响相对较小.国内针对复杂城市环境下的扩散过程研究起步较晚.刘国梁等^[15]通过风洞试验研究讨论了几种障碍物条件对重气扩散的影响,席学军等^[16]基于大涡模拟方法研究城市街道中的毒气扩散过程;尤学一等^[17]模拟了开放街道峡谷和城市街道峡谷污染物的扩散问题,证实了相同条件下后者背风墙和迎风墙上的污染物浓度均大于前者的相应值;此外,文献[2, 18]分析街区尺度CFD模拟中复杂下垫面建模和空间集成分析所面临的不足,探讨了耦合地理信息系统(geographic information system, GIS)和CFD的街区扩散模型及其关键技术.

本文拟应用基于CFD原理的扩散模型和计算方法,以街区建筑群中点源连续泄漏为例,模拟研究有毒有害气体在建筑物周围的扩散过程及特性,着重分析下垫面建筑物扰动和来流风速对浓度时空分布的影响,从而为事故后果评价和应急决策提供理论依据.

1 控制方程与数值方法

有毒有害气体泄漏以后形成的气云运动规律满足三维不可压缩Navier-Stokes方程组.不考虑温度对流场的影响以及组分输运过程中的化学反应,本文求解如下连续方程、动量方程和浓度扩散方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_t \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S \quad (3)$$

式中: u_i ($i=1, 2, 3$)为 x_i 方向上的速度分量, ρ 为流体密度, p 是静压, μ_t 为涡黏性系数, C 为有毒有害气体浓度, S 为污染物源项, D_t 为湍流扩散系数.

RNG $k-\epsilon$ 模型用修正的黏度项体现小尺度的影响,对近壁面浓度的预测要好于标准 $k-\epsilon$ 模型^[19].本文采用RNG $k-\epsilon$ 模型闭合方程组,模型常数 $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_1, C_2$ 分别取值为0.845, 0.717 9, 0.717 9, 1.42和1.68.应用有限体积法(FVM)对上述控制方程在整个计算区域进行离散,其中对流项离散采用二阶迎风格式,扩散项采用二阶中心差分,时间采用一阶隐式离散格式,速度压力耦合采用

SIMPLE算法.大气入口水平风速采用幂指数率计算: $U_z = U_r (z/h_r)^\alpha$,其中, α 为风廓线幂指数, z 为距地面的高度, U_r 为参考高度 h_r 上的平均风速;在出口边界上,各变量的水平方向梯度为零;地面及建筑物壁面采用无滑移边界条件,其附近的切向速度、 k 和 ϵ 采用壁面函数计算;顶部和两个侧面设定为对称边界.

2 计算与分析

2.1 算例验证

为检验方法的正确性,对文献[20]中一个障碍物绕流的重气扩散试验场景(编号:029128)进行模拟计算,并与试验结果进行对比.该试验在德国汉堡大学气象学院的大气边界层风洞中进行,风洞试验段长4 000 mm、宽1 500 mm、高1 000 mm.图1给出污染源 $S(0, 0, 0)$ 和障碍物几何分布,示踪气体为六氟化硫(SF_6),源强 $Q = 0.174 3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$.边界层厚度400 mm,幂指数 $\alpha = 0.26$,特征长度 $L_r = 7.18 \text{ mm}$,特征速度 $U_r = 0.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.障碍物长、宽、高均为 $H = 11L_r$,障碍物间距 $B = 21L_r$,在源点下风向部署热膜传感探头检测示踪气体的体积分数.图2给出下风向 $P_1(153, 0, 0)$, $P_2(230, 0, 0)$, $P_3(536, 0, 0)$ 三个测点的5 s平均体积分数(%)实测值和模拟值的对照.模拟结果总体上稍高于实测值,但两者趋势一致,在远离污染源处吻合较好.这表明通过设定合理边界和计算参数,本文的计算模型和数值方法是可靠的,能够适应复杂障碍物地形的模拟.

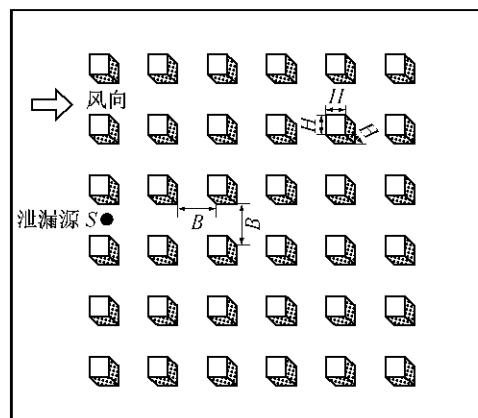


图1 风洞试验模型

Fig.1 Schematic map of the wind tunnel model

2.2 真实街区模拟

在模型验证基础上,以文献[9]中英国伦敦Marylebone大道的周边街区为例,模拟真实建筑群

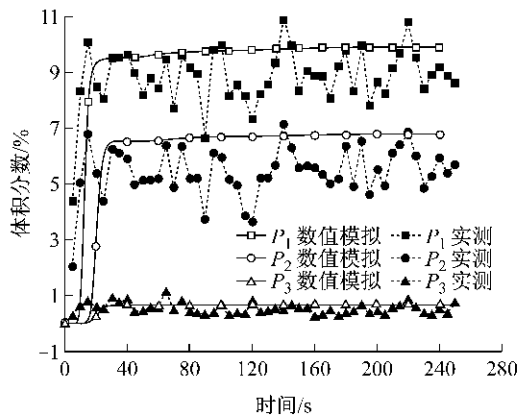


图 2 数值模拟与风洞试验测点平均体积分数比较

Fig.2 Comparison of mean volume fraction on corresponding measurement points between numerical simulation and wind tunnel experiment

环境中短历时点源的大气扩散。图 3 给出研究区域主要街道和建筑物几何分布、高程等基本信息,区内建筑物平均高度 22 m。假定污染源(S)位于街区内部,距地面 2 m,泄漏气体为硫化氢(H_2S),源强 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,泄漏持续 900 s;扩散期间来流风向与 Marylebone 大道成 45° 夹角,为西南风,风廓线幂指数 $\alpha = 0.26$ 。为分析建筑物和环境风速对扩散过程的影响,设定 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 两种来流风速 (U_r) 进行分组模拟,并在下风向选定 $P_1 \sim P_5$ 五个测点,其中 P_4 位于建筑物顶部,高 15 m,其余测点均位于近地面街道之中,高 1.5 m。

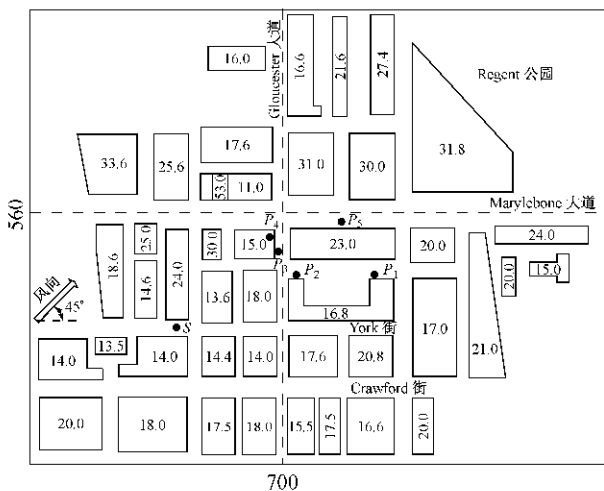


图 3 街区建筑物布局及泄漏源、测点位置(单位:m)

Fig.3 Building arrangement and the configuration of source, measurement points in the investigated urban streets(unit:m)

计算域沿流向长 $1\ 200 \text{ m}(x)$ 、宽 $800 \text{ m}(y)$ 、高 $200 \text{ m}(z)$,采用四面体网格进行空间离散,网格单元

总数约 2.2×10^6 个。其中,在污染源和建筑物附近的一定区域内,泄漏气体各个参数的梯度变化较大,采用局部加密网格进行处理。两组模拟计算时间分别为 $1\ 600 \text{ s}$ 和 $1\ 260 \text{ s}$,时间步长均为 0.1 s 。浓度数值计算涵盖连续泄漏期间的扩散和泄漏停止后弥散气体的吹散过程。

2.3 结果与讨论

出于安全考虑,在泄漏事故模拟中最关心的是近地面有毒有害气体的浓度场变化。图 4 给出两组模拟中地面 1.5 m 高度处三个不同时刻(180 s , 900 s , $1\ 020 \text{ s}$)的质量浓度分布图。其中,硫化氢质量浓度大于 $760 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时可很快造成急性中毒或致人死亡,为极度危险区域;质量浓度介于 $300 \sim 760 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 为高度危险区域;质量浓度介于 $10 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 为中度危险区域。

对照图 4 结果,直观可见建筑物和来流风速对扩散过程的影响。硫化氢气体泄漏后由于负向浮力的作用在近地面形成低平的重气云团,受建筑物所限,沿街廊向下风向蔓延扩散。 $t = 180 \text{ s}$,在 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下气云分布范围较小,主要限于下风向少数建筑物周围,污染源附近交叉路口处质量浓度高达 $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上(见图 4a)。 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下水平输运明显加速,在风向成 45° 夹角的街谷中气云扩散速度最快,向开阔的 Marylebone 大道蔓延(见图 4b)。 $t = 900 \text{ s}$,泄漏停止,此时前者气云前端已抵达模拟区域边缘,下风向两个近源街段基本为高度危险区(见图 4c);后者因气云浓度稀释较快,前端低质量浓度区($10 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)较 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速下要小,另外由于湍动扰动程度加大,近源高质量浓度区的范围也明显萎缩(见图 4d)。至 $t = 1\ 020 \text{ s}$,由图 4e, f 可知,气云因被动扩散质量浓度迅速下降,并整体往下风向迁移;污染源附近街巷中原高质量浓度区已经消退(质量浓度 $< 10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),且随着环境风速的增大,消退速度明显加快。

图 5 是两组模拟中下风向五个监测点的质量浓度变化曲线图。分析表明,不同风速条件下对应点的质量浓度变化趋势基本一致,较大的环境风速有利于气体的稀释扩散。当 $U_r = 3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,各点质量浓度在泄漏停止 350 s 后趋于零,而 $U_r = 1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时该被动扩散阶段持续约 650 s 。其次,各监测点的质量浓度变化与其同污染源的位置关系、风向偏离程度等有着密切联系。表 1 给出各点到污染源的直线距离(R_1)、沿路折线距离(R_2),点-源连线同主风向的夹角(θ),以及最大计算质量浓度。 P_1, P_2

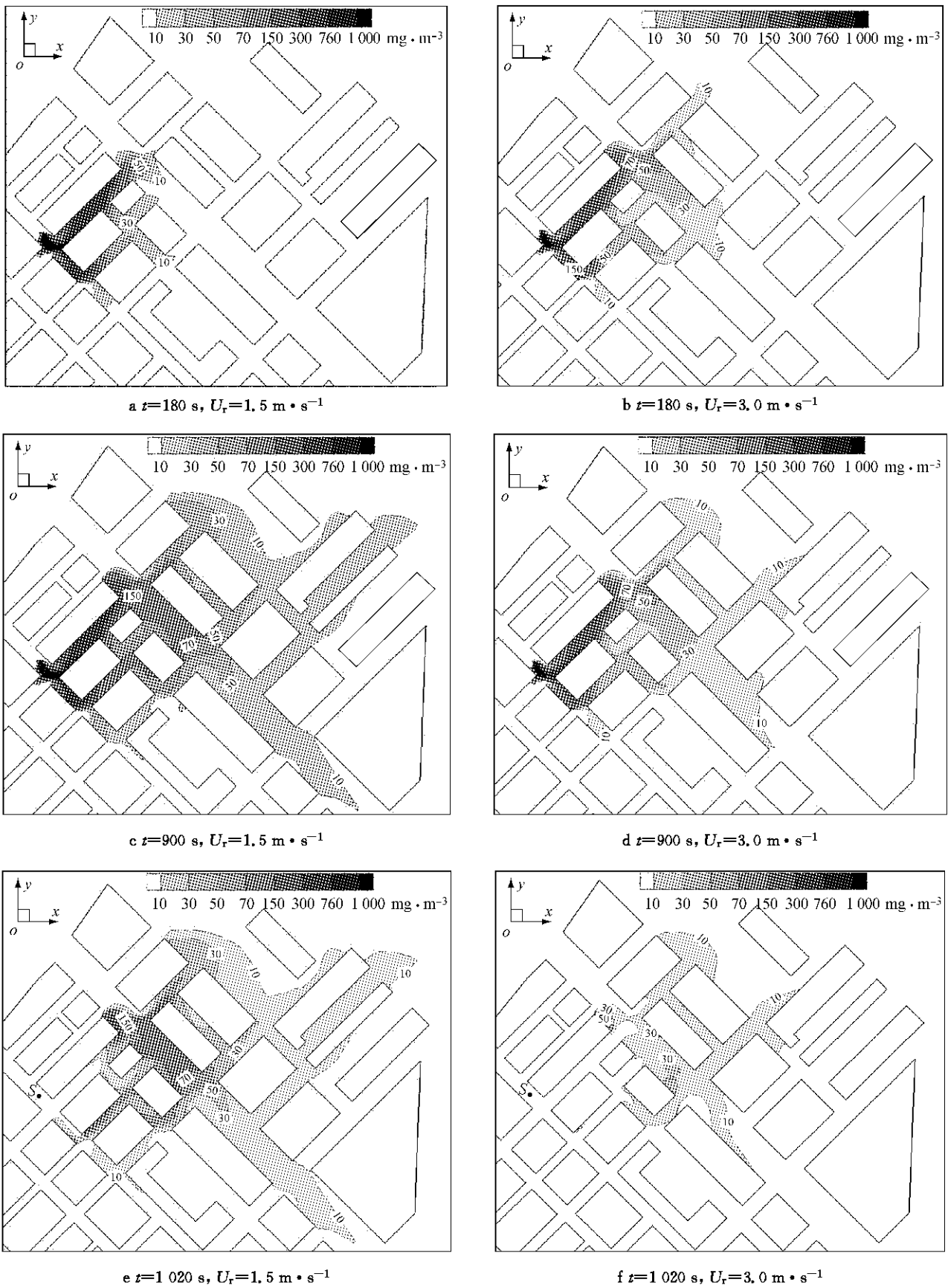


图4 不同风速条件下,近地面1.5 m处模拟浓度随时间的变化

Fig.4 A time sequence of concentration distribution over a horizontal plane ($z=1.5 \text{ m}$) under different wind speeds

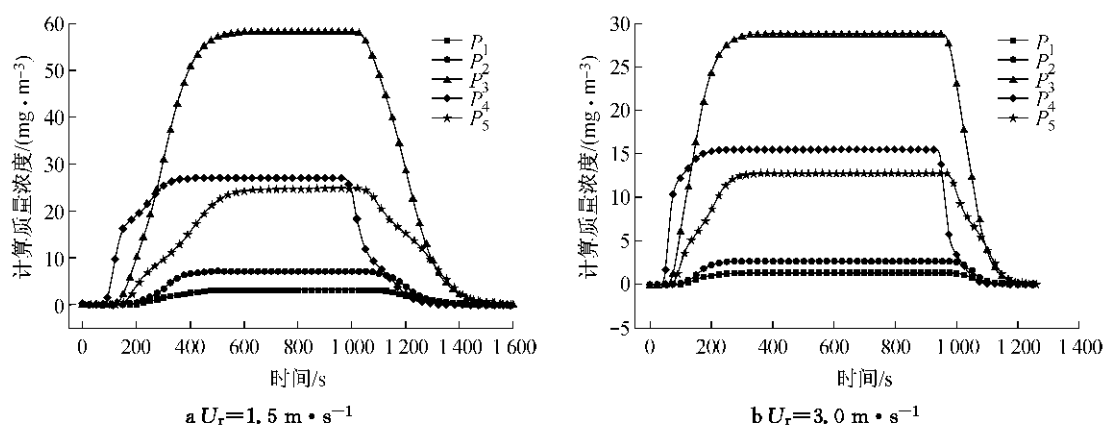


图 5 不同风速条件下测点平均计算质量浓度变化

Fig. 5 Mean mass concentration variation of sampling points at different wind speeds

表 1 测点源距关系与最大计算质量浓度

Tab. 1 The positions of sampling points relative to contaminant source and the maximum concentrations

编号	直线源距 R_1/m	折线源距 R_2/m	无量纲源距 (R_1/h_r)	与主风向夹 角 $\theta/(\circ)$	最大计算质量浓度 $C/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$		最大无量纲浓度 $(CU_r h_r^2/Q)$	
					$U_r=1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$U_r=3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$U_r=1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$U_r=3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
P_1	200	250	9.09	38	3.34	1.39	0.012 12	0.010 09
P_2	120	160	5.45	28	7.13	2.71	0.025 88	0.019 67
P_3	115	150	5.22	2	58.35	28.77	0.211 81	0.208 87
P_4	115	150	5.22	2	27.08	15.57	0.098 30	0.113 04
P_5	200	280	9.09	14	24.68	12.76	0.089 59	0.092 64

由于偏离主风向,在整个模拟期间质量浓度基本上小于 $7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$;而 P_5 到污染源的距离与 P_1 相近,但计算质量浓度为 P_1 的 7~10 倍. 建筑物背风面 P_3 的峰值质量浓度明显高于建筑物顶部的邻近监测点 P_4 ;不过,在扩散初期由于气云遇建筑物阻碍后爬升,出现后者质量浓度高于前者的短暂过程. 此外,在泄漏停止后建筑物周围气体质量浓度因被动扩散而迅速下降. 其中,测点 P_4 因建筑物顶部风速较大下降最快,而街谷内各近地面测点质量浓度稀释较慢,尤其是离污染源较远的测点 P_5 ,其质量浓度下降明显滞缓. 基于以上初步讨论分析,在发生意外泄漏事故时,应第一时间组织人群向泄漏源的上风向或两个侧翼快速疏散,直至安全地带,并尽快控制泄漏源;对于来不及疏散的住户,应紧闭门窗做好防护,尽可能向楼层高处转移;此外,建筑物密集区间浓度稀释相对滞缓,可能成为威胁人群健康的“死角”.

3 结论

(1) 经算例验证,计算结果与风洞试验数据吻合良好,表明给定合适的计算参数,本文数值模型和方法能够有效模拟复杂障碍物条件下有毒有害气体的扩散过程.

(2) 扩散过程受街区道路、建筑物布局以及风

速条件影响显著,气云受建筑物阻碍向下风向街谷中蔓延扩散,近地面浓度同该处源距、所在方位和高度等关系密切,较大的环境风速有利于浓度的稀释扩散.

(3) 后续研究将重点分析事故场景下周边人群的暴露水平,为城市地区突发泄漏事故风险分析和人员紧急疏散提供相关理论依据.

参考文献:

- [1] Baik J J, Park S B, Kim J J. Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model [J]. Applied Meteorology and Climatology, 2009, 48(8): 1667.
- [2] ZHENG Maohui, JIN Min, QIAO Gang, et al. Modelling and simulation of dynamic diffusion process in urban streets [C] // Proceedings for ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS. Beijing: ISPRS Working Groups, 2011: 105-110.
- [3] McQuaid J. Objectives and design of the phase I heavy gas dispersion trials [J]. Journal of Hazardous Materials, 1985, 11(1/3): 1.
- [4] Davies M E, Singh S. The phase II trials: a data set on the effect of obstructions [J]. Journal of Hazardous Materials, 1985, 11(1/3): 301.
- [5] Witlox H W M. The HEGADAS model for ground-level heavy-gas dispersion—I. steady-state model, II. time-dependent model [J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(18): 2917.

(下转第 141 页)