

GIS 支持下的街区毒气扩散过程建模与模拟

郑茂辉¹ 金 敏¹ 郭 飞²

(1 同济大学上海防灾救灾研究所,上海市四平路 1239 号,210092)

(2 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,南京市文苑路 1 号,210046)

摘 要:运用 GIS 与计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD) 的相关原理和方法,建立了一个街区尺度毒气扩散过程高分辨率建模、模拟的框架模型,探讨了街区下垫面快速建模、空间连续场表达、扩散过程模拟与可视化等关键技术,对建筑物扰动下近地面浓度扩散的过程及特性进行了模拟与分析。实验结果表明,GIS 和 CFD 模型的耦合应用,能够较好地揭示建筑群中气云扩散和浓度时空分布的特征;近地面气云输运受建筑物布局影响显著,建筑物周围毒气浓度同该处源距、方位、高度以及来流风向偏离程度存在密切联系,泄漏停止后建筑群中气云滞留时间较长,对人群健康构成潜在威胁。

关键词:毒气扩散;CFD 模型;空间连续场;可视化;街区尺度

中图法分类号:P208; X507

街区建筑群中有毒有害气体的扩散是个三维、动态的微环境过程,受建筑物布局和局地气象因素影响,扩散过程和机理十分复杂^[1]。研究街区毒气扩散的规律,对扩散过程和浓度场分布进行科学有效的模拟与分析,能够在环境事故防范和应急指挥决策方面发挥积极而必要的作用。

传统 GIS 数据结构是二维、静态的,不能从根本上满足多维时空模拟与分析的需求^[2-4]。部分学者利用 Voronoi 图(VD)及其对偶 Delaunay 网格(DT)在空间连续场表达^[5-6]、模拟^[7-8]与可视化^[9]方面进行了研究。不过,已有成果主要针对大尺度环境过程,对于城市或街区尺度建筑物周围的流动和扩散问题有待更多的研究和探索。

在城市微气象环境领域,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模型由于能够详细描述复杂下垫面条件下的三维流场结构、湍流细节及其对浓度的影响,得到越来越多的研究和关注^[10-11],其结果有效性通过现场观测和风洞实验研究得到了验证^[12-13]。不过,对街区扩散过程的精细化模拟需要详细的冠层几何信息和高质量的计算网格,而现有 CFD 模型研究偏重于机理分析,在城市或街区尺度空间建模,包括结果

可视化和集成分析等方面还明显缺乏有效的技术手段^[1]。

本文综合利用 CFD 模型在城市微气象环境模拟中的理论、技术优势以及 GIS 空间建模和集成分析的能力,研究探讨城市建筑群环境中毒气扩散过程的精细化建模、模拟等关键技术,结合实验研究分析建筑物周围毒气扩散和浓度时空分布的特性,为城市地区毒气泄漏事故后果评价和应急疏散决策提供理论依据。

1 研究方法

图 1 给出了街区尺度毒气扩散过程建模和模拟的基本框架模型,包括基础模型数据、冠层建模与空间连续场表达、扩散数值模拟、结果可视化等关键技术单元。基础模型数据中,街区地形和建筑物数据用于城市冠层三维建模,并构成下垫面壁面条件;气象条件和泄漏源参数分别用于大气边界和污染源入口条件的确定。空间连续场的离散表达面向数值模拟,同时为结果可视化分析提供基础数据支撑。扩散过程模拟采用 CFD 数值模型,并通过数据格式转换实现空间模型读取和

收稿日期:2013-05-18。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41001217,40801147);中央高校基本科研业务费专项资助项目(2850219010);“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAJ11B01)。

数值结果的输出。下文将择要阐明街区冠层实体建模和空间连续场离散表达的技术思路,给出扩散过程的数值模拟方法,以及结果可视化的主要技术途径。

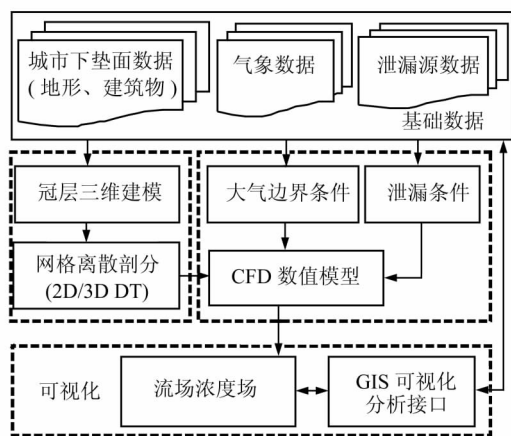


图1 耦合GIS与CFD的街区毒气扩散建模模拟

Fig.1 Coupling GIS with CFD to Model and Simulate Toxic Gas Dispersion in Urban Streets

1.1 街区冠层建模与空间连续场表达

街区扩散过程的空间建模重点解决两个问题:一是冠层几何建模,即建立地形、建筑物一体化的下垫面实体模型;二是高质量的网格剖分,满足数值计算可靠、高效的需求,同时通过一系列离散的网格单元和时间快照技术近似表征三维空间连续场及其动态特性。

冠层是指从地面到建筑物屋顶的这一层,它与建筑物高度、密度、几何形状和分布特征等关系密切。冠层的动力学效应主要表现为建筑物对气流的拖曳作用,使得更多的平均动能向湍流发展,进而对微环境过程产生明显的影响。本文基于二维GIS和建筑物高程数据重建冠层实体模型,给出了冠层几何建模和空间连续场离散表达的主要技术流程(见图2)。其中,每个建筑物体素 V_i 由表征其坐落位置的多边形 P_i 和顶部高程属性 H_i 表示为 $\langle P_i, H_i \rangle$ 。一个建筑物对象可以是单一体素,也可能是多个体素的综合体,可根据高程数据拉伸多边形进行三维重建,并通过空间布尔运算进行多面体的合并处理。鉴于模拟计算的复杂性,建模过程中剔除面积或高度小于给定阈值(B_a, B_h)的建筑物体素,对多边形对象进行几何简化,并合并部分邻近的多边形,以获取尽可能简洁的冠层实体模型。对连续场的离散遵循Delaunay准则。首先,在冠层表面生成连续覆盖的三角网,其次,采用约束Delaunay四面体单元对整个三维流体区域进行离散剖分,详细方法可

参见文献[14]。

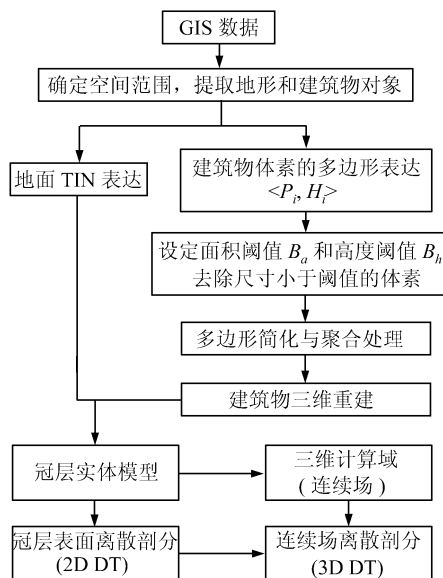


图2 冠层实体建模与连续场离散表达

Fig.2 Street Canyon Modeling and Continuous Field Tessellation

1.2 扩散数值模型

城市冠层中的流动大多是紊流,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,本文采用雷诺平均程和 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型描述街区建筑物周围的大气流动,气体浓度扩散则由以下组分守恒方程^[18]求解:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_t \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S \quad (1)$$

式中, t 表示时间; x_j ($j=1, 2, 3$)表示笛卡尔坐标系中第 j 方向的坐标值; u_j 为 j 方向上的速度分量; ρ 为流体密度; C 为毒气浓度; S 为污染源项; D_t 为湍流扩散系数。湍流模型常数取为: $k=0.039, \epsilon=0.19, C_\mu=0.0845, C_1=1.42, C_2=1.68$ 。来流风速采用幂指数率计算,壁面边界采用固壁无滑移假设,通过局部网格加密和标准壁面函数处理。数值模拟选用开源CFD软件OpenFOAM 2.0,并通过标准IGES数据格式支持GIS模型数据的读取与转换。

1.3 可视化分析

Delaunay网格的几何和拓扑特征为三维数据场的可视化和空间分析提供了便利。数值模拟过程中,各网格单元节点被赋予所需计算参数,并存储不同时间节点的流速、浓度等数值结果。通过空间数据集“切片”^[9]和自然邻接点插值方法,可以提取、生成任意剖面某特定时刻的速度矢量分布和浓度等值线图;还可以查询、分析场中任意位置的浓度历时曲线;或者以三维透视图的方式

生成浓度曲面图,并通过比较不同时刻的浓度场分布,直观分析街区环境中气云的演进过程和特性。

2 实验与分析

2.1 实验数据

以文献[14]中的英国伦敦 Marylebone 街区为例,模拟建筑群环境中的点源污染扩散。图 3 给出了实验区主要街道和建筑物分布、高程等基本信息,区内地形平坦,建筑物平均高度约为 22 m。泄漏点源(S_r)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,模拟时段长 1 600 s,期间来流风速 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风向与 Marylebone 大道夹角 45° ,为西南风。

2.2 模拟结果与分析

硫化氢气体泄漏后受风力和负向浮力作用在建筑物周围蔓延扩散,对周边人群生命安全构成威胁。图 4 给出了 3 个不同时刻(180 s、900 s、1 200 s)街区建筑群中毒气的扩散范围与近地面浓度场分布。其中,图 4(a)、4(b)、4(c) 以三维透视图方式表示了浓度大于 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的气云及其随时间的变化过程,图 4(d)、4(e)、4(f) 则是相应时刻地面行人呼吸高度(1.5 m)的浓度等值线

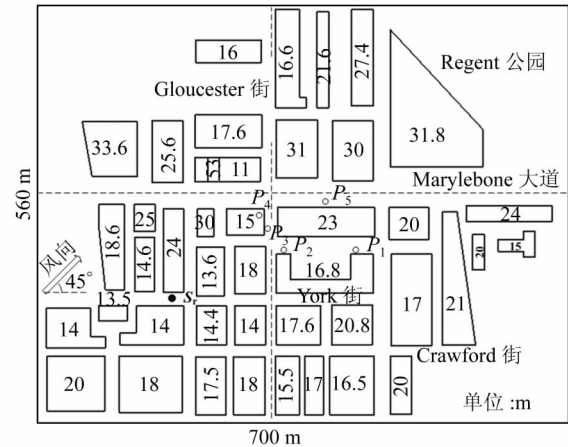


图 3 实验区建筑物布局

Fig. 3 Building Arrangement of Studied Area

图。由图 4 中结果可见,气体泄漏后主要沿下风向街谷迁移扩散,受建筑物阻挡后气云爬升或绕过障碍物并继续扩散,至 $t = 80 \text{ s}$ 时,气云前端已越过 Marylebone 大道,泄漏源附近交叉路口处浓度高达 $500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,为高度危险区(图 4(a)、图 4(d)); $t = 900 \text{ s}$ 时泄漏停止,此时气云已覆盖下风向建筑区域,抵至 Regent 公园(图 4(b)、图 4(e)); $t = 1 200 \text{ s}$,气云因被动扩散浓度迅速下降,并整体往下风向迁移,泄漏源附近街巷中原高浓度区已经消退(图 4(c)、图 4(f))。

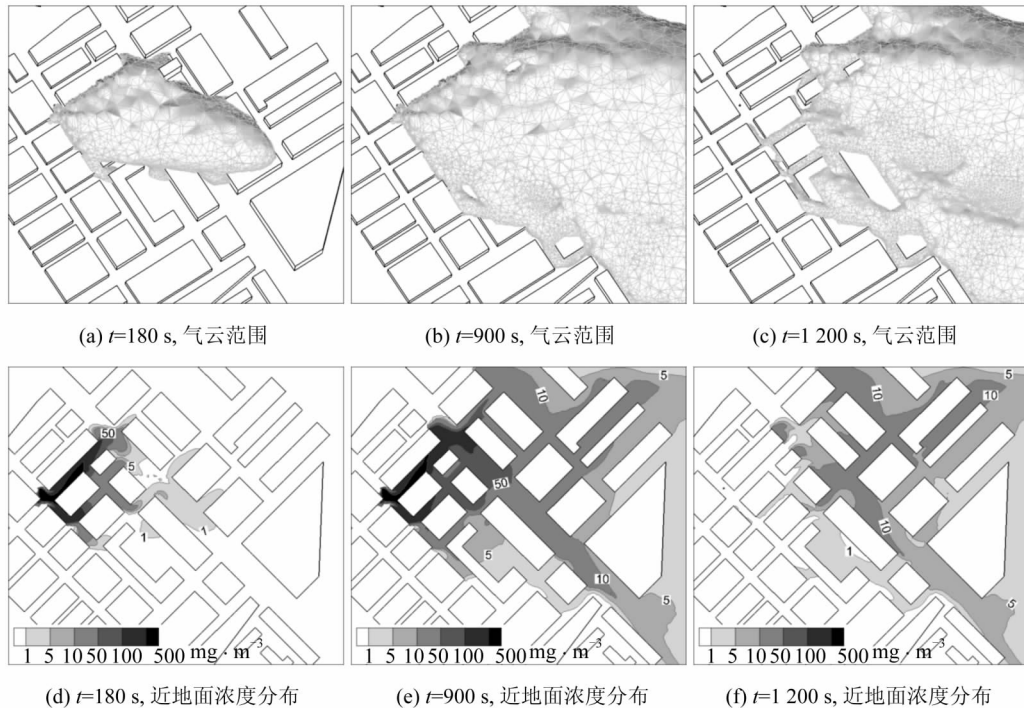


图 4 气云扩散与近地面浓度分布

Fig. 4 Plume Propagation and Near-surface Concentration Distributions

为进一步分析建筑物周围的浓度分布特性,在下风向选定 $P_1 \sim P_5$ 5 个测点,其中, P_4 位于建筑物顶部,高 15 m,其余 4 点位于近地面街道之中,高 1.5 m(见图 3)。表 1 给出了 5 个测点同泄漏源的位置关系及其最大模拟浓度。其中, R_1 为点-源在地平面上的直线投影距离, R_2 为沿道路的折线距离, θ 为点-源连线同主风向的夹角,即风向偏离度, C 为测点在整个模拟期间的最大计算浓度。图 5 给出了 5 个测点的浓度历时曲线。

表 1 点-源位置关系与最大模拟浓度

Tab. 1 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	与风向夹角 $\theta/(\circ)$	最大浓度 $C/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$
P_1	200	250	38	3.34
P_2	120	160	28	7.13
P_3	115	150	2	58.35
P_4	115	150	2	27.08
P_5	200	280	14	24.68

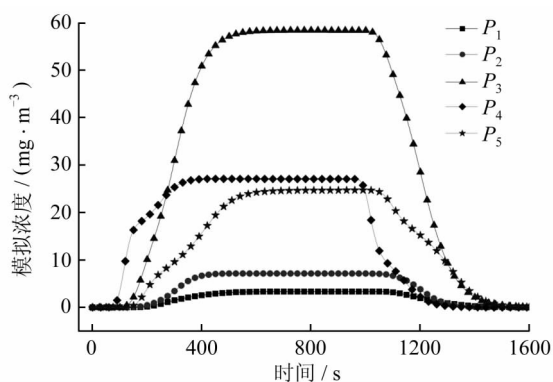


图 5 测点浓度变化曲线

Fig. 5 Concentration Curves of Sampling Points

表 1 及图 5 的结果表明,街区中各测点的浓度与其同泄漏源的位置关系和风向偏离程度有着密切联系。 P_1 、 P_2 由于偏离主风向,在整个模拟期间浓度基本上小于 $7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 P_5 到泄漏源的距离与 P_1 相近,但计算浓度为 P_1 的 7~10 倍,同样, P_3 的计算浓度也远高于 P_2 。此外,建筑物背风面 P_3 的峰值浓度明显高于建筑物顶部的邻近测点 P_4 。不过,在扩散初期由于气云遇建筑物阻碍后爬升,出现后者浓度高于前者的情形。泄漏停止 600 s 后($t=1500 \text{ s}$),各测点气体浓度因被动扩散基本上趋于 0;位于建筑物顶部的测点 P_4 由于较大的流速浓度下降较快,而街谷内各近地面测点气体滞留时间相对较长,可能构成潜在风险。

限于篇幅,本文只给出了 3 个典型时刻的气云扩散范围和近地面浓度场,利用有限的测点数

据初步分析了建筑物周围浓度时空分布的特性。通过空间数据集“切片”,可以提取任意剖面上的浓度时间序列,结合详实的建筑物信息模型和人口分布信息,可以进行定量的毒气暴露分析。

3 结 语

实验研究表明, GIS 和 CFD 模型的耦合应用,能够有效解决街区扩散过程中三维动态连续场的表达、模拟与可视化,能够较好地揭示建筑群中气云扩散和浓度时空分布的特征。近地面气云输运受建筑物布局影响显著,建筑物周围毒气浓度同该处源距、方位、高度以及来流风向偏离程度存在密切联系,泄漏停止后建筑群中气体滞留时间较长,不利于浓度稀释扩散。

后续研究将结合建筑物信息模型,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] Zheng M H, Jin M, Qiao G, et al. Modelling and Simulation of Dynamic Diffusion Process in Urban Streets [C]. ISPRS Workshop on Dynamic and Multi-dimensional GIS, Shanghai, 2011
- [2] 陈军, 蒋捷. 多维动态 GIS 的空间数据建模、处理与分析[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(3): 189-195
- [3] 胡鹏, 李圣权, 亢江妹. 空间数据问题与 GIS 发展的思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(9): 796-880
- [4] Wang X H. Integrating GIS, Simulation Models, and Visualization in Traffic Impact analysis [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2005, 29(4): 471-496
- [5] 艾廷华. DELAUNAY 三角网支持下的空间场表达 [J]. 测绘学报, 2006, 35(1): 71-76
- [6] Ledoux H, Gold C M. Modelling Three-dimensional Geoscientific Fields with the Voronoi Diagram and Its Dual [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008, 22(5): 547-574
- [7] Mostafavi M A, Gold C M. A Global Spatial Data Structure for Marine Simulation [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18(3): 211-227
- [8] Beni L H, Mostafavi M A, Pouliot J, et al. Towards 3D Spatial Dynamic Field Simulation Within GIS Using Kinetic Voronoi Diagram and Delaunay

- Tetrahedralization[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2011, 25 (1): 25-30
- [9] Stoter J, Kluijver H D, Kurakula V. 3D Noise Mapping in Urban Areas[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2008, 22 (8): 907-924
- [10] Pullen J, Borins J P, Young T, et al. A Comparison of Contaminant Plume Statistics from a Gaussian Puff and Urban CFD Model for Two Large Cities [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39 (6): 1 049-1 068
- [11] Xie Z T, Castro I P. Large-eddy Simulation for Flow and Dispersion in Urban Streets[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(13): 2 174-2 185
- [12] Martin D, Nickless G, Price C S, et al. Urban Tracer Dispersion Experiment in London (DAP-PLE) 2003: Field Study and Comparison with Empirical Prediction[J]. Atmospheric Science Letters, 2010, 11(4): 241-248
- [13] Donnelly R P, Lyons T J, Flassak T. Evaluation of Results of a Numerical Simulation of Dispersion in an Idealized Urban Area for Emergency Response Modeling[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43 (29): 4 416-4 423
- [14] Du Q, Wang D S. Constrained Boundary Recovery for Three Dimensional Delaunay Triangulations[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61(9): 1 471-1 500
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004
- 第一作者简介:郑茂辉, 博士, 讲师。主要研究方向为多维地理信息系统, 环境过程模拟与分析。
E-mail: zmh@tongji. edu. cn

Modeling and Simulation of Toxic Gas Dispersion in Urban Streets Supported by GIS

ZHENG Maohui¹ JIN Min¹ GUO Fei²

(1 Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

(2 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education,
1 Wenyuan Road, Nanjing 210046, China)

Abstract: An integrated approach incorporating computational fluid dynamics (CFD) and GIS technologies is explored to model and simulate the movement characteristics of released gases and the concentration distribution around buildings at the street level. Some key technologies including street canyon modeling, continuous field representation, numerical simulation and visualization of gas dispersion are presented. As a case study, a hypothetical continuous release from a point source is modeled and simulated. The results show that, the proposed approach is able to predict the 3D and dynamic dispersion process in urban streets. The time-varying concentration distributions near the ground highlight the influences of building arrangement on the dispersion. The sampling concentrations around buildings are strongly affected by the positions of sampling points relative to source, including difference in height, distance from the source, and angle from wind direction. The results also confirm that, in the streets the hazardous gas may stay longer, which constitutes a threat to public health and safety.

Key words: toxic gas dispersion; CFD Model; spatial continuous field; visualization; street level

About the first author: ZHENG Maohui, Ph. D, lecturer, majors in multi-dimensional geographic information system and environmental process simulation.

E-mail: zmh@tongji. edu. cn