



CSTAM 2012-B03-0004

## 城市大气环境的大涡模拟研究

刘玉石 崔桂香 张兆顺

清华大学航天航空学院工程力学系

### 第七届全国流体力学学术会议

2012年11月12—14日 广西·桂林

# 城市大气环境的大涡模拟研究

刘玉石, 崔桂香\*, 张兆顺

清华大学航天航空学院, 北京, 100084

**摘要:** 本文介绍城市大气环境的大涡模拟方法。城市大气环境不仅有复杂的地面几何形状, 如建筑物、植被等; 还有地表的物理过程, 如蒸发、辐射。城市大气流动处于大气边界层内, 受控于中尺度大气边界层运动。本文介绍作者提出的中尺度气象模式和 LES 耦合模拟城市小区大气运动的方法, 以北京宝联小区为典型计算区域, 模拟了大气流动和交通污染的日变化过程, 并分析了风场、温度场和浓度场特征。

**关键词:** 城市大气环境, 大涡模拟, 多尺度耦合

## 引言

城市大气环境是当前社会关注的热点之一。随着现代城市规模的扩大和城市人口数量的增加, 逐渐恶化的城市大气环境对居民的生活环境和生命健康具有越来越重要的负面作用。为了控制城市大气污染和大气环境保护提供指导, 需要对城市大气环境深入研究。

实际城市小区大气环境具有多尺度、下垫面复杂和多物理过程的特点(Britter et al. 2003; Fernando, 2010)。城市大气流动处于大气边界层内, 受控于中尺度大气边界层运动, 是复杂的多尺度湍流运动。城市下垫面具有复杂几何特征, 明显的特点是具有大量集中的建筑、道路和桥梁, 还有绿地、树木和水体等。因此, 城市大气环境具有复杂的动力学和热力学的物理过程, 还有水汽扩散、可吸入颗粒扩散和有害气体光化学反应等。这些特点都加大了城市大气环境研究的难度。

城市大气环境的研究方法主要是室外观测、实验室实验和数值研究。数值研究具有成本低廉, 易于控制模拟条件和便于重复等优点, 目前已经成为研究城市大气微环境问题的主要手段之一。环境工程中的数值研究目前主要集中在雷诺平均模式(RANS), 已经取得了较为丰富的研究成果(Coirier et al. 2005; Coirier et al. 2006; Chan et al. 2007;

Flaherty et al. 2007)。大涡模拟方法(LES)近年也成功应用到城市大气环境研究中, 大涡模拟的优势在于可以得到湍流大尺度脉动的信息, 可以模拟非定常湍流大尺度的瞬时场, 可用于模拟非定常污染物扩散过程, 而且可以获得比 RANS 分辨率高的数据, 是目前模拟大气环境问题最有应用前景的数值模拟方法(蒋维楣等 2004)。目前大涡模拟已经成功应用于实际城市小区的中性大气条件下风场、浓度场模拟, 如纽约(Camelli et al. 2005; Patnaik et al. 2007), 巴尔的摩(Tseng et al. 2006), 澳门(史瑞丰等, 2008), 瑞士洛桑(Bou-Zeid et al., 2009), 伦敦(Xie et al. 2009; Xie, 2011)和蒙特利尔(Gousseau et al. 2011)。中性大气条件下 LES 模拟的速度场、浓度场和雷诺应力等湍流统计量与风洞实验数据符合较好, 显示 LES 对复杂街区内流动具有较好的模拟能力。当前研究的重点之一是提高 LES 对实际城市非中性大气条件非定常风场、浓度场和温度场的预测能力, 而且考虑多尺度耦合是需要进一步深入研究的课题。

本文采用中尺度气象模式 WRF(Weather Research and Forecasting)与微尺度 LES 耦合的方法, 考虑地表换热、太阳辐射等物理过程, 模拟实际城市小区大气流动和交通污染扩散过程, 研究多尺度耦合大涡模拟方法的可行性, 分析城市小区大气的流动特征。

1) 资金资助项目(国家基金 11132005, 科技部支撑 2011BAK07B01-03)

2) 联系作者 Email: cgx@mail.tsinghua.edu.cn

## 1 数学模型与数值方法

城市小区尺度的大气流动属于低速大气运动, 满足不可压缩 Navier-Stocks 方程组, 地球自转引起的科氏力可以忽略, 大气温差引起的浮力采用 Boussinesq 假设计算。本文研究的污染物作为被动标量处理, 温度作为主动标量, 满足标量输运方程。将 Navier-stokes 方程和标量输运方程分别进行过滤得到以下大涡模拟控制方程

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

\\* MERGEFORMAT (1.1)

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\bar{\theta} - \bar{\theta}_0}{\theta_0} g \delta_{i3} + \bar{f}_i$$

\\* MERGEFORMAT (1.2)

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = D \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{cj}}{\partial x_j} + \bar{S}_c$$

\\* MERGEFORMAT (1.3)

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \kappa \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial \tau_{\theta j}}{\partial x_j} + \bar{S}_\theta$$

\\* MERGEFORMAT (1.4)

其中方程(1.1)–(1.4)分别为过滤后的连续方程、动量方程、浓度输运方程和温度输运方程。其中  $c$  和  $\theta$  分别代表可解尺度的浓度和温度,  $D$  和  $\kappa$  为分子质量扩散系数和热扩散系数;  $\bar{S}_c$  和  $\bar{S}_\theta$  是污染源和热源,  $\bar{f}_i$  为附加力。在方程(1.2)中,  $\bar{\theta}_0$  为参考温度, 并采用 Boussinesq 假设计算由温差引起的浮力。在方程(1.2)中,  $\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j$  为亚格子应力; 在方程 (1.3) 和 (1.4) 中,  $\tau_{cj} = \overline{c u_j} - \bar{c} \bar{u}_j$  和  $\tau_{\theta j} = \overline{\theta u_j} - \bar{\theta} \bar{u}_j$  分别为亚格子质量通量和亚格子热通量。本文采用高精度有限体积法离散 LES 控制方程, 应用 Lagrangian 动力模式封闭亚格子应力项、涡扩散模式封闭亚格子标量通量。

浓度在固壁满足零梯度条件, 进口边界提零梯度条件, 出口满足无反射条件; 温度在固壁给第一类边界条件, 其中地表和建筑固

壁表面温度分布采用热平衡关系确定(Noilhan et al,1989)。

本文采用组合模拟处理复杂的城市下垫面, 即, 将计算区域划分为重点关心区域和非重点区域, 在重点区域采用精细网格分辨建筑几何形状, 在非重点区域将建筑物作为粗糙元处理, 采用较粗网格。组合模型是针对计算量和模拟精度矛盾提出的折中方案, 其优势在于既能够在重点关注的区域获得足够精细的结果, 又具有适当的网格总量和计算量。在重点关注区域采用浸没边界法满足建筑表面无滑移边界条件(Tseng et al,2003), 在非重点关注区域采用阻力元处理建筑群的阻力效应(Belcher et al,2003)。

城市小区大气湍流的多尺度特点突出地体现在精细 LES 计算区域的侧向和顶部边界, 其非定常风矢量和温度边界条件中, 本文采用与中尺度气象模式 WRF 多层嵌套的计算结果耦合地方法模拟。WRF 模式是新一代中尺度气象数值预报系统, 对风速、风温等具有较高的模拟精度, 目前已经广泛应用于中尺度大气业务预报和科学研究(Skamarock et al,2008)。

## 2 计算域与计算条件

中尺度大气模式 WRF 和 LES 多尺度耦合模拟北京城市小区大气环境。图 1 是多尺度耦合的示意图, 其中 WRF 的计算域如图 1 (a) 所示, 5 层嵌套网格中心是本文考察的交通污染的地区, 水平网格为 500m×500m。WRF 计算的风速和温度通过数值插值作为 LES 计算的边界条件, 在 LES 计算域中重点考察污染扩散地区是图 1 (b) 中白色框中的北京市宝联小区。LES 计算域为 2300×1900×1000 米, 相应的网格数量为 138×118×51, 计算的时间为 2009 年 10 月 26 日 9 点至 27 日 8 点。

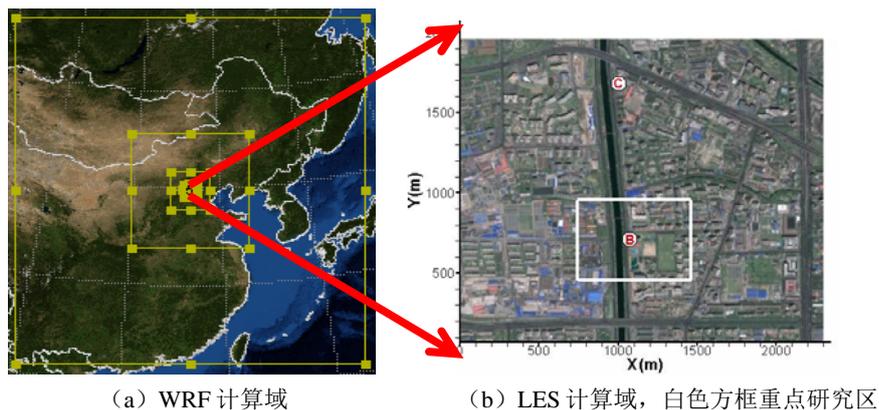


图1 中尺度 WRF 和 LES 耦合的示意图

交通污染由实测道路机动车排气系数的日变化曲线  $k(t)$ , 见图 2, 具体道路排气量用峰值排气量乘以排气系数  $q(t)=q_{max}k(t)$ , 交通污染作为面源设置在离地 1m 的街道上, 其中  $q_{max}=0.16\text{mgm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (孟健等, 2006)

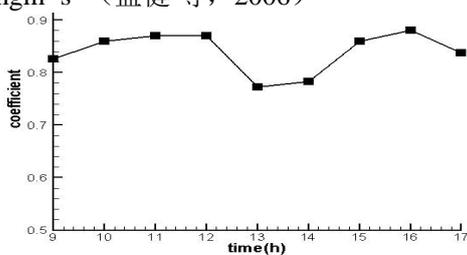
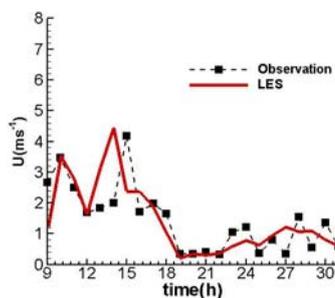


图2 机动车排气系数曲线

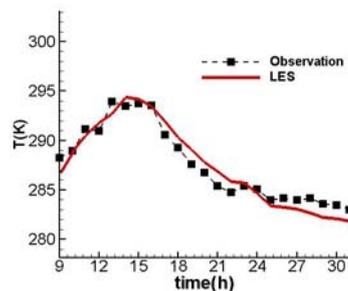
### 3 结果分析

#### 3.1 计算结果

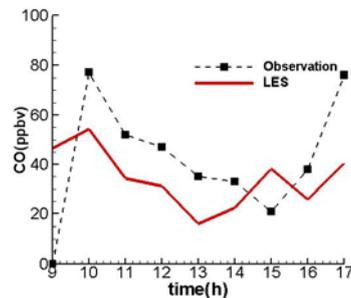
图 3 是本文方法预测的宝联小区的风速、风温和 CO 的浓度, 并与位于该小区的观测结果比较。



(a) 速度



(b) 温度



(c) CO 浓度

图3 数值预测的风速、风温和 CO 浓度 (实线), 宝联观测站的数据 (符号)

从图 3 可以看到, 数值预测结果和观测结果符合良好。在上午 9 时观测站的 CO 浓度为零, 这显然是测量仪器的错误。预测的 CO 浓度总体偏低, 这是由于排放系数曲线和观测的当天有所差别。另外风速、风温都有 24 小时的计算结果比较; 而 CO 浓度只有白天的计算结果比较, 因为机动车排放系数只有白天的实测结果。由于大气环境的复杂性, 不可测因素多, 对于预测结果精度的评估, 除了可从计算结果的数据曲线上比较, 还常用统计参数衡

量。本文选取常用的 RMSE, FAC2 和 HR 作为典型统计参数衡量模拟精度, 其定义分别是:

$$RMSE = \sqrt{\langle (P - O)^2 \rangle}$$

$$FAC2 = \text{总数据中满足 } 0.5 \leq \frac{P}{O} \leq 2.0 \text{ 的比例}$$

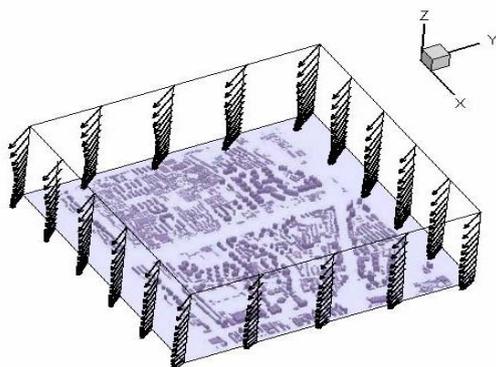
$$HR = \text{总数据中满足 } |P - O| < r \text{ 的比例}$$

式中 P 代表计算值, O 代表观测值, 统计结果如表 1 所示, 其中 HR 的阈值 r 的取值为: 风速  $1.5\text{ms}^{-1}$ , 风温 2K, CO 浓度 40ppbv。从统计结果看出, 本文模拟的结果整体精度较高, 验证了本文数值方法的可靠性。

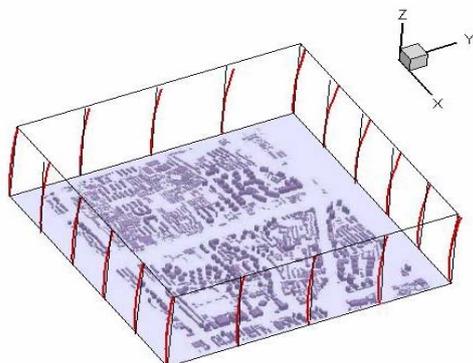
表 1. 误差统计量

统计量	宝联观测站		
	速度(m/s)	温度(K)	浓度(ppbv)
RMSE	0.83	1.04	24.58
FAC2	0.87	1.00	0.78
HR	0.91	1.00	0.89

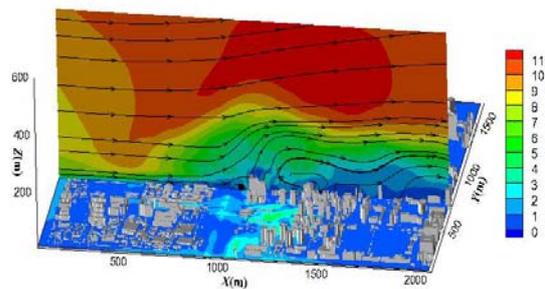
### 3. 2 流场分析



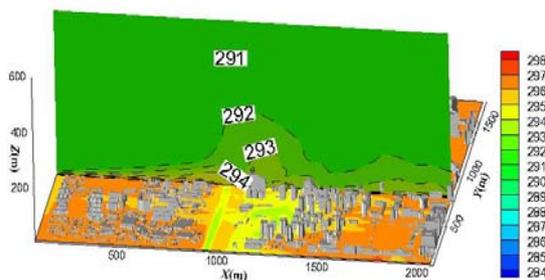
(a) 侧向边界WRF速度剖面



(b) 侧向边界 WRF 温度剖面



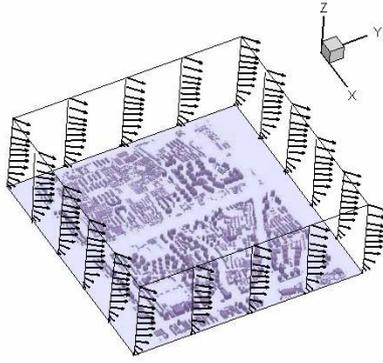
(c) LES 模拟速度场,单位 m/s



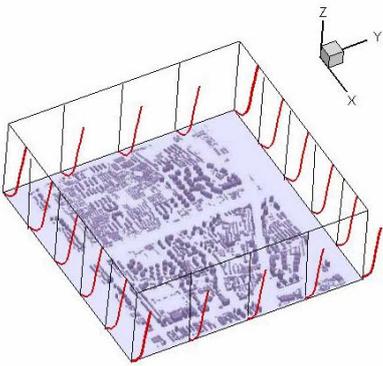
(d) LES 模拟温度场, 单位 K

图 4 下午 2 点侧边界条件与 LES 模拟结果

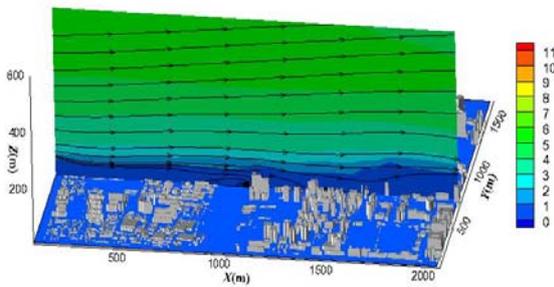
图 4(a)与图 4(b)分别显示了下午 2 点计算域侧向边界处 WRF 模拟的速度和温度剖面, 图 4(c)与图 4(d)分别是计算域内 LES 模拟的速度场和温度场, 其中 XZ 截面位于  $Y=820\text{m}$  位置。从图 4(a)可以看出, 在该时刻计算域内主流风向为西北风。在图 4(c)中可以看出地面 600 米以上高空有高达  $10\text{m/s}$  的较大风速, 在地面附近有明显的垂直方向对流, 在高建筑附近尤其明显, 而且速度极不均匀。图 4(d)显示了地面附近空气温度以及垂直方向温度分布, 可以看出地面在该时刻受到强烈太阳辐射作用温度升高, 而且随着高度的增加温度逐渐降低, 在较高的位置存在温度变化很小的区域, 该区域是由于白天不稳定状态垂直方向掺混作用而形成的。近地面的温度分布非常不均匀和风速的不均匀分布有紧密联系。可看出在速度较大的区域由于地表感热的影响, 温度比较低, 反之, 速度较小的区域地面附近空气温度较高。此外从图 4(d)可以看出位于昆玉河上方的空气温度比周围地面空气温度要低, 由于水体热容较大, 导致河流上方空气升温比地面要慢, 可以看出水体对周围的局部温度场有一定的影响。



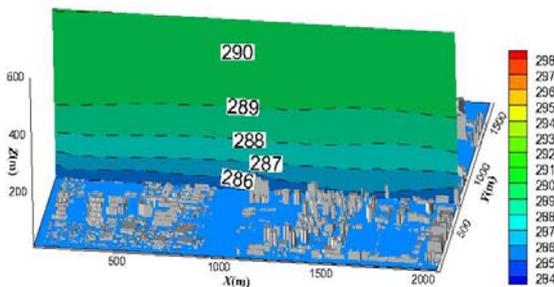
(a) 侧向边界WRF速度剖面



(b) 侧向边界WRF温度剖面

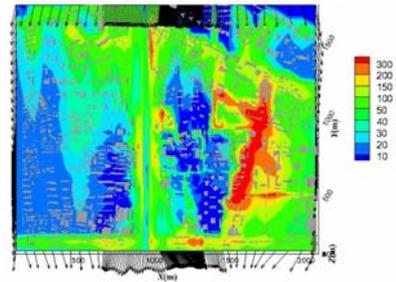


(c) LES模拟速度场,单位 m/s

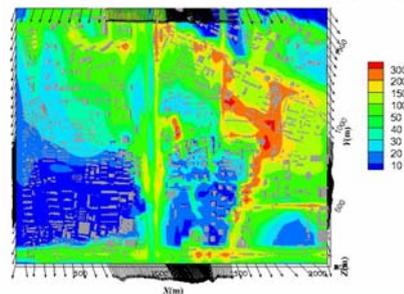


(d) LES模拟温度场, 单位 K

图 5(a)与图 5(b)分别是夜间 11 点计算域侧向边界处 WRF 模拟的速度和温度剖面, 图 5(c)与图 5(d)分别给出的是计算域内 LES 模拟的速度场和温度场。从图 5(a)可以看出, 在该时刻主流风向为西南风, 与下午 2 点的西北风向有明显的改变, 另外该时刻主流风速较下午 2 点明显减小。由于夜间浮力效应抑制垂直方向对流, 导致垂直截面的流线分布比较平滑, 与下午 2 点流线分布区别很大。由于夜间太阳短波辐射消失, 地表长波辐射作用导致地面温度降低, 同时随着高度增加空气温度逐渐增加, 具有明显的夜间稳定大气边界层温度分层效应。注意到地面空气温度从下午 2 点的 298K 下降到夜间 11 点 284K, 温度减小达到 14K, 但是在高空位置温度从下午 2 点 291K 下降到夜间 11 点 290K, 仅仅下降 1K。这是由于大气从不稳定状态变为稳定状态, 高空掺混层温度受到地面降温影响很弱, 在夜间转变为残留层, 导致温度值日变化比较小。

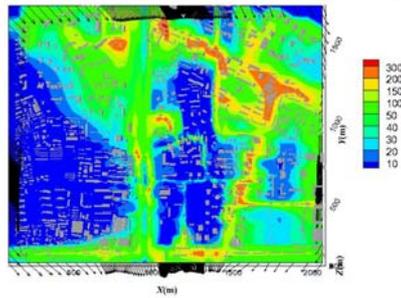


(a) 上午10点

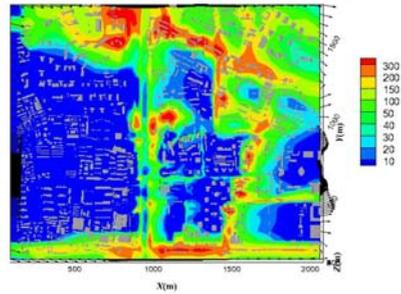


(b) 上午12点

图5 下午11点侧边界条件与LES模拟结果



(c) 下午14点



(d) 下午16点

图6 不同时刻地面一氧化碳浓度分布, 单位ppbv

交通污染物在城市居民小区内的浓度分布是大气环境重点关心的问题之一。下面分析在人行高度2米处一氧化碳浓度分布的时空变化。图6分别显示了上午10点, 上午12点, 下午14点和下午16点四个不同时刻在地面附近的一氧化碳浓度分布以及边界主流风向。从6(a)可以看出, 在上午10点主流风向为北风, 污染物受到北风影响向南扩散, 其中道路周围的浓度较高, 是污染较为严重的区域。如图6(b), 在上午12点主流风向和10点的主流风向变化较小, 仍然为北风, 污染物主要向南扩散, 而且由于扩散的时间较长, 受到污染物影响的区域比上午10点要大。如图6(c)所示, 在14点主流风向与上午发生了较大变化, 从北风变为西北风, 受风向变化的影响, 污染物主要扩散方向变为东南方向, 在14点时刻某些区域污染物浓度减小, 环境有所改善。如图6(d)所示, 在16点, 主流风向主要为西风向, 污染物主要向东部扩散, 昆玉河西侧浓度较高的区域面积有所减小

## 4 结论

本文采用中尺度气象模式WRF与大涡模拟LES耦合的方法, 以北京宝联小区为典型计算区域, 较为精细的模拟了实际气象条件下风场、温度场和浓度场的日变化过程, 模拟结果和观测数据符合良好, 通过分析不同时刻主流风向、太阳辐射等对流场、温度场和浓度场的影响, 证实计算中考虑多尺度效应和多物理过程对模拟实际城市小区大气环境的重要性。实际算例表明, 本文的单向多尺度耦合方法能够实现城市小区复杂大气湍流和污染物扩散过程较准确的模拟。

## 参考文献

- 蒋维楣, 苗世光. 大涡模拟与大气边界层研究—30年回顾与展望. 自然科学进展, 2004, 14(1):11-19.
- 孟健, 付桦, 赵晓林等. 北京西三环路分时段车流量分析. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2006, 27(2):89-98.
- Britter R E, Hanna S R. Flow and dispersion in urban areas. *Annu Rev Fluid Mech*, 2003, 35(1):469-496.
- Belcher S E, Jerram N, Hunt J C R. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements. *J Fluid Mech*, 2003, 488:369-398.
- Bou-Zeid E, Overney J, Rogers B D. The effects of buildings representation and clustering in large eddy simulation of flows in urban canopies. *Bound-Lay Meteorol*, 2009, 132:415-436.
- Coirier W J, Fricker D M, Furmaczyk M, et al. A computational fluid dynamics approach for urban area transport and dispersion modeling. *Environ Fluid Mech*, 2005, 5:443-479.
- Coirier W J, Kim S. CFD modeling for urban area contaminant transport and dispersion: model description and data requirements. *Sixth Symposium on the Urban Environment*, 2006.
- Chan S T, Leach M J. A validation of FEM3MP with joint urban 2003 data. *J Appl Meteorol Clim*, 2007, 46: 2127-2146.
- Camelli F E, Löhner R., Hanna S R. Dispersion patterns in a heterogeneous urban area. Larreteguy A. (Ed.), *Mecánica Computacional*, Buenos Aires, Argentina, 2005, XXIV:1339-1354.
- Flaherty J E, Stock D, Lamb B. Computational fluid dynamic simulation of plume dispersion in urban Oklahoma city. *J Appl Meteorol Clim*, 2007, 46:2110-2126.
- Fernando H J S. Flow dynamics of urban atmospheres in complex terrain. *Annu Rev Fluid Mech*, 2010, 42:365-389.

- Gousseau P, Blocken B, Stathopoulos T, et al. CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: a case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal. *Atmo Environ*, 2011, 45:428-438.
- Patnaik G, Boris J P, Young T R. Large scale urban contaminant transport simulations with Miles. *J Fluid Eng*, 2007, 129:1524-1532.
- Noilhan J, Planton S. A simple parameterization of land surface process for meteorological models. *Mon Weather Rev*, 1989, 117:536-549.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the Advanced Research WRF version 3. National Center for Atmospheric Research, 2008.
- Tseng Y H, Meneveau C, Parlange M B. Modeling flow around bluff bodies and predicting urban dispersion using large eddy simulation. *Environ Sci Technol*, 2006, 40:2653 -2662.
- Tseng Y H, Ferziger J H. A ghost-cell immersed boundary method for flow in complex geometry. *J Comput Phys*, 2003, 192:593 -623.
- Xie Z T, Castro I P. Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets. *Atmos Environ*, 2009, 43:2174-2185.
- Xie Z T. Modelling street-scale flow and dispersion in realistic winds – towards coupling with mesoscale meteorological models. *Bound-Lay Meteorol*, 2011, 141:53-75.

## LARGE EDDY SIMULATION OF URBAN ATMOSPHERIC ENVIRONMENT

LIU Yushi   CUI Guixiang   ZHANG Zhaoshun

( School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract** This paper presents the large eddy simulation of urban atmospheric environment. In the urban area there is complex underlying surface with buildings and plants, and there is also complex physical process including evaporation and radiation. The urban airflow is within the planetary boundary layer and it is impacted by mesoscale atmospheric motion. This paper proposes the multi-scale large eddy simulation coupled with mesoscale model for urban micro-atmospheric environment. The proposed approach is adopted to study the wind field and traffic pollutant of Baolian district in Beijing and the wind field, temperature field and pollutant concentration field are carefully analyzed.

**Key words** urban atmospheric environment, large eddy simulation, multi-scale coupling method