

CFD技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用

李磊¹ 胡非² 刘京³

(1 深圳市气象局深圳市国家气候气象台, 深圳 518040; 2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 3 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 从城市风环境、热环境及空气污染等多个方面回顾了计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 技术在我国城市气候环境微尺度问题有关研究中的应用。通过回顾可发现, 当城市气候环境研究着眼于城市街区尺度和城市冠层内部时, CFD可充分发挥其描述复杂几何形体的能力, 给出街区内部的热力、动力以及物质扩散的细节, 具有中尺度模式难以比拟的优势。我国在本领域的研究起步较晚, 但近二十年来由于高速城市化进程所激发的强烈需求而发展迅速, 已有大量研究在此领域开展并取得成果。未来随着高性能计算机计算能力的逐渐提高, CFD有望在大气环境质量预报、机场风切变预报以及风能评估等多个领域中投入业务应用。

关键词: 计算流体力学, 城市气候环境, 微尺度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.004

Application of CFD Technique on Micro-Scale Issues in Urban Climatic Environment Researches in China

Li Lei¹, Hu Fei², Liu Jing³

(1 Shenzhen National Climate Observatory, Municipal Meteorological Bureau of Shenzhen, Shenzhen 518040

2 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 School of Municipal Environment Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: Covering such aspects as urban wind environment, urban thermal environment and air pollution, the application of computational fluid dynamics (CFD) technique is reviewed on the micro-scale issues in urban climatic environment researches in China. Through the review it is found that when urban climatic environment researches focus on the urban neighborhood scale and focus on the phenomena within the urban canopy layer, CFD technique has special capabilities in describing complex geometries and provides the details of thermal, dynamic and diffusion processes within the urban blocks, which cannot be realized by meso-scale models. Generally speaking, the initiation of researches in this field in China is relatively late, but the progress made over the last 20 years is quite rapid and the achievements in this field are quite productive due to the strong demand inspired by the rapid urbanization process of China. In the future, along with the improvement of the capability of high performance computer, it is expected that CFD technique will be applied in many operational jobs, such as atmospheric environment forecasting, wind shear forecasting in airports and wind energy assessment.

Keywords: computational fluid dynamics (CFD), urban climatic environment, micro-scale

0 引言

近30年来, 我国经历了快速的城市化进程, 根据中国社会科学院发布的《城市蓝皮书: 中国城市发展报告》, 2011年我国城镇人口已达到6.91亿人, 城

镇化率达到了51.27%。快速的城市化进程, 对我国城市气候和环境造成了明显的影响, 为缓解城市化在气候环境方面的不利影响, 为政府决策部门提供科技支撑, 近年来国内在城市气候环境科学领域展开了大量研究, 并取得了丰硕的成果^[1-5]。

城市气候环境虽然仅是大气科学中的一个分支, 但也包含非常丰富的研究内容, 当前广义的城市气候环境问题已经从早期的“五岛”(热岛、雨岛、混浊岛、干岛和湿岛)效应拓展到整个城市边界层的大气

收稿日期: 2014年1月2日; 修回日期: 2014年3月9日

第一作者: 李磊(1977—), Email: chonp@163.com

资助信息: 国家自然科学基金项目(51278308); 城市气象科学研究基金(UMRF2013(LH)05)

物理环境与化学环境问题，其本身也包含了若干更细的分支。近20年来，有大量研究集中在城市冠层内的微尺度问题上。城市冠层内的微尺度问题，指空间尺度从几米到十千米范围内的问题。从数值模拟角度而言，在这个尺度范围内科里奥利（Coriolis）力不再重要，但对于几何形态复杂的下垫面，不能再简单地通过参数化来解决，必须通过足够复杂而精确的边界条件来描述。对于中尺度大气问题来说，城市的影响可以通过添加人工热源和改变计算网格的动力学粗糙度来解决^[2]，但对于深入城市冠层内部的微尺度问题，则必须考虑另外的方法。

计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）是一种研究流体热-动力学问题的技术，利用CFD建立研究对象的计算模型，将流体动力学应用于该模型进行计算，可以分析流体在该模型上的动力学和热力学行为。由于具有一些中尺度模式不具备的特点，CFD已被广泛应用于与城市冠层内微尺度问题有关的研究，本文对国内在这一领域的研究工作做了详细回顾。

1 CFD技术的特点

由于以研究流体流动为核心任务，CFD技术的核心内容是大气科学工作者都非常熟悉的纳维-斯托克斯（Navier-Stokes）方程组，以及围绕如何数值求解纳维-斯托克斯方程组的一系列算法方案。但是它通常还包括一些大气科学工作者较少使用的技术，如CAD（computer aided design）建模技术、非结构化网格划分技术，以及结果可视化显示技术等^[6]，在数值求解方面CFD则使用了有限体积法（finite volume method, FVM）。有限差分法、有限元法和有限体积法等均属于空间离散化方法（spatial discretization method），但有限体积法更适用于非结构化网格，有助于在模拟中刻画复杂几何形体。这些特点，使得CFD能够被用于与城市冠层内微尺度问题有关的研究。同时，值得特别指出的是，由于经常被用于城市微尺度问题，CFD本身也成为微尺度的代名词，国外有些学者专门提出了CFD尺度（CFD scale）这一名词，作为与中尺度对应的名词^[7]。对于城市冠层而言，CFD与中尺度模式最大的区别在于，CFD可以在模拟中“显式”地描述建筑物的存在；而中尺度模式一般只能对建筑物的影响做参数化，建筑物引起的绕流等流动在模拟中不可见，因此这种描述可称为“隐式”的。

大体上，CFD与中尺度模式的区别如表1所示，由表1可知，微尺度模式在研究对象、核心问题、关

键物理量等多个方面都存在不同，这是由CFD自身的特点所决定的。需要特别指出的是，表1所列举的区别并非是绝对的，例如国内有些科研机构同样开发了一些微尺度数值模式，这些模式在数值求解方法上并非基于FVM，但是由于采取了一些特别的技术手段，这些模式同样可以“显式”地描述建筑物的存在，且主要用于模拟城市冠层内的问题，因此在广义上它们也可归为CFD类模式。目前在国内用户较多的CFD软件包括FLUENT，CFX，PHOENICS和STAR-CD等，而自主开发的微尺度模式则主要以南京大学的USSM模式为代表^[8-10]。

表1 CFD用于城市气候环境问题时与中尺度模式的主要区别

项目	CFD	中尺度模式
研究对象	城市冠层以内	城市冠层以上
核心问题	冠层内复杂几何边界和热-动力过程的精细描述	冠层与上界大气物质能量交换的参数化描述
关键物理量	风速、气温	降水、气温、风速、湿度
关注过程	湍流运动	天气演变
水汽问题	较少考虑相变	考虑水汽相变
数值方法	有限体积	有限差分
应用领域	人居环境	天气气候

2 CFD工具准确性的验证

在应用于任何具有实际应用价值的研究之前，数值模拟工具本身的准确性必须得到确认，对于CFD也不例外，国内外均有大量研究对CFD的准确性进行了验证。CFD的核心基础是纳维-斯托克斯方程组，而选择合适的湍流闭合方案则是准确求解纳维-斯托克斯方程组的前提。Gosman^[6]指出，并没有对所有问题都普适的湍流闭合方案，针对不同研究问题，应选择相对适合的闭合方案。利用CFD研究城市气候环境问题，究竟应选择什么样的湍流闭合方案，是一个需要事先解决的问题，而风洞实验则为解决这个问题提供了必要的资料。Li等^[11-12]利用从汉堡大学获得的单体绕流风洞资料^[13]对3种湍流闭合方案——标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和realizable $k-\epsilon$ 模型——进行了检验，发现realizable $k-\epsilon$ 模型在单体绕流问题中，计算更准确。为验证CFD在解决热力学问题方面的可靠性，Xie等^[14]采用了热力学风洞实验的数据对CFD软件FLUENT进行了验证，李磊等^[15]和Li等^[16]利用水槽实验^[17]和热力学风洞实验^[18]进行了验证，证实FLUENT确实可以较好地再现热力学风洞所观测到的数据。图1给出了李磊等^[15]利用FLUENT进行数值模拟与Liu等^[17]水槽实验的结果之间的对比，由图可知，选择合适的参数化方案和物理模型，CFD可以较好地再现水槽实验中的观测结果。

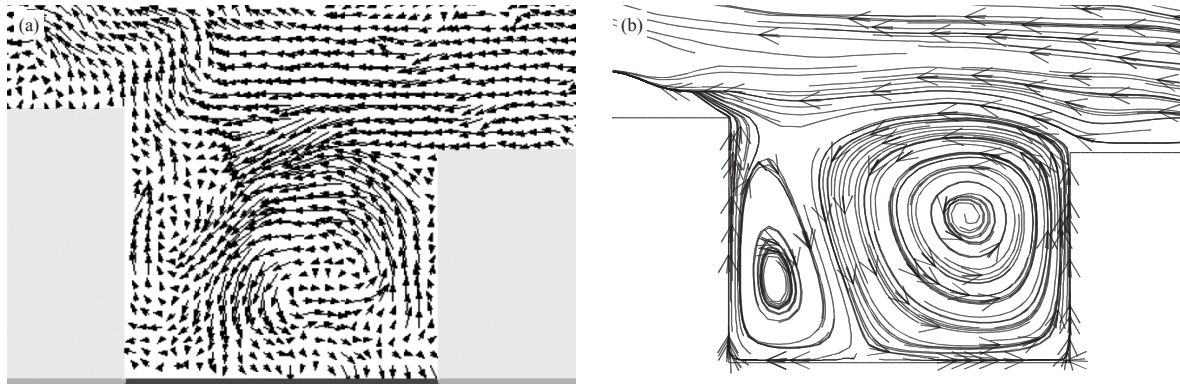


图1 水槽实验 (a) 与数值模拟 (b) 得到的流场结构^[15]
(风从右侧吹向左侧, $Fr=0.05$)

3 城市风环境问题研究

城市的局部风环境问题属于城市气候环境微尺度问题范畴, 在城市地区, 建筑物的存在可能会造成风环境的恶化, 影响行人的舒适度, 甚至对行人带来危险^[19], 对建筑物的设计方案进行风环境评价已显得日益重要。Murakami等^[20]指出, CFD技术已被广泛地应用于人体尺度到城市尺度的风环境分析研究中。国外的学者在20世纪90年代即已开始利用CFD技术分析城市风环境舒适度问题^[21]。国外研究认为, 不同的建筑物布局方案会对风环境造成影响, 有必要建立一套评估风环境的体系, 以便选出最佳设计方案, 而CFD技术在其中可以发挥重要作用。与风洞试验相比, CFD模拟可以获得解域空间内任意格点的资料, 而风洞实验获得的数据就相对有限; 同时, 用CFD技术完成一个典型的建筑群风环境影响评估, 通常只需2~3周的时间, 远小于风洞试验完成同样案例评估所需要的时间。

傅晓英等^[22]在国内较早利用CFD研究风环境问题, 他们提出应用CFD技术对规划的建筑群进行小气候数值模拟, 预测规划方案使楼宇、街区小气候发生的改变, 以便调整方案趋利避害。周莉等^[23]利用FLUENT模拟某高层建筑群附近的风环境, 得出了建筑物在不同风向条件下的风场和压力。他们的研究表明, 风在受到第一个阻碍后所形成的涡旋最为强烈, 压力梯度最大, 是最危险的受力区, 在建筑群中, 最靠近迎风面的建筑物所受负压最大, 且建筑物间的间距对建筑群周围的风环境有较大影响。唐毅等^[24]应用PHOENICS对广州某住宅小区的风环境进行了模拟分析, 分析了住宅小区内不同位置风环境受周围建筑物布局、高度等情况的影响, 对住宅小区的规划设计提供了技术支持。林波荣等^[25]运用PHOENICS

研究了中国传统民居四合院的建筑设计对周边区域和四合院内的风环境的影响, 得出了一系列有趣的结论, 他们的研究表明在研究中国传统民居的特点时, 引入CFD技术是深入了解其微气候效应的新手段。Li等^[11]利用FLUENT建立了一个理想的街区模型(如图2所示), 以此为基础研究了高大建筑物对行人高度风环境安全性的影响。研究结果表明, 高大建筑物确实会带来风环境安全隐患, 其对行人造成伤害的可能性大小, 取决于风向、建筑物的几何尺寸以及与周边建筑物的距离等因素。Wang等^[26]利用自己开发的模式评估了一个实际街区内高层建筑周边的风环境特征。相对于大风条件下的风环境安全性问题而言, 追求更好的通风能力对于大多数城市来说更具有现实意义, 李磊等^[27]利用USSM研究了街区详细规划与风环境的关系, 在总结数值模拟试验结果的基础上指出, 对于街区详细规划即使保持容积率不变, 按照一定原则对方案进行调整, 仍可在一定程度上改善街区内的通风条件。同时, 他们进一步提出应建立基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估。

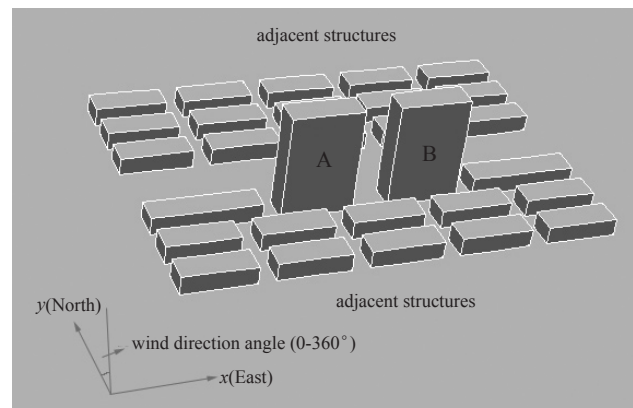


图2 利用FLUENT建立的理想街区模型^[11]

国内的一系列研究表明，城市街区的风环境已成为目前比较受关注的问题，包括大气科学、建筑学及规划学在内的许多学者都在这一领域展开了研究，而CFD技术的引入可以帮助深入细致地、从定性到定量地分析和了解由于建筑或建筑群影响所产生的复杂风环境。

4 城市热环境问题

近年来，由于全球变暖和城市化进程的双重作用，城市的热环境舒适度问题越来越引起人们的关注，在2012年举行的第八届国际城市气候大会上，展示了集中在这个领域的大量研究工作^[28-30]。在研究城市微尺度热环境方面，CFD因其可以给出城市冠层内热-动力耦合过程的精细结构而得到了广泛的应用。

国内进行此方面研究的主要是建筑环境领域的相关学者。Li等^[31]提出简化的地表面温度计算方法，然后与CFD风环境模拟相结合，从而在较小的计算负荷下进行热环境计算。刘艳红等^[32]将CFD与RS技术相结合，对城市中五类常见的绿地空间格局在垂直和水平方向上进行温度场和风速场数值模拟，探讨了不同绿地空间格局与城市热环境之间的关系。宋晓程等^[33]尝试在CFD模拟中导入水体与大气间热水分传输的计算新方法，研究城市水体对周边建筑热湿环境的影响（图3）。邵建涛^[34]和Shao等^[35]在总结URANS在进行建筑绕流提出改进的非线性k-ε模型及边界设定方

案，专门讨论建筑、路面等不透水人工表面与大气间的非稳态传热特性，进而分析其热浮力作用。另外，利用CFD模拟得到的热气候物理参数，还可进一步探讨室外人体热舒适性感觉及其分布。与气象预报中常用的一些简化舒适度指数不同^[36]，建筑环境领域一般采用标准等效温度*（standard effective temperatures, SET*）或生理等效温度（physiological equivalent temperature, PET）等结合了人体对热湿环境生理响应的指标^[37]，从而更适用于城市微尺度的舒适性研究。如Lin等^[38]利用CFD研究了不同住宅区绿化条件下室外SET*分布情况，发现由于水分蒸腾、遮阳以及风速衰减等不同因素的综合作用，树木对室外舒适度不一定起到改善作用。

总体上，目前国内利用CFD进行城市热环境研究的尚不是很多，其主要原因在于热环境问题除了受风环境影响外，还涉及到太阳辐射、城市人工排热、城市各种不同下垫面自身的热力属性及其与城市大气间的传热等大量复杂现象。另外，与风环境问题有所不同的是，热环境问题本质上是非稳态过程，进行常规的稳态模拟在理论和实际现象上都存在矛盾，而进行CFD非稳态模拟又要面临计算机性能等方面的制约。因此，研究城市热环境问题所面临的各种问题都要比单纯研究风环境问题要复杂得多，但从另一个角度看，这又正好为本领域的研究提供了充足的发展空间。

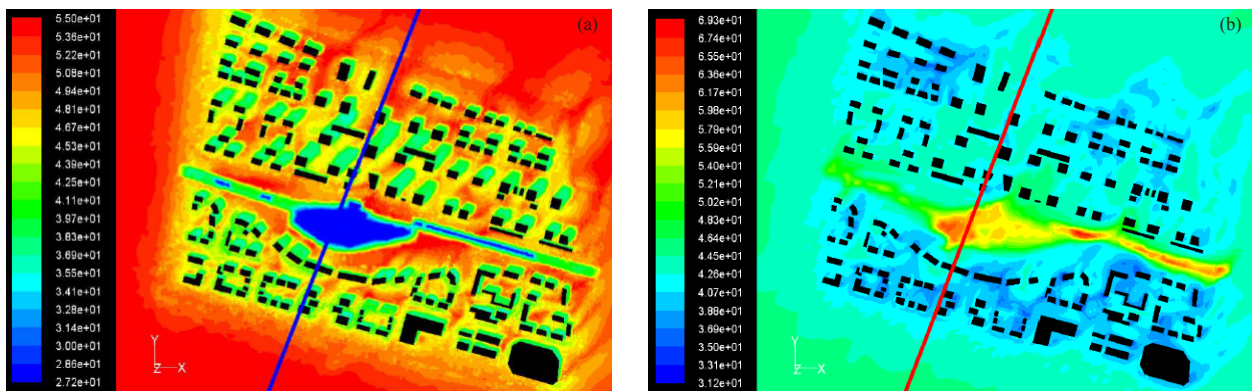


图3 CFD模拟的城市水体及其周边建筑区域内热湿环境^[33]
(a) 下垫面温度（单位：℃）；(b) 相对湿度（单位：%）

5 城市空气污染问题

由于汽车尾气排放对城市大气环境的影响，城市街区微尺度的污染物输送扩散问题引起了高度重视，而这正是CFD技术被广泛应用的另一个领域。在这一领域，国外早期研究的重心放在了动力学过程^[39-41]，对于热力作用的影响关注不多。但近十年来，热力作

用对物质扩散的影响已逐渐成为本领域研究的主要内容^[14, 42-43]。

国内学者在本领域的进展也非常迅速，金颖等^[44]尝试用FLUENT解一个经典的高架源扩散问题，他们设计了一个单点烟囱排放污染物的模型，选用标准k-ε湍流闭合模型进行计算，然后用解决这类问题的经

典高斯模型进行对比验证,证明FLUENT可以合理地模拟出单点高架源排放造成的污染状况。程雪玲^[45]用FLUENT详细地研究了街道峡谷污染问题,用风洞实验数据进行验证,发现无论是风场还是污染物浓度,数值模拟和试验的结果都吻合得非常好。通过分析街区中污染物的分布,程雪玲等^[46]定量地比较了湍流扩散程度与层流扩散程度的差别;另外她还比较了“开放街区峡谷”与“城市街区峡谷”的扩散能力,得出的结论是,“城市街区峡谷”由于其内部旋涡结构的影响,使得扩散能力要差一些。李磊等^[47]建立了一个假想的3维街道十字路口模型,并用FLUENT模拟了两种风向条件下该街区的污染物分布情景。他们选取RNG $k-\varepsilon$ 湍流闭合方案进行计算,并定性分析了污染物在街道十字路口内的分布情况,发现计算结果是合理的。蒋德海等^[48]建立了不同形状建筑物构成的街谷模型和存在高架桥的街谷模型,然后利用FLUENT研究了街谷内的湍流参数分布和污染扩散特征。苗世光等^[49]利用异模式耦合的方法,研究了城市小区气象条件与污染扩散的精细化预报问题,认为街区尺度的

污染预报在理论上是可行的,这为未来建立业务化的街区尺度污染预报系统奠定了基础。王宝民等^[50]利用微尺度模式对北京商务中心区的大气环境进行了模拟,指出交通高峰时段主要道路尤其是交叉路口可能出现 NO_x 浓度超标的情况。在前期研究基础上,李磊等^[51]进一步研究了热力作用对街谷污染扩散的影响,他们利用FLUENT的包辛尼斯克近似模型,研究了温度层结和地表加热对街道峡谷内污染扩散能力的影响,得出结论认为即使街谷上空被逆温层覆盖,地表加热仍可有效地帮助提升街谷内的扩散能力。Li等^[16]进一步研究了不同背景风速条件下街谷底部加热对于街区扩散能力的影响,他们给出了静风条件下街谷底部加热激发街谷内环流的物理过程,并指出即使是在静风条件下街谷的热力作用也可以激发出足够强的环流,能够驱散污染物(图4)。同时, Li等^[16]还指出对于固定高宽比的街谷,存在一个风速阈值,当背景风速大于该阈值时,动力学作用决定了街谷内的环流特征,而当背景风速低于该阈值时,热力作用的影响则占有重要地位。

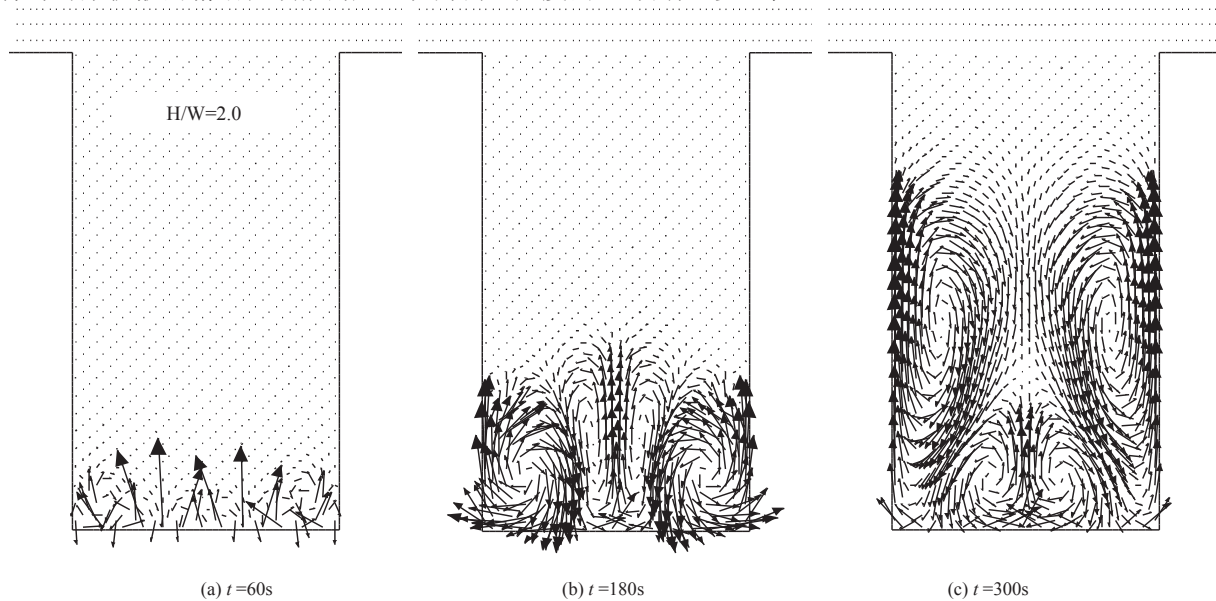


图4 FLUENT模拟的静风条件下地表加热激发街谷环流的过程^[16]

可见, CFD技术的出现,使得人们能够着眼城市的局部研究微尺度空气污染问题,这些研究可以深入到城市冠层内部,分析污染物在建筑物周围和街区上空的输运和扩散规律。CFD技术的特点使得它在与街区大气环境相关的科研或业务工作中上有着良好的应用前景,诸如小区、建筑建设的环境影响评价,分析街道拓宽、建筑物改建等对环境的影响,以期得出合理建设方案等等。

6 其他相关研究

6.1 复杂地形的模拟

早期利用CFD开展城市气候环境微尺度研究,很少考虑到复杂地形的存在,而事实上,国内外均有大量城市是建立在复杂地形之上的,因此用CFD描述复杂地形的影响,成为城市气候环境微尺度研究不可回避的问题。程雪玲等^[51]利用FLUENT进行了平地上不同风条件下烟羽扩散的数值模拟实验,并与相应

的风洞实验数据进行了对比, 取得不错的效果。在程雪玲等^[51]的研究中, 还利用FLUENT的CAD建模部分进行了复杂地形网格生成的研究, 研究首先建立了一个地形复杂的丘陵地区的计算模型, 并对计算模型进行了结构化网格划分, 从而为下一步利用CFD进行复杂地形条件下污染物扩散输送的数值试验提供了必要条件。李磊等^[52]以北京的佛爷顶和我国西南某峡谷为研究对象, 利用FLUENT模拟了复杂乃至陡峭地形的风场结构, 他们指出“相比于普通中尺度模式, FLUENT可以更为精确地描述下垫面的复杂地形特征, 因而能够在小尺度范围内得到分辨率更高且更为准确的复杂地形上的近地层风场模拟结果。”这些研究为进一步将CFD的应用延伸到复杂地形之上的城市气候环境研究打下了基础。

6.2 与中尺度模式的耦合

尽管CFD在描述复杂几何形体方面有着中尺度模式难以比拟的优势, 但它仍然存在自己的局限性, 这些局限性主要体现在两方面: 一是难以描述地表热力平衡过程, 二是因模拟范围较小难以获得大范围环流的背景信息。为了弥补CFD这方面的不足, 李磊^[53]提出了将中尺度模式与CFD耦合的思路, 依靠这种方法, 既可利用CFD来精细描述复杂几何形状下垫面对风、温的影响, 又能利用中尺度模式获取大尺度环流的信息, 并提供下垫面能量平衡计算得到的更准确的地表温度。随后, 以中尺度模式RAMS和CFD软件FLUENT为工具, Li等^[54-55]先后给出了北京佛爷顶和香港国际机场的成功例子。尤其是在香港国际机场的案例模拟中, Li等^[55]利用RAMS与FLUENT耦合的方法研究了台风情境下建筑扰动引起的风切变问题, 他们在模拟中同时考虑了复杂地形和建筑群的存在, 得到了较好的模拟结果(图5)。更进一步, Li等^[56-57]用RAMS与FLUENT耦合方法模拟了香港国际机场地

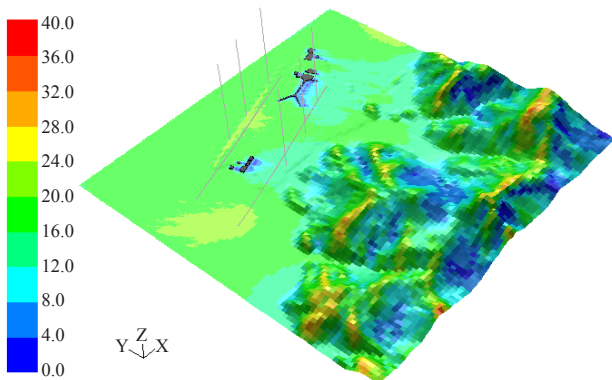


图5 RAMS/FLUENT方法模拟的香港国际机场的风速分布^[55]

形引起的背风波, 获得了不错的效果。在业务应用层面, 苗世光等^[58]建立了一个多模式嵌套的数值预报系统, 将小区尺度模式与中尺度边界层模式耦合, 进行青岛奥林匹克主题公园10m分辨率的风场预报, 并在2008年北京奥运会青岛帆船比赛中进行了服务, 取得了良好效果。Li等^[59]以北京为对象, 尝试将WRF与他们自行开发的基于大涡模拟(large eddy simulation, LES)方案的CFD模式进行耦合。相对于常用的雷诺平均(reynolds averaged Navier-Stokes, RANS)类型的湍流闭合方案, LES通常能获得更精确地模拟结果, 但同时也需要更细的计算网格和消耗更多的计算资源。但Li等^[59]采用了特别的处理方法, 将关心区域的建筑物进行准确地“显式”处理, 而非关心区域的区域当作拖曳粗糙元, 从而节省了计算量, 计算结果也与实测结果相当一致。这些工作, 无疑为未来建立真正可用的CFD预测业务系统奠定了基础。

7 讨论与展望

结合作者在本领域的研究工作, 回顾了CFD技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用。通过回顾可发现近十余年CFD技术已被广泛应用于我国城市气候环境微尺度问题多个方面的研究, 尤其是当研究问题着眼于城市街区尺度和城市冠层内部, CFD可充分发挥其描述复杂几何形体的能力, 给出街区内部的热力、动力以及物质扩散的细节, 从而具有中尺度模式难以比拟的优势。

从总体来看, 国外由于开展研究较早, CFD技术在城市气候环境微尺度问题领域已经被广泛地应用; 在国内, 虽然开展研究较晚, 但近十余年来由于高速城市化进程所激发的强烈需求而发展迅速。Gosman^[6]曾指出, CFD技术还远远没有发挥全部潜能, 因为人们往往认为CFD技术是一种高科技而心存畏惧。然而事实上, 随着计算机科学的发展, CFD软件甚至已可以在微机上流畅运行, 解决大量实际问题, 目前国内建筑和规划领域对CFD的广泛应用即是很好的佐证。

最后, 特别值得讨论的一点在于商业CFD软件在科学研究中的应用, 一直以来对于商业CFD软件用于城市气候环境领域的基础研究存在一定争议和质疑, 这主要是由于商业CFD软件的源代码不公开, 其核心部分只能被当作“黑箱”。同时, 商用CFD软件的出现, 导致一些使用者在对计算流体力学基本原理及其在城市气候环境领域的应用原则缺乏必要了解的情况, 产出了大量似是而非的“研究成果”, 这一现象

在工程实际应用中尤为普遍,对于这样的现象,还是值得注意的。尽管如此,我们仍应正确评价商业CFD软件在科学研究上的价值,商业CFD软件往往提供了丰富的参数设置接口,并同时提供了用户自定义函数(user defined function)接口,使得研究者可根据需要拓展CFD的功能,包括增加源项、改变流体物理属性和设置边界条件等内容。因此在作者看来,商业CFD软件实际上提供了一个以计算流体力学为核心的可拓展的平台,可帮助研究者摆脱相对枯燥和繁琐的编程,而把精力集中在所关注的科学问题本身。

关于CFD未来的发展,在研究领域,正如本文前文所述,由于当前城市微气候的热力学问题研究尚不成熟,CFD在本领域的发挥空间还较大,关于热压力、舒适度等多方面的问题都有待继续研究。除此之外,关于CFD自身如何更适用于真实大气的模拟,也值得探讨,例如如何在通用CFD软件中加入科里奥利力,以适应10km以上尺度的研究,类似的工作有待进一步开展。在业务应用领域,随着高性能计算机运算速度的不断提升,制约CFD投入实际业务应用的瓶颈正在慢慢消失。在未来,基于并行计算的CFD技术很有可能在以下几个领域逐渐投入业务应用:(1)城市街区的大气环境质量预报,在与数值预报模式耦合之后,CFD能够获得更精细的冠层内的风场与湍流结构,从而为预报汽车尾气污染提供了可能性;(2)航空风切变预报,对于建立在山地周边的机场(例如香港国际机场),可考虑利用CFD精细刻画复杂和陡峭地形的能力,进行低空的风切变预报;(3)城市地区的风能评估及预报,利用CFD预报建筑影响条件下的风能评估和风功率预报,为城市地区的风能利用示范工程(例如风光互补路灯)提供服务。当然,除此之外,还有更多可能应用的领域无法一一列举。总之,有理由相信,随着未来计算机技术的提升和新理论及算法的引入,CFD技术将有可能取得新的突破并在城市气候环境领域中得到更广泛的应用。

参考文献

- [1] 徐祥德, 汤绪. 城市化环境气象学引论. 北京: 气象出版社, 2002: 284.
- [2] 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟. 应用气象学报, 2003, 14(1): 61-68.
- [3] 徐祥德, 丁国安, 卞林根. 北京城市大气环境污染激励与调控原理. 应用气象学报, 2006, 17(6): 815-828.
- [4] 张爱英, 任国玉, 周江兴, 等. 中国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差. 气象学报, 2010, 68(6): 957-966.
- [5] 蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 城市气象与边界层数值模拟研究. 地球科学进展, 2010, 25(5): 463-473.
- [6] Gosman A D. Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 21-39.
- [7] Yamada T. Numerical simulations of airflow and transport and diffusion from wind tunnel to terrain scales. The seventh international Conference on Urban Climate, Yokohama, 29 June-3 July, 2009.
- [8] Fang X Y, Jiang W M, Miao S G, et al. The multi-scale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment. Advances in Atmospheric Science, 2004, 21: 103-112.
- [9] Miao S G, Jiang W M, Wang X Y, et al. Impact assessment of urban meteorology and the atmospheric environment using urban sub-domain planning. Boundary Layer Meteorology, 2006, 118(1): 133-150.
- [10] 蒋维楣, 王咏薇, 刘罡, 等. 多尺度城市边界层数值模式系统. 南京大学学报(自然科学版), 2007, 43(3): 221-237.
- [11] Li L, Hu F, Cheng X L, et al. The application of computational fluid dynamics to pedestrian level wind safety problem induced by high-rise buildings. Chinese Physics, 2004, 13(7): 1070-1075.
- [12] Li L, Hu F, Cheng X L, et al. Numerical simulation of the flow within and over an intersection model with Reynolds-averaged Navier-Stokes method. Chinese Physics, 2006, 15(1): 149-155.
- [13] Leiti B, Schatzmann M. Compilation of experimental data for validation purposes, CEDVAL. Hamburg: Meteorology Institute, Hamburg University. <http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval>. 1998.
- [14] Xie X M, Liu C, Leung D Y C, et al. Characteristics of air exchange in a street canyon with ground heating. Atmospheric Environment, 2006, 40(33): 6396-6409.
- [15] 李磊, 房小怡, 张立杰. 不同气温层结条件下地面加热对街谷扩散能力的影响. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2253-2260.
- [16] Li L, Yang L, Zhang L J, et al. Numerical study on impact of ground heating and ambient wind speed on flow field and pollutant diffusion in street canyon. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(6): 1227-1237.
- [17] Liu H Z, Liang B, Zhu F R, et al. A laboratory model for the flow in the urban street canyons induced by bottom heating. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(4): 554-564.
- [18] Uehara K, Murakami S, Oikawa S, et al. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. Atmospheric Environment, 2000, 34(10): 1553-1562.
- [19] Ansley R W. Politics of pedestrian level urban wind control. Building and Environment, 1989, 24(4): 291-295.
- [20] Murakami S, Ooka R, Mochida A, et al. CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 57-81.
- [21] He J M, Song C S. Evaluation of pedestrian winds in urban area by numerical approach. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 81: 295-309.
- [22] 傅晓英, 刘俊, 许剑峰, 等. 计算流体力学在城市规划设计中的应用. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(6): 36-39.
- [23] 周莉, 席光. 高层建筑群风场的数值分析. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 471-474.
- [24] 唐毅, 孟庆林. 广州高层住宅小区风环境模拟分析. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2001, 33(4): 352-356.
- [25] 林波荣, 王鹏, 赵彬, 等. 传统四合院民居风环境的数值模拟研究. 建筑学报, 2002, 5: 47-48.
- [26] Wang B M, Liu H Z, Chen K, et al. Evaluation of pedestrian winds around tall buildings by numerical approach. Meteorology and Atmospheric Physics, 2004, 87: 133-142.
- [27] 李磊, 吴迪, 张立杰, 等. 基于数值模拟的城市街区详细规划通风评估研究. 环境科学学报, 2012, 32(4): 946-953.
- [28] Xuan Y L, Mochida A, Li Q, et al. Optimal building arrangement to maximize thermal acceptance of outdoors under different climates. 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment, Dublin, 2012.
- [29] Johansson E, Yahia M W. Improving outdoor thermal comfort

- in warm-humid Guayaquil, Ecuador through urban design. 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment, Dublin, 2012.
- [30] Matzarakis A M, Frohlich D. Application of micro-scale models for bioclimatic assessments – Examples from Freiburg. 8th International Conference on Urban Climate and 10th Symposium on the Urban Environment, Dublin, 2012.
- [31] Li X, Zhen T Y, Zhao B, et al. Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings. *Building and Environment*, 2004, 40: 853-866.
- [32] 刘艳红, 郭晋平, 魏清顺. 基于CFD的城市绿地空间格局热环境效应分析. *生态学报*, 2012, 32(6): 1951-1959.
- [33] 宋晓程, 刘京, 郭亮, 等. 城市水体对局地热湿气候影响的CFD初步模拟研究. *建筑科学*, 2011, 27(8): 90-94.
- [34] 邵建涛. 建筑外表面对流换热特性研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 49-90.
- [35] Shao J T, Liu J, Zhao J N. Evaluation of various non-linear k-ε models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer. *Building and Environment*, 2012, 57(11): 145-155.
- [36] 罗晓玲, 兰晓波, 李岩瑛, 等. 人体舒适度指数预报体系研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 18(8): 59-62.
- [37] Spagnolo J, Dear R de. A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and Environment*, 2003, 38(5): 721-738.
- [38] Lin B R, Li X F, Zhu Y X, et al. Numerical simulation studies of the different vegetation patterns' effects on outdoor pedestrian thermal comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 1707-1718.
- [39] Tominaga Y, Murakami S, Mochida A. CFD prediction of gaseous diffusion around a cubic model using a dynamic mixed SGS model based on composite grid technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67/68: 827-841.
- [40] Walton A, Cheng A Y S, Yeung W C. Large-eddy simulation of pollution dispersion in an urban street canyon—Part I: comparison with field data. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(22): 3601-3613.
- [41] Chang C H, Meroney R N. Numerical and physical modeling of bluff body flow and dispersion in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, 89: 1325-1334.
- [42] Cheng W C, Liu C, Leung D Y C. On the correlation of air and pollutant exchange for street canyons in combined wind-buoyancy-driven flow. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 3682-3690.
- [43] Cheng W C, Liu C H. Large-eddy simulation of turbulent transports in urban street canyons in different thermal stabilities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99: 434-442.
- [44] 金颖, 周伟国, 阮应君. 烟气扩散的CFD数值模拟. *安全与环境学报*, 2002, 2(1): 21-23.
- [45] 程雪玲. 大气边界层内湍流扩散的数值模拟. 北京: 清华大学, 2003: 59.
- [46] 程雪玲, 胡非. 影响街区峡谷浓度扩散的因素. *城市环境与城市生态*, 2004, 17(2): 39-41.
- [47] 李磊, 胡非, 程雪玲, 等. FLUENT在城市街区大气环境问题中的一个应用. *中国科学院研究生院学报*, 2004, 21(4): 476-480.
- [48] 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. *环境科学研究*, 2006, 19(3): 7-12.
- [49] 苗世光, 张朝林, 江晓燕等. 城市小区气象条件与污染扩散精细预报研究. *环境科学学报*, 2006, 26(10): 1729-1736.
- [50] 王宝民, 刘辉志, 桑建国. 北京商务中心区大气环境的数值模拟. *气候与环境研究*. 2007, 12(5): 604-618.
- [51] 程雪玲, 胡非. 复杂地形网格生成研究. *计算力学学报*, 2006, 23(3): 313-316.
- [52] 李磊, 张立杰, 张宁, 等. FLUENT在复杂地形风场精细模拟中的应用研究. *高原气象*, 2006, 29(3): 621-628.
- [53] 李磊. 城市边界层的多尺度模拟研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2005: 101.
- [54] Li L, Zhang L J, Zhang N, et al. Study on the micro-scale simulation of wind field over complex terrain by RAMS/FLUENT modeling system. *Wind and Structure*, 2010, 13(6): 519-528.
- [55] Li L, Chan P W. Numerical simulation study of the effect of buildings and complex terrain on the low-level winds at an airport in typhoon situation. *Meteorologische Zeitschrift*, 2012, 21(2): 183-192.
- [56] Li L, Chan P W, Zhang L J, et al. Numerical simulation of a lee wave case over three-dimensional mountainous terrain under strong wind condition. *Advances in Meteorology*, 2013, Article ID 304321.
- [57] Li L, Chan P W, Zhang L J, et al. Numerical simulation of terrain-induced vortex/wave shedding at the Hong Kong international airport. *Meteorologische Zeitschrift*, 2013, 22: 317-327.
- [58] 苗世光, 孙桂平, 马艳, 等. 青岛奥帆赛高分辨率数值模式系统研制与应用. *应用气象学报*, 2009, 20(3): 370-379.
- [59] Li L, Miao S G, Zhang C L, et al. Study on micro-atmospheric environment by coupling large eddy simulation with mesoscale model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 107/108: 106-117.