姜平, 刘晓冉, 朱宇, 等. 2020. 基于大涡模拟的小区气候态精细化风环境模拟试验 [J]. 气候与环境研究, 25(2): 139−152. JIANG Ping, LIU Xiaoran, ZHU Yu, et al. 2020. Fine-Scale Structures of the Climatic Wind Environment within a Neighborhood Based on Large-Eddy Simulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (2): 139−152. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18130

基于大涡模拟的小区气候态精细化风环境模拟试验

姜平[1,2] 刘晓冉[1] 朱宇[2] 曾文馨[2] 朱浩楠[1]

1 重庆市气候中心，重庆 401147
2 中山大学，广州 510275

摘 要 对具有复杂下垫面的小区精细化风环境进行数值模拟是当前城市气象研究的热点，而针对具有复杂地形的山地型城市（如重庆）的研究还比较匮乏。本文采用能显式分辨下垫面陡峭地形和复杂建筑物的计算流体力学（CFD）模式对重庆市渝北区龙湖社区气候态下的精细化风环境进行高分辨率的数值模拟。结果表明，下垫面能显著调节小区内风场的分布，风速大值区主要出现在九龙湖等开阔区域以及与中尺度背景入流方向一致的街道中。在夏季，小区整体风场以东南风为主，而其他 3 个季节则以偏东风为主。4 个季节中，夏季小区内的风速最大，平均风速为 0.3 m/s 左右，局地能出现大于背景风的风速，可达 0.8 m/s；其他 3 个季节的风速则较弱，区域平均的风速在 0.2 m/s 左右。不同的建筑物布局对局地风环境的影响也不同：单个孤立高层建筑迎风面的近地面存在明显地绕流，局地风速有所增加，而在背风面则形成尾流区，水平风速较低；在低矮分散的建筑群，建筑物的整体高度不高，区域内流场相对来说比较一致，风速较大，有利于小区的通风；在密集高层建筑群内，由于建筑物群本身的布局比较封闭，加之不同建筑物的环流场存在相互干扰及影响，使得小区近地面风速几乎为零，不利于小区通风和污染物扩散。建筑物的这些影响在城市冠层内尤为明显，高度越高这种影响越弱。

关键词 复杂下垫面 风环境 精细化特征 计算流体力学

文章编号 1006-9585(2020)02-0139-14 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18130

Fine-Scale Structures of the Climatic Wind Environment within a Neighborhood Based on Large-Eddy Simulation

JIANG Ping[1,2], LIU Xiaoran[1], ZHU Yu[2], ZENG Wenxin[2], and ZHU Haonan[1]

1 *Chongqing Climate Center*, *Chongqing* 401147
2 *Sun Yat-sen University*, *Guangzhou* 510275

Abstract Super-high-resolution numerical simulations on the wind environment in neighborhoods have been a hot research area in urban meteorology. In this study, a computational fluid dynamics model based on large-eddy simulation was utilized to simulate the climatic wind environment in Longhu Community in Chongqing, and the impacts of local building configurations on the fine-scale structures of the wind field was investigated. Results show that complex underlying surfaces played an important role in regulating local circulations. The strong winds were mainly found over

收稿日期 2018-09-30；**网络预出版日期** 2019-10-16
作者简介 姜平，男，1989 年出生，博士，主要从事中小尺度数值模拟和城市风热环境研究。E-mail: 995879751@163.com
通讯作者 刘晓冉，E-mail: liuxiaoran8283@126.com
资助项目 重庆市气象局智慧气象技术创新团队项目 ZHCXTD-201808、ZHCXTD-201913、ZHCXTD-202010，重庆市气象部门青年基金项目 QNJJ-201907

Funded by Climate-Smart Innovative Team Program on Application Services of Chongqing Meteorological Bureau (Grants ZHCXTD-201808, ZHCXTD-201913, and ZHCXTD-202010), Youth Foundation Program of Chongqing Meteorological Bureau (Grant QNJJ-201907)

open spaces and at broad streets parallel to the background inflow. The overall wind speed in summer was larger than that in other seasons and could reach a magnitude of 0.8 m/s. Different building configurations led to different patterns of local wind fields. The isolated tall building resulted in strong downward motions and winding flows at the windward side of the building, where strong winds frequently occurred. The scattered low buildings had little impact on the local inflow, resulting in a wind field with a homogeneous pattern. The densely built tall complex with an enclosing shape greatly blocked the wind, which led to a relatively weak wind speed in the vicinity and was unfavorable for pollutant dispersion.

Keywords Complex underlying surfaces, Wind environment, Fine-scale structures, Computational fluid dynamics (CFD)

1 引言

城市气象条件直接影响广大市民的生活生产。随着城市化进程的加快，城市建筑物数量和高度不断增加，人们受城市气象的影响越来越显著（胡非等, 2003; 蒋维楣等, 2010; Hamnett, 2011; 李磊等, 2015）。同时，人们的生活水平不断提高，对生活质量本身以及环境的要求也越来越高，对城市气象服务的需求也急剧增加（崔桂香等, 2013）。除了热岛效应、污染物扩散等城市气候效应，人们越来越关注城市中的风环境对日常生活的影响。不利的风场会影响人体舒适度，威胁行人行车安全，并进一步对基础设施、交通秩序以及户外活动造成负面影响（蒙伟光等, 2007）。因此，增进对城市局地风环境的认识，尤其是对其精细结构的探索，是实现城市精细化气候业务服务和提升气象防灾减灾能力的关键（矫梅燕, 2007）。

城市下垫面是影响城市气候的重要因子之一（王宝民等, 2003）。城市建筑物空间结构和布局的多样性对城市边界层的流场等有直接调节作用，导致城市气流产生干扰、阻挡作用以及狭管效应，使气流的分布和结构发生变化（Oke, 1988）。这些变化会直接改变城市风环境，从而影响人居环境的舒适度（Park et al., 2015）。重庆作为国内特有的山地型城市，具有多变的地形，这进一步加剧了城市冠层内流场的复杂性。目前，针对具有复杂下垫面的山地型城市的相关研究还比较匮乏，因此有必要对其风环境的精细结构进行深入研究。

研究山地型城市内风环境的精细结构，必须对城市下垫面（陡峭的地形和复杂的建筑物）进行显式刻画。目前，风洞试验和外场试验是显式分辨城市几何形状的两种最为直接的方法，他们将实际建筑物形状和高度以一定比例进行缩小，然后进行风洞实验和实际观测，以探讨建筑物对气象要素的影响。但是这两种方法具有明显的局限性（Cheng and Castro, 2002; Arnold et al., 2004; Rotach et al., 2004）：风洞实验无法准确描述边界条件，并且对个例的依赖性较强；实际观测则受观测网限制，可控性差、成本高、研究周期长。故越来越多的学者求助于计算流体动力学（CFD）等数值模式。早期由于计算资源的限制，学者多使用雷诺应力（RANS）模式，进行快速而廉价的模拟，但其性能较简单的实验室风洞试验和外场试验并没有进步很多，尤其在刻画建筑物尾流以及低风速区特征等方面存在明显缺陷（Britter and Hanna, 2003）。近年来，随着高性能计算的发展，大涡模拟（LES）逐步受到研究者们的青睐（Letzel et al., 2008）。它能显式分辨网格尺度的湍流，因此能够更为准确地刻画湍流扰动的时空变化。

基于 CFD 模式的研究大都采用简单的、理想的城市几何下垫面，如单一的街谷或者形状规则、整齐排列的建筑阵列（Ng, 2009; Letzel et al., 2012）。例如，Rotach et al.（2004）对街谷上空的流场进行数值研究，指出席卷作用在城市街谷内部和其上部空气交换中扮演着重要角色；Cui et al.（2004）也指出了席卷在建筑物顶层垂直扰动动量的传输中的重要作用。Shen et al.（2015）则对规则的三维建筑阵列进行了大涡模拟，指出建筑阵列的排列位置、间隔等都对冠层内部的流场及扩散起着一定的调节作用。实际情况中，建筑物的形状、高度及其分布，街道的宽度、走向等等都非常复杂，这使得城市中的流场也变得难以琢磨。近些年，由于遥感手段的发展，基于数字高程模式的地形地貌数据变得越来越可靠，精度也越来越高，这使得在 LES 中采用真实的城市几何下垫面成为现实。部分学者已经做了相关探索。然而，这些数据及方法应用在像重庆这种具有复杂地形的山地型城市的研究还比较少。

本文采用基于 LES 开发的局地气象模式，结合高分辨率下垫面（陡峭地形和复杂建筑物）资料，以重庆市渝北区龙湖社区为例，对小区的风环境进行高分辨率的数值模拟，探讨气候态下小区精细化风场的一般特征，并进一步分析小区建筑物布局对局地环流的调节作用。

2　模式和资料

2.1　模式介绍

本文所用到的计算流体力学模式是日本东北大学基于 LES 开发的一个局地气象模式（Sha, 2002, 2008）。表 1 给出了该模式的具体参数。该模式基于三维笛卡尔坐标，采用阻断方法（blocking-off）来处理陡峭的地形和复杂建筑物。模式采用有限元方法离散 Navier–Stokes 方程组，同时利用修正的压力速度耦合方法（SIMPLER）进行求解（Patankar，1980）。模式在每个积分步长中反复迭代至收敛，以保证各要素的物理一致性。方程平流采用的是三阶迎风格式（QUICK）（Leonard，1979）。时间积分采用完全隐式方案。次网格湍流的处理则是采用 Lilly-Smagorinsky 大涡模拟模型（Lilly, 1962; Smagorinsky, 1963）。该局地模式为干模式，不包含湿过程和辐射过程。详细模式介绍请参考 Sha（2008）。

Chen et al.（2015a, 2015b）利用该模式对陡峭地形和高密建筑群进行了一系列的理想试验，指出该模式能够很好地展现复杂下垫面下流场的精细化特征。本文利用该模式对复杂地形小区风环境进行数值模拟。

表 1　CFD 模式参数

Table 1　Description of the computational fluid dynamics (CFD) model

参数	描述
基本方程	非静力、完全可压纳维—斯托克斯方程
坐标	三维笛卡尔
离散方法	有限元
网格	规则结构化交错网格
水平空间分辨率	一致
时间积分方案	完全隐式
平流方案	QUICK
求解方法	SIMPLER
下垫面处理方法	阻断方法（blocking-off）
湍流方案	大涡模拟（LES）

2.2　资料

本文采用再分析资料作为 CFD 模式驱动场。这里没有采用常规地面观测作为初始场的原因是研究区域太小，区域内没有架设地面观测站或其他现场观测仪器（如高塔观测），而选用离研究区域最近的观测站则可能不具有局地代表性。再分析资料虽然水平分辨率低，但空间覆盖广，且不同气压层次上的数据在插值后可以直接作为初始廓线来驱动 CFD 模式，相比于地面观测而言，空间连续性较好。本文采用空间分辨率为 0.25°（纬度）×0.25°（经度）的 ERA-interim 再分析资料，时间长度为 1979～2017 年，时间分辨率为逐月平均，用到的气象要素包含三维风场、温度和气压等。

本文采用的地形资料是分辨率为 90 m 的 SRTM（Shuttle Radar Topography Mission）数值高程数据 4.1 版本（SRTM 90 m Digital Elevation Database V4.1）。SRTM（Jarvis, 2008）即航天飞机雷达地形测绘任务，由美国国家航空航天局测绘所得，数据范围为 60°N 至 56°S，180°E 至 180°W 的所有区域，覆盖全球陆地表面的 80% 以上，垂直高度误差为 16 m。地形数据在使用前采用双线性插值方法插值到 5 m×5 m 的空间格点上。

本文 CFD 模式所需的高精度建筑物资料（包含建筑物形状和高度）提取自卫星遥感影像图，提取方法参考李嘉良等（2013）。

3　CFD 模式设置

3.1　研究区域及模式设置

本文选取的研究区域为重庆市渝北区龙湖社区（图 1a），经、纬度范围为（29.600°N～29.312°N，106.507°E～ 106.518°E），大小约为 1.5 km×1.0 km。区域内下垫面复杂，包括水泥地、草地、湖面、建筑物等多种类型（图 1b），区域内地形落差较大，达到 30 m 以上（图 1c）。

图 1d 为研究区域数值建模结果，整个小区呈现四周高中间低的盆地型形态。区域东部为高层住宅以及商务写字楼区，高度在 100 m 以上。区域中部为香樟林别墅区，分布在九龙湖周围，楼层基在 3 层以下。西部为龙湖西苑小高层住宅区，高度在 50 m 左右。

模式采用局地直角坐标系，x、y、z 分别为纬

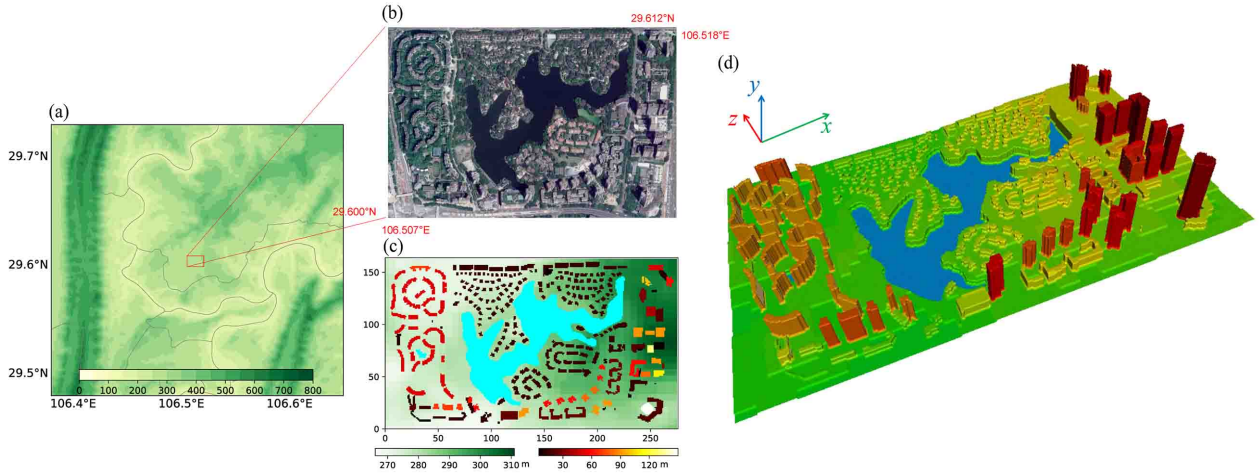

图 1 （a）研究区域重庆市渝北区龙湖社区所在位置（红色方框内为研究区域，填色为地形高度，单位：m）；（b）研究区域的卫星影像；（c）研究区域下垫面（建筑物和地形）建模结果（绿色填色表示地形高度，红、黄色填色表示建筑物高度，单位：m）；（d）研究区域建模结果的三维视图

Fig. 1 The red box in (a) shows the location of the model domain in Chongqing downtown (shades are the topography, units: m), (b) is the corresponding satellite image map, and (c) and (d) are the plain view (the green shades are the topography, the red and yellow shades are the building heitht, units: m) and the three-dimensional view of the underlying surface of the model domain, respectively

向、经向和垂直方向。水平分辨率为 5 m，垂直分辨率在 50 m 以下为 5 m 递增，50 m 以上以 1 m 递增。总的格点数为 300（纬向）×200（经向）×60（高度），总的区域范围为 1.5 km（纬向）×1 km（经向）×1.52 km（高度）。模式侧边界条件采用放射边界条件，底边界采用固体无滑移条件。模式积分步长为 1 s，积分时长为 0.5 h。

3.2 模式初始场

本文主要研究气候态下小区内精细化风环境的基本特征，采用 ERA-interim 再分析资料的气候态结果作为模式初始场。图 2 是重庆市西部（28.4°N～30.6°N，105.4°E～107.6°E）1979～2017 年多年平均的近地面风场和温度场的计算结果。在 4 个季节的代表月份（1、4、7、10 月）里，风场均表现为气旋式环流，且整体强度不大，均小于 2 m/s。产生这种特征的原因与重庆市地处的地理环境（四川盆地）密切相关。4 个季节的近地面气温相差较大，夏季最高，可达 305 K，而冬季最低，在 280 K 左右。

本文选取离研究区域（图 2a 中的红色方框）最近格点处的气候态结果作为 CFD 模式的初始场。在水平和垂直方向上分别采用双线性插值和样条插值方法将再分析资料插值到 CFD 模式网格中。这里仅给出水平风场插值后的廓线，结果如图 3。在春季（4 月），风场（风速和风向）在 200 m 以下基本保持不变，大致为偏东风，风速为 0.6 m/s。在 200 m 高度以上，风向顺转，变为偏南风。风速逐渐增大，在 1500 m 达到 3 m/s。在其他 3 个季节，近地面风场分为为东南风、偏东风和偏东风，量级大致为 0.6 m/s、0.2 m/s 和 0.2 m/s。在这 3 个季节中，风场随高度的变化基本与春季一致，即在 200 m 以下基本保持不变，200 m 以上风向顺转，风速增大。

本文分别以 4 个季节代表月份的气候态结果作为初始场驱动 CFD 模式，设置 4 组试验，以考察不同季节龙湖小区内精细化风环境的分布特征。气候态下，天气尺度甚至是更小尺度的现象被过滤掉，这种条件下，边界层基本呈现非常稳定或者中性的状态，此时边界层湍流活动较弱，基本属于层流状态。因此，本文主要考虑的是下垫面建筑物和地形对于局地流场的机械调节作用，而对下垫面的热力影响则较少涉及。

3.3 模式输出达到稳态结果的判定

本文后续主要基于达到稳态时的模式结果进行分析。在积分过程中，气象要素场需要一定的时间去适应被显式刻画的地形及建筑物（动力适应），才能达到相对稳定的状态。这里以春季试验为例，对模式积分过程中的动量扰动通量和热量扰动通量进行计算，结果如图 4。随着模式不断积分，垂直动量扰动通量和热量扰动通量廓线均发生了较大的

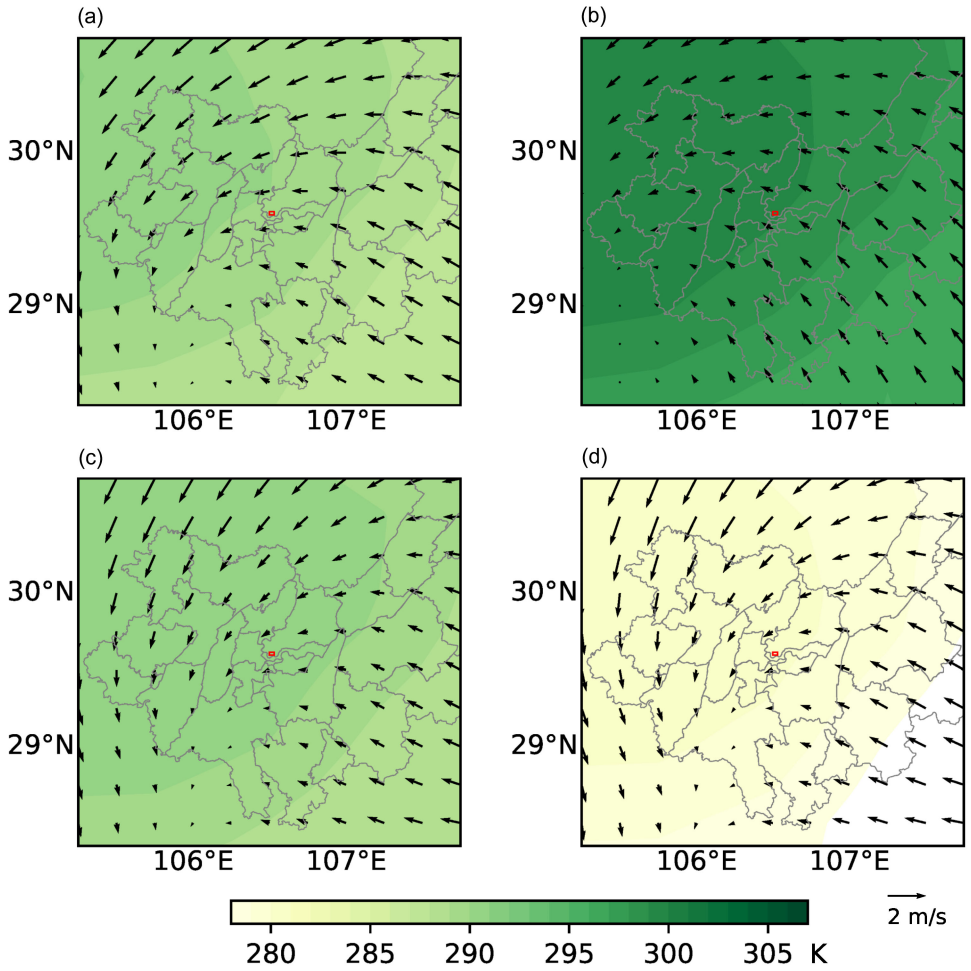

图 2　ERA-interim 再分析资料 1979~2017 年多年平均的月平均近地面风场（箭头，单位：m/s）和温度场（填色，单位：K）：（a）4 月（春季代表月份）；（b）7 月（夏季代表月份）；（c）10 月（秋季代表月份）；（d）1 月（冬季代表月份）

Fig. 2　Annual mean of near-surface wind (vectors, units: m/s) and temperature (shades, units: K) fields in the ERA-interim reanalysis data from 1979 to 2017. (a), (b), (c), and (d) are the patterns in the representative months of four seasons (i.e., April, July, October, and January, respectively)

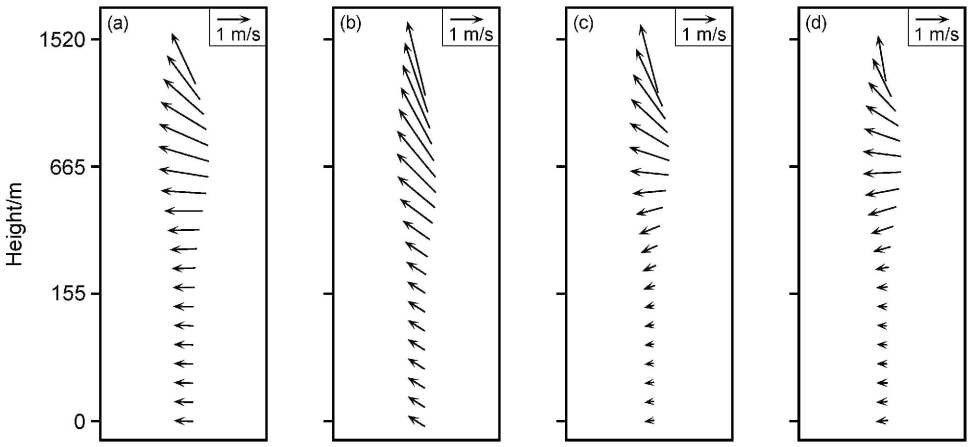

图 3　ERA-interim 再分析资料计算所得的离研究区域最近的格点处水平风场的垂直廓线（单位：m/s）：（a）4 月；（b）7 月；（c）10 月；（d）1 月。结果经过样条插值方法插值到 CFD 模式垂直层中

Fig. 3　Vertical profiles of horizontal winds (m/s) at the nearest grids to the CFD model domain in the ERA-interim reanalysis data. The results are interpolated into the CFD model level using spline interpolation. (a), (b), (c), and (d) show the patterns in April, July, October, and January, respectively

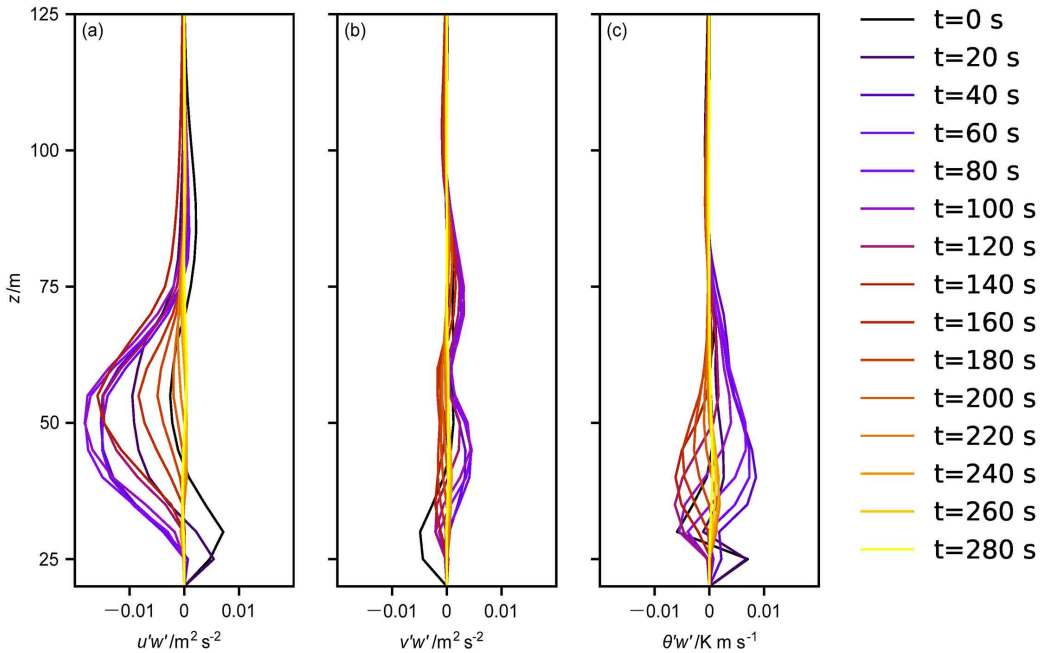

图 4 CFD 模式积分过程中近地面研究区域平均的垂直扰动通量廓线的时间演变（以春季试验为例）：（a）纬向扰动动量通量（$u'w'$）；（b）经向扰动动量通量（$v'w'$）；（c）扰动热量通量（$\theta'w'$）

Fig. 4 Temporal evolution of the profiles of horizontal-mean vertical fluxes at near surface in the spring test. (a), (b), and (c) are the zonal turbulent momentum flux ($u'w'$), meridional turbulent momentum flux ($v'w'$), and turbulent heat flux ($\theta'w'$), respectively

变化。在 $t = 280$ s 及其之后，扰动通量垂直廓线的形状基本保持不变，可以认为此时气象要素场已经适应复杂的下垫面并且达到一个相对稳定的状态。下文的分析，若无特别说明，均指达模式到稳态时（$t = 280$ s）的输出结果。

4 气候态下小区精细化风环境一般特征

图 5 为 CFD 模式达到稳态时（$t = 280$ s）城市冠层内三维流场以及离地 5 m（5 m AGL）处的风场。CFD 模式模拟的 4 个季节的平均风速与离研究区域最近的气象站近 5 年统计的平均风速较为接近。由图可知，由于小区下垫面复杂，流场具有明显的空间差异性，尤其是在城市冠层内部，流场极为散乱，表现为非常精细的三维结构。这种流场的分布与下垫面地形和建筑物的动力作用密切相关。

在春季 4 月（图 5a），CFD 模式入流（即背景风场）为偏东风，量级为 0.6 m/s 左右（图 3a）。受下垫面影响，小区内风向和风速均发生较大变化，与背景风场产生明显差异。在小区东部，由于高层建筑的存在，风场被阻隔。这种阻隔作用的结果是使得风场沿着东—西向的街道流入小区内部，同时在高层建筑周围产生绕流等现象。而在东部高层建筑下游方向（即西侧）产生明显的下沉运动。在小区中部，由于建筑物高度普遍不高，而且大部分范围被小区内的九龙湖所控制，因此小区内的风场相对来说比较均一，只在局部出现绕流以及上升下沉运动。当这些较为平滑的流线到达小区西部，遇到高度较高且分布比较密集的建筑群时，风场又一次被阻隔，并且在西部小区上游方向（即东侧）产生明显的强度较强的上升运动。另外，在西部建筑群内部，风场也是非常复杂的。具体建筑物配置对局地流场的影响将在后文详细分析。从近地面风场（图 5b）可以看到，小区内的整体风速明显小于背景风场，区域平均值约为 0.2 m/s。这可归因于下垫面粗糙元强烈的摩擦拖曳效应。但是在部分区域，如小区中部的九龙湖附近，风速则可以达到 0.8 m/s 的量级，明显高于背景风场的 0.6 m/s。可见，建筑物对于小区内局地强风的形成也是有非常重要的作用。有一个比较一致的特征，就是强风总是倾向于在开阔地带以及与背景风场方向一致的街道上出现。在风向上，不同的区域差别也非常明显。在东部以及西部的高层建筑群区域，风场变化较大，并且与背景风场的偏东风产生明显差异。如在 $(x, y) = (225, 25)$ 等处，甚至出现北风，与背景风场相差约 90°。而在开阔区域，如在中部的九龙

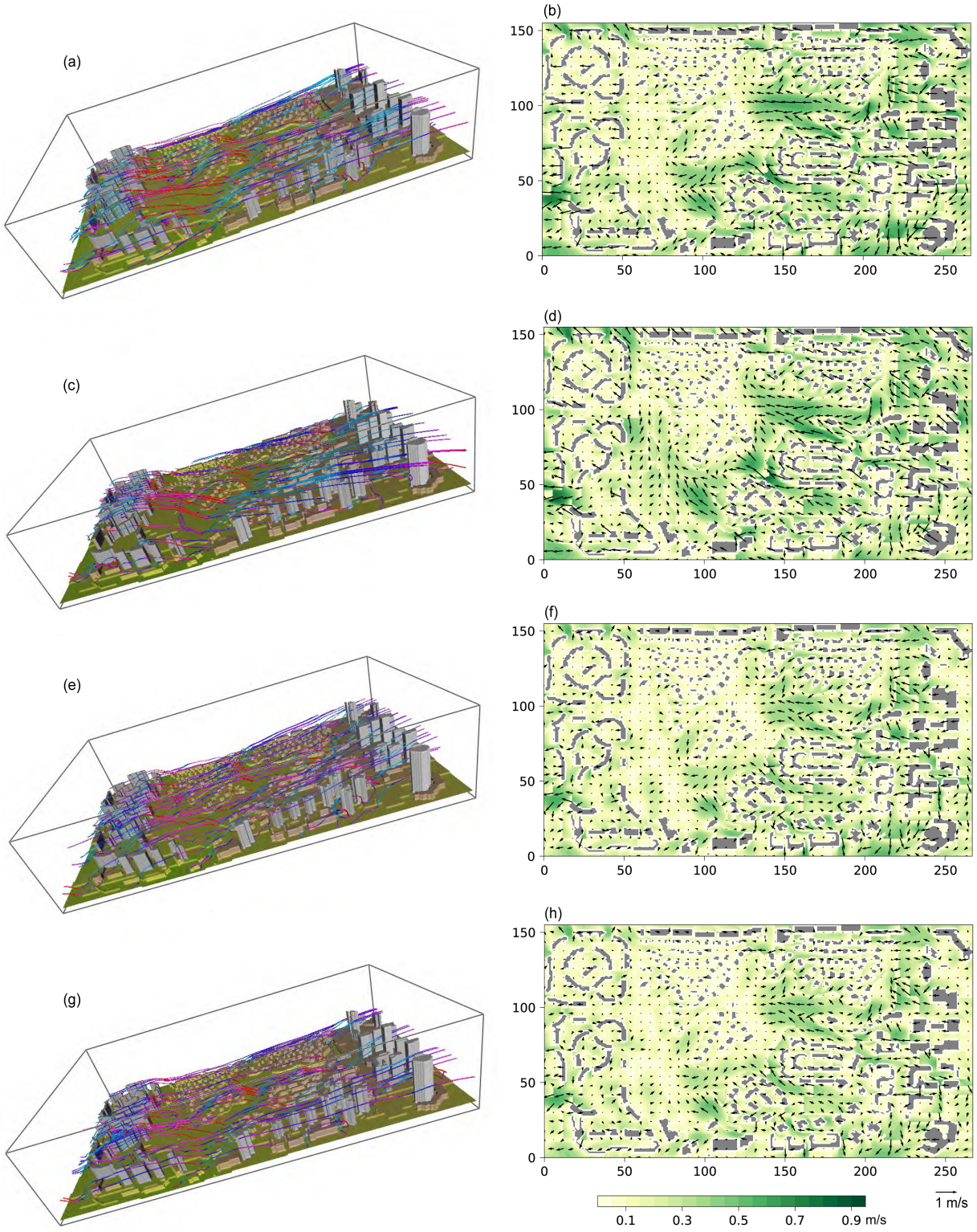

图 5　龙湖社区（a、c、e、g）城市冠层内部流场的三维视图（线条为流线，方向从右到左；颜色为垂直运动，暖色上升，冷色下沉）和（b、d、f、h）离地面 5 m 高度处（5 m AGL）的风场（箭头，颜色为风速，单位：m/s）：（a、b）4 月；（c、d）7 月；（e、f）10 月；（g、h）1 月

Fig. 5　General features of the fine-scale structures of the wind environment in Longhu Community. The left column is the three-dimensional view of the streamlines in the urban canopy layer (colors indicate vertical motions; warm and cold colors represent upward and downward motions, respectively), and the right column is the wind field (shades are the wind speed, units: m/s) at 5 m above ground level (AGL). The panels from top to bottom represent patterns in April, July, October, and January, respectively

湖区域，风场则与背景风入流较为一致。可见，局地建筑物布局对风向也有明显的调节作用。

在夏季7月，小区的中尺度背景入流转变为东南风，近地面风速为0.6 m/s（图3b）。由于该入流方向发生较大改变，小区内的环流场较春季来说也发生较大改变。流线主要呈现东南—西北走向（图5c）。在小区入口处（即东南部），受局部密集的高层建筑影响，流线表现为明显的三维复杂特征。在建筑群后部出现大范围的下沉运动。在小区中部，流场三维特征明显减弱，变得较为平直。在下游，受九龙湖西北岸陆地以及西北侧建筑的影响，流场被整体抬升，出现非常明显的上升运动。在建筑群内部，受单个建筑物影响，风场则极为不规则。从近地面风场（图5d）可以看到，小区内整体风速较背景入流小，只有0.3 m/s左右。与春季相比，较强的风场仍然出现在九龙湖等开阔区域，只是风向有所改变，从偏东风转变为东南风。我们还注意到部分在春季出现风速大值的区域在夏季不再出现风速的大值区，如在 $(x, y) = (50, 50)$ 等处。在夏季，则多出很多出现风速的大值区域，如在 $(x, y) = (55, 85)$ 等处。可见在不同季节，随着中尺度背景入流的改变，即使小区建筑物配置不发生变化，小区内的风环境也会产生较大差异。

再分析资料统计的龙湖社区所在区域的秋季和冬季代表月份的初始场基本一致，即两个季节风向均为偏东风，风速约为0.2 m/s。可以推断，两个季节CFD模式模拟的结果基本一致。从模拟结果（图5e–5h）可以看出，不管是三维视图还是平面图，两个季节的差异并不明显。这里仅对秋季10月的结果进行分析。从流场的三维图（图5e）以及近地面风场（图5f）可以看到，流线形状以及风场的分布与春季4月（图5a、5b）很相似。主要是因为这两个季节的中尺度背景入流均为偏东风，只是在量级上有所差异。10月区域平均的量级只能达到0.15 m/s。但是在部分区域，如 $(x, y) = (102, 40)$ 等处，秋季风速却高于春季。可见，减小背景风速而不改变风向，并不是单纯地使小区的近地面风速按比例减小。

5 局地建筑物布局对小区流场的机械影响

有上文分析可知，建筑物布局能显著调节局地风场的分布特征。这里选取3个子区域（图6红色方框）进行进一步分析。子区域A、B、C分别代表单个孤立高层建筑、分散低矮建筑群和密集高层建筑群等3个典型的建筑物布局。由于不同季节中尺度背景入流不尽相同，小区精细化风场也表现出明显的季节差异。受篇幅限制，这里仅选取背景入流差异较大的春季和夏季进行具体分析。

5.1 单个孤立高层建筑

图7为单个高层建筑在4月和7月的三维环流场。由图可知，该建筑对局地环流具有明显的调节作用，尤其是在低层近地面附近，这种调节作用使得环流场十分复杂。但在较高层次（如建筑物层顶附近），流线则较为平直。

这里进一步对不同层次的风场特征进行分析（图8）。在建筑物低层（z = 295 m）（图8a、8b），虽然模式入口处背景入流在春季和夏季分别为偏东风和东南风，但对于子区域A来说，受上游建筑物的影响，该区域的局地入流基本一致，均为偏东风，且量级相差不大。因此，该区域的风场表现也基本一致。在建筑物东部，表现为明显的绕流，并在建筑物西南侧幅合，产生明显的上升运动。这种幅合运动在春季强度更强，上升运动也更大。在建筑物中层（z = 315 m）（图8c、8d），子区域A的局地入流方向在两个季节存在较大差异，因此其环流场也有所不同。春季，建筑物东侧产生明显绕流，同时紧贴建筑物附近存在明显的下沉运动（气流受建筑物阻隔所致），气流在西侧汇合并伴随强的上升运动，在该区域产生水平风速较低的尾流区。夏季，类似的现象则分别产生在建筑物的东南侧和西北侧。在建筑物顶层附近（z = 379 m）（图8e、8f），两个季节的局地入流比中低层更均匀。水平方向上，建筑物的作用与低层一致，使风场产生绕流；在垂直方向上，建筑物则使风场在迎风面产生明显的上升运动，在背风面产生明显下沉运动。

5.2 低矮分散建筑群

图9和图10为子区域B周围流场的三维视图和城市冠层内不同层次的风场分布。可以看到，低矮分散的建筑群对局地流场也有明显的调节作用。在建筑物顶层以下，两个季节的风场表现基本一致，只是夏季的风速量级比春季更大。虽然整个模式的中尺度背景入流在春季和夏季有较大差异，但可能受上游建筑物布局的影响，使得子区域B近

地面的局地入流在两个季节的差异并不明显。因此，区域内的局地风环境差异也并不大。在建筑物低层（z = 280 m，图 10a、10b），受地形的阻隔影响（子区域 B 所在的别墅区坐落于九龙湖的西北岸），水平风沿着湖岸分布，入流风向随之由东南风转变为西北风，在别墅区东侧则转变为偏南风。同时，风场在遇到湖岸时，还被明显地抬升（图 9）。这种抬升作用在夏季更为明显，这是因为局地入流风速在夏季更大而造成的。在建筑物中层（z = 290 m，图 10c、10d），单个别墅对局地风场也能产生显著影响，同时不同别墅周围的环流场也能相互干扰影响，使得别墅区内部的风场十分的杂乱。就整个别墅区的整体效果而言，他们能作为下垫面摩擦力，产生拖曳效应，使别墅区内的风速显著降低。这种影响在背景风速本来就很小的春季尤其明显。相对来说，夏季别墅区内的风速较

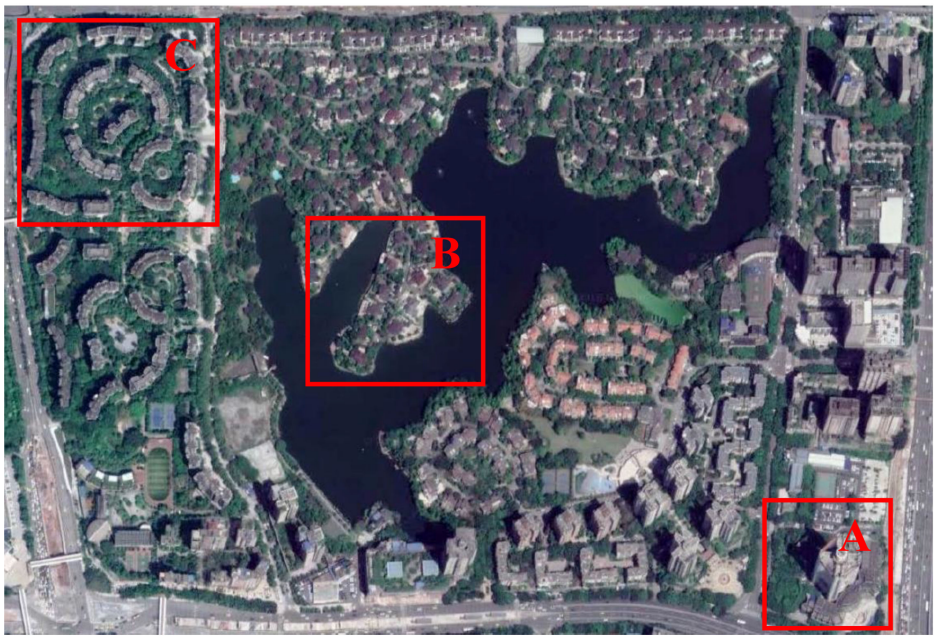

图 6　3 个典型建筑物布局子区域（A、B、C）的分布

Fig. 6　Locations of the three selected subareas (A, B, C)

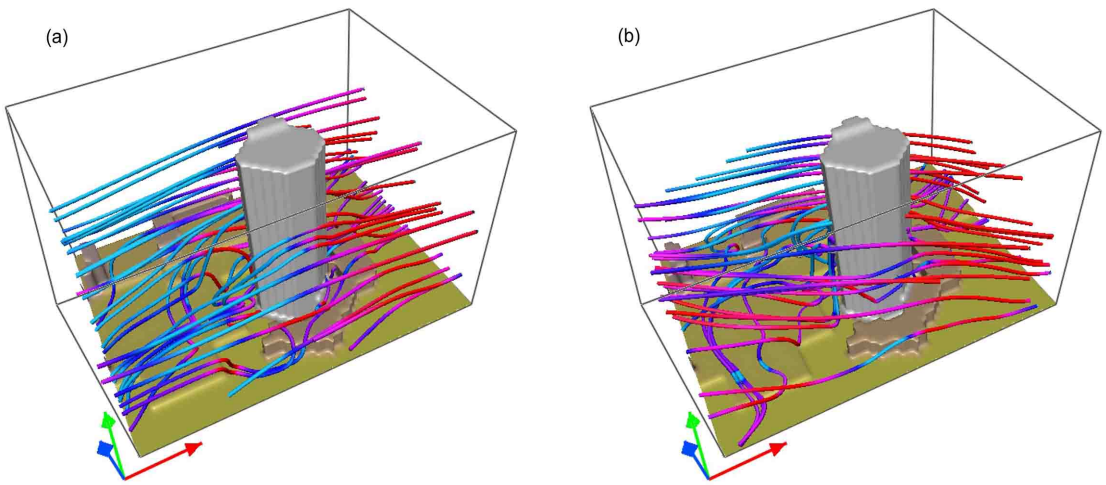

图 7　（a）4 月和（b）7 月单个高层建筑（子区域 A）周围的三维环流场。线条为流线（方向从右到左），颜色代表上升运动（暖色上升，冷色下沉）

Fig. 7　Three-dimensional view of streamlines around the isolated tall building (subarea A) in (a) April and (b) July. The direction is from right to left, and the warm (cold) color indicates upward (downward) motions

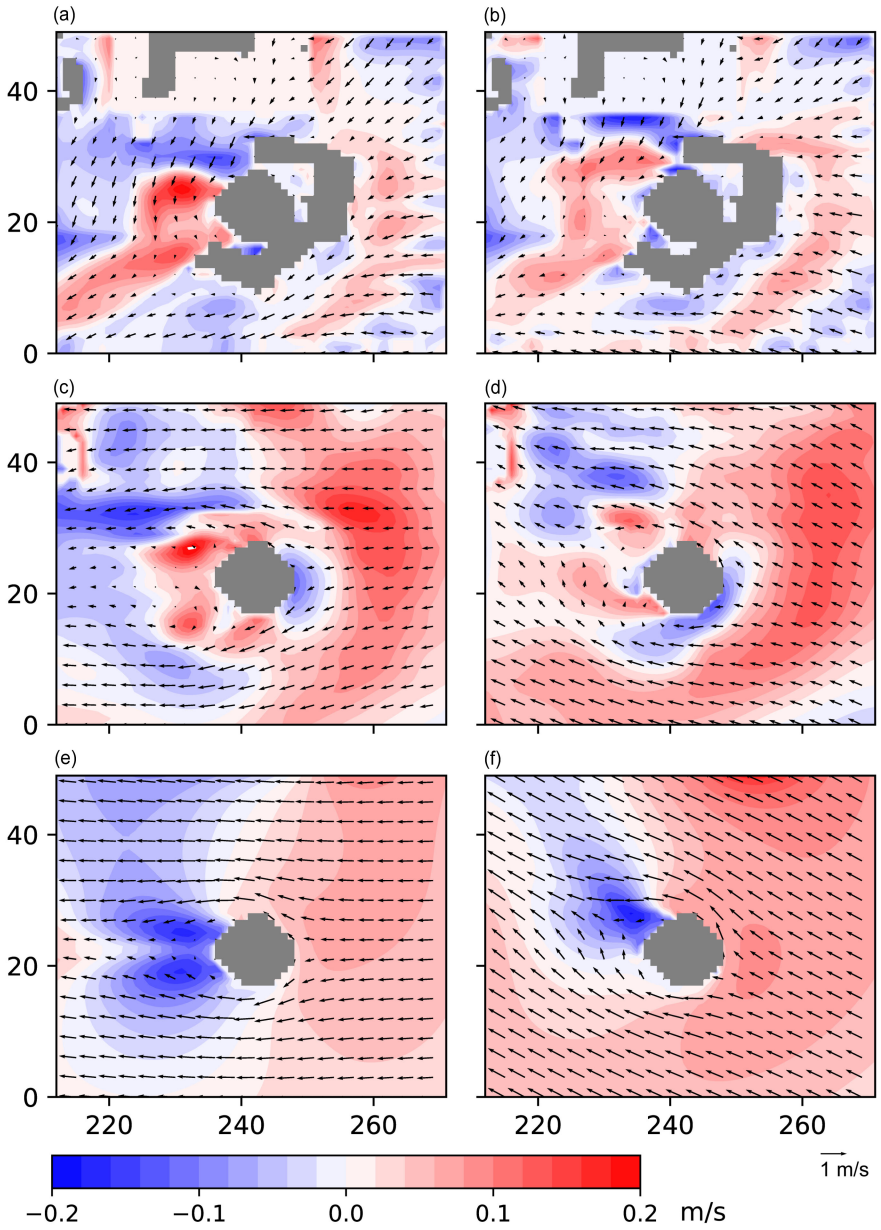

图 8 4 月（左列）和 7 月（右列）单个高层建筑（子区域 A）周围的环流场：（a、b）建筑物低层（z = 295 m）；（c、d）建筑物中层（z = 315 m）；（e、f）建筑物高层（z = 379 m）。箭头为水平风场（单位：m/s），填色为垂直风速（单位：m/s），灰色快为建筑物

Fig. 8 Local circulations around the isolated tall building (subarea A) in April (left column) and July (right column): (a, b) z = 295 m (c, d) z = 315 m; (e, f) z = 379 m. The vectors are horizontal winds (m/s), the shades are vertical winds (m/s), and the grey patches are buildings and topography

大，对于区域内的通风有积极作用。在建筑顶层附近（z = 300 m，10e、10f），风场受建筑物的影响变小，因而其分布与模式中尺度背景入流较为一致。

5.3 密集高层建筑群

图 11 和图 12 分别为子区域 C 城市冠层内的流场的三维视图和不同层次的风场分布。在建筑物低层（z = 280 m，图 12a、12b），由于子区域 C 内的高层建筑基本呈现封闭状态，加之不同的单个高层建筑周围的环流相互干扰，使得小区内近地面的整体风速很小。这种现象在春、夏两个均很明显。这表明，这种建筑物布局对于小区通风以及污染物扩散是极为不利的。在建筑物中低层（z = 295 m，图 12c、12d），风场的分布同近地面类似，但单个建筑物对局地流场的影响更为显著，可以明显地看到不同建筑物周围的强烈的上升下沉运动。同时，小区内的风速有所增加，但强度仍然很弱。在建筑物顶层附近（z = 315 m，图 12e、12f），小区内的风环境有明显改观。风速明显增加，达到接近

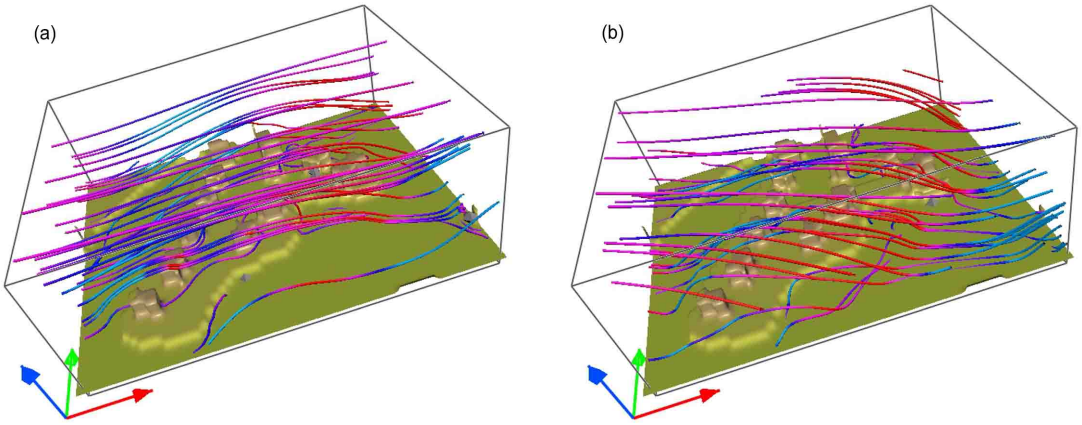

图 9　同图 7，但为分散低矮建筑群（子区域 B）周围的三维环流场

Fig. 9　Same as Fig. 8, but for local circulations around the scattered low-rise buildings (subarea B)

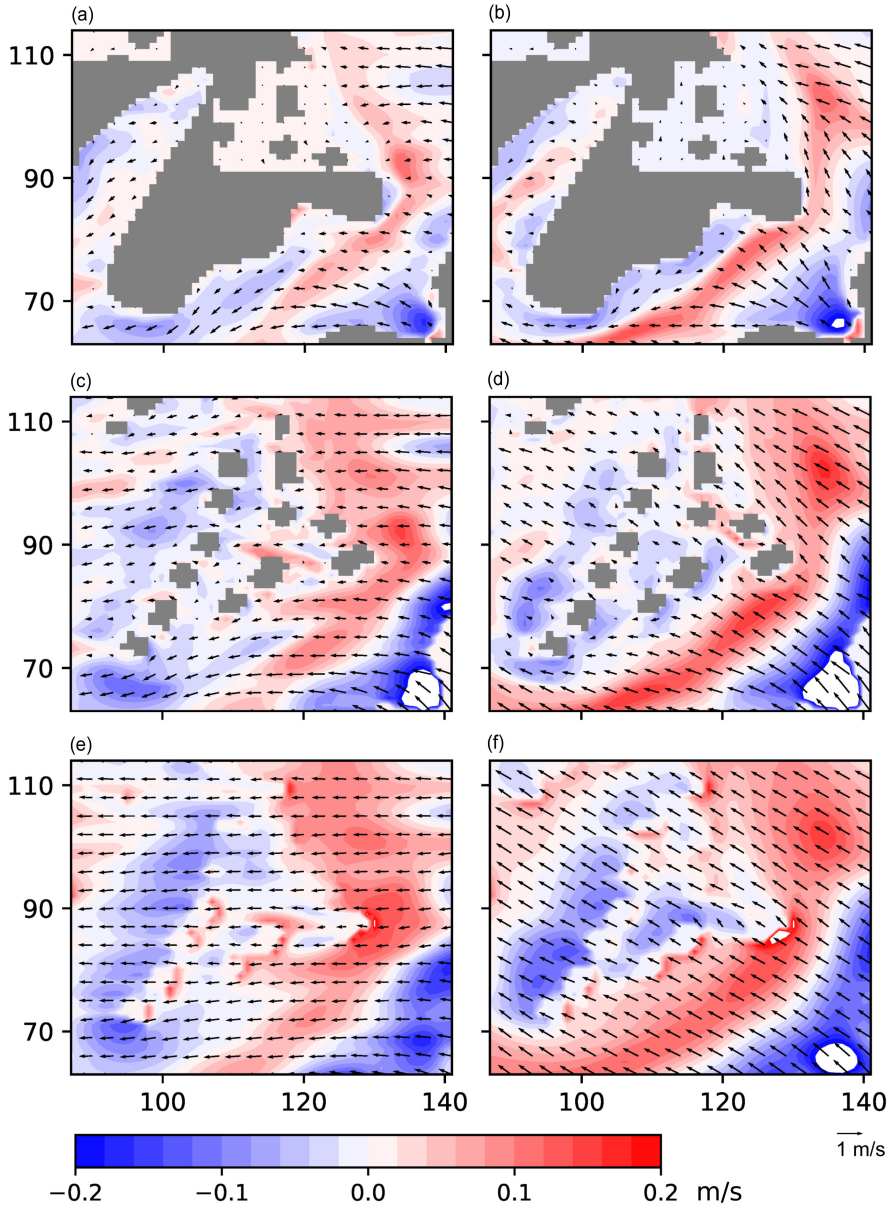

图 10　同图 8，但为 z = 280 m、z = 290 m 和 z = 300 m 高度处分散低矮建筑群（子区域 B）周围的三维环流场

Fig. 10　Same as Fig. 8, but for local circulations around the scattered low-rise buildings (subarea B) at z = 280 m, z = 290 m, and z = 300 m

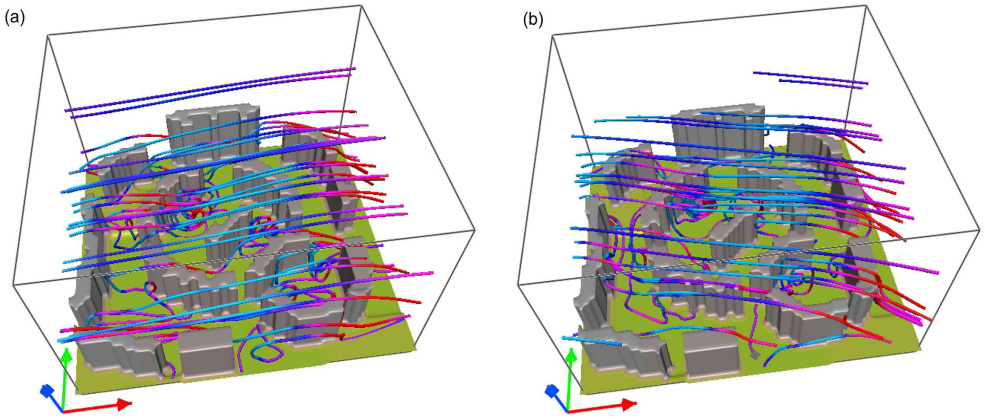

图 11　同图 7，但为密集高层建筑群（子区域 C）周围的环流场

Fig. 11　Same as Fig. 7, but for three-dimensional view of the streamlines of the dense high-rise buildings (subarea C)

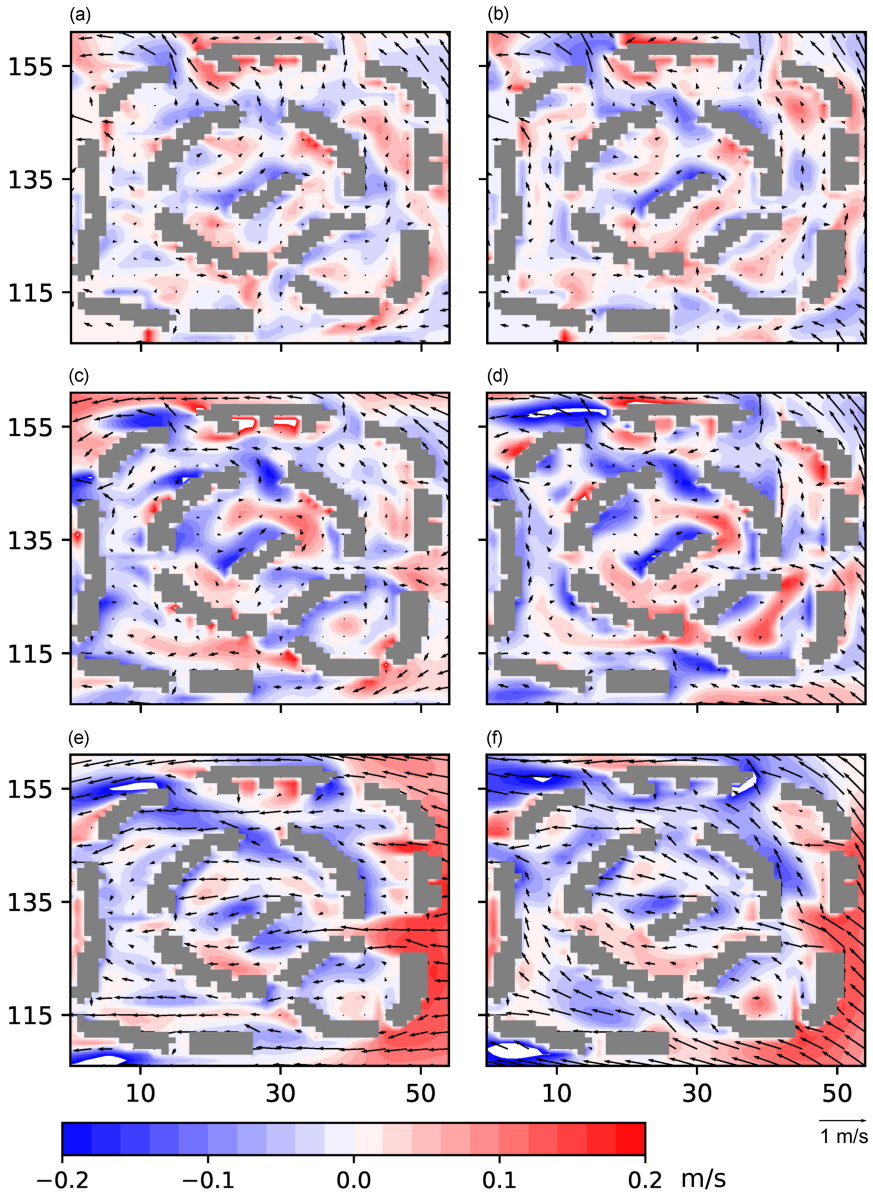

图 12　同图 8，但为 z = 280 m、z = 295 m 和 z = 315 m 高度处密集高层建筑群（子区域 C）周围的三维环流场

Fig. 12　but for dense high-rise buildings (subarea C) at z = 280 m, z = 295 m, and z = 315 m, respectively

于模式中尺度背景入流的量级，约为 0.5 m/s。风向也主要与背景入流一致。

6 结论

对具有复杂下垫面的城市小区精细化风环境进行研究是当前相关领域的热点，而针对具有复杂地形的山地型城市（如重庆）的研究还比较匮乏。本文拟采用基于 LES 开发的局地气象模式，结合高分辨率下垫面资料（含陡峭地形和复杂建筑物），以重庆市渝北区龙湖社区为例，对小区的风环境进行高分辨率的数值模拟，探讨气候态下小区精细化风场的一般特征，并进一步分析小区建筑物布局对局地环流的调节作用。

结果表明，下垫面（包括地形和建筑物等）能显著调节小区内风场的分布，风速大值区主要出现在九龙湖等开阔区域以及与中尺度背景入流方向一致的街道中；九龙湖形状对近地面风场的分布也有重要作用。在小区四周高层建筑密集的地带，风场极为散乱不规则；在较为封闭的建筑物组团（如小区西北部圆形状分布的建筑群）内，很难出现较强的风速，甚至出现静风现象。建筑物的这些影响在近地面，尤其是在城市冠层内部，最为明显，越往上这种影响越弱。在夏季，小区整体风场以东南风为主，而其他 3 个季节则以偏东风为主。4 个季节中，夏季小区内的风速最大，区域平均风速为 0.3 m/s 左右，局地甚至能出现高于背景风速的风速，可达 0.8 m/s；其他 3 个季节的风速则较弱，区域平均的风速在 0.2 m/s 左右。

针对春季和夏季中尺度背景入流有较大差异的季节，对单个孤立高层建筑、低矮分散建筑群和密集高层建筑群的风环境特征进行了详细分析。结果表明，单个孤立高层建筑近地面迎风面附近存在明显地绕流，局地风速有所增加，而在背风面附近则形成了尾流区，水平风速较低。在低矮分散的建筑群区域，建筑物的整体高度不高，流场相对来说比较一致，且由于上游建筑物的影响，使得区域局地入流在春夏两个季节差异不明显，夏季风速更大，有利于小区的通风。在密集高层建筑群内，由于建筑物群本身的布局比较封闭，加之不同建筑物的环流场存在相互干扰及影响，使得小区近地面风速几乎为零，非常不利于小区通风和污染物扩散。

本文主要从动力机械影响的角度探讨气候态下城市冠层内建筑物布局对局地环流场的影响，而其热力作用则鲜有涉及。有研究（Chen et al., 2015a, 2015b; Park et al., 2015）表明，在城市边界层内受下垫面动力及热力的共同影响，能形成各种尺度（从毫米量级至百米量级）的湍流，这些湍流对小区内的风环境调节也有重要作用。这些将有待后续工作进一步完善。

参考文献（References）

Arnold S J, ApSimon H, Barlow J, et al. 2004. Introduction to the DAPPLE air pollution project [J]. Science of the Total Environment, 332(1-3): 139−153. doi:10.1016/j.scitotenv.2004.04.020

Britter R E, Hanna S R. 2003. Flow and dispersion in urban areas [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 35: 469−496. doi:10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147

Chen G X, Zhu X Y, Sha W M, et al. 2015a. Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part I: Configuration and verification of a Down-Scaling Simulation System (DS3) [J]. Mon. Wea. Rev., 143(5): 1849−1872. doi:10.1175/mwr-d-14-00212.1

Chen G X, Zhu X Y, Sha W M, et al. 2015b. Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part II: The impacts of land use and buildings [J]. Mon. Wea. Rev., 143(5): 1873−1894. doi:10.1175/mwr-d-14-00230.1

Cheng H, Castro I P. 2002. Near wall flow over urban-like roughness [J]. Bound.-Layer Meteor., 104(2): 229−259. doi:10.1023/a:1016060103448

崔桂香, 张兆顺, 许春晓, 等. 2013. 城市大气环境的大涡模拟研究进展 [J]. 力学进展, 43(3): 295−328. Cui Guixiang, Zhang Zhaoshun, Xu Chunxiao, et al. 2013. Research advances in large eddy simulation of urban atmospheric environment [J]. Advances in Mechanics (in Chinese), 43(3): 295−328. doi:10.6052/1000-0992-13-016

Cui Z Q, Cai X M, Baker C J. 2004. Large-eddy simulation of turbulent flow in a street canyon [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 130(599): 1373−1394. doi:10.1256/qj.02.150

Hamnett S. 2011. Designing high-density cities for social and environmental sustainability [J]. Australian Planner, 48(1): 61−64. doi:10.1080/07293682.2011.530590

胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J]. 大气科学, 27(4): 712−728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(4): 712−728. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.18

Jarvis A, Reuter H I, Nelson A, et al. 2008. Hole-filled SRTM for the globe version 4 [EB/OL]. http://srtm.csi.cgiar.org.

蒋维楣, 苗世光, 张宁, 等. 2010. 城市气象与边界层数值模拟研究 [J]. 地球科学进展, 25(5): 463−473. Jiang Weimei, Miao

Shiguang, Zhang Ning, et al. 2010. Numerical simulation on urban meteorology and urban boundary layer [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 25(5): 463−473.

矫梅燕. 2007. 关于提高天气预报准确率的几个问题 [J]. 气象, 33(11): 3−8. Jiao Meiyan. 2007. The ways to enhance the weather forecast skill [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(11): 3−8. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.11.001

Leonard B P. 1979. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 19(1): 59−98. doi:10.1016/0045-7825(79)90034-3

Letzel M O, Krane M, Raasch S. 2008. High resolution urban large-eddy simulation studies from street canyon to neighbourhood scale [J]. Atmos. Environ., 42(38): 8770−8784. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.08.001

Letzel M O, Helmke C, Ng E, et al. 2012. LES case study on pedestrian level ventilation in two neighbourhoods in Hong Kong [J]. Meteorologische Zeitschrift, 21(6): 575−589. doi:10.1127/0941-2948/2012/0356

李嘉良, 张超, 齐红甲. 2013. 遥感影像提取建筑物高度的方法 [J]. 河北联合大学学报 (自然科学版), 35(2): 121−125. Li Jialiang, Zhang Chao, Qi Hongjia. 2013. Analysis of remote sensing images to extract building height [J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition) (in Chinese), 35(2): 121−125. doi:10.3969/j.issn.2095-2716.2013.02.028

李磊, 胡非, 刘京. 2015. CFD 技术在我国城市气候环境微尺度问题中的应用 [J]. 气象科技进展, 5(6): 23−30. Li Lei, Hu Fei, Liu Jing. 2015. Application of CFD technique on micro-scale issues in urban climatic environment researches in China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 5(6): 23−30. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.004

Lilly D K. 1962. On the numerical simulation of buoyant convection [J]. Tellus, 14(2): 148−172. doi:10.3402/tellusa.v14i2.9537

蒙伟光, 闫敬华, 扈海波. 2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响 [J]. 大气科学, 31(2): 364−376. Meng Weiguang, Yan Jinghua, Hu Haibo. 2007. Possible impact of urbanization on severe thunderstorms over Pearl River delta [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(2): 364−376. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.17

Ng E. 2009. Policies and technical guidelines for urban planning of high-density cities-air ventilation assessment (AVA) of Hong Kong [J]. Building and Environment, 44(7): 1478−1488. doi:10.1016/j.buildenv.2008.06.013

Oke T R. 1988. Street design and urban canopy layer climate [J]. Energy and Buildings, 11(1-3): 103−113. doi:10.1016/0378-7788(88)90026-6

Park S B, Baik J J, Han B S. 2015. Large-eddy simulation of turbulent flow in a densely built-up urban area [J]. Environmental Fluid Mechanics, 15(2): 235−250. doi:10.1007/s10652-013-9306-3

Patankar S V. 1980. Numerical Heat Transfer and fluid Flow [M]. Washington: Hemisphere Pub. Co., 1-255.

Rotach M W, Gryning S E, Batchvarova E, et al. 2004. Pollutant dispersion close to an urban surface - the BUBBLE tracer experiment [J]. Meteor. Atmos. Phys., 87(1-3): 39−56. doi:10.1007/s00703-003-0060-9

Sha W. 2002. Design of the dynamics core for a new-generation numerical model of the local meteorology (in Japanese) [J]. Kaiyo Mon., 2: 107−112.

Sha W. 2008. Local Meteorological Model Based on LES Over the Cartesian Coordinate and Complex Surface (in Japanese) [M]. Tokyo: Meteorological Society of Japan Press, 21–26.

Shen Z, Wang B B, Cui G X, et al. 2015. Flow pattern and pollutant dispersion over three dimensional building arrays [J]. Atmos. Environ., 116: 202−215. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.06.022

Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 91(3): 99−164. doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2

王宝民, 刘辉志, 桑建国, 等. 2003. 大风条件下城市冠层流场模拟 [J]. 大气科学, 27(2): 255−264. Wang Baomin, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. 2003. Simulation of flow field in an urban canopy layer during the strong wind [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(2): 255−264. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.02.12