

邢佩,房小怡,张宁,等,2019.城市近地面高分辨率快速风场模型构建与应用[J].气象,45(7):978-988. Xing P, Fang X Y, Zhang N, et al, 2019. Construction and application of the urban surface high-resolution and fast wind field model[J]. Meteor Mon, 45(7):978-988(in Chinese).

城市近地面高分辨率快速风场模型构建与应用^{*}

邢佩^{1,2} 房小怡¹ 张宁³ 程宸¹ 王昕瑶⁴ 刘勇洪¹
杜吴鹏¹ 杨若子¹ 党冰¹

1 北京市气候中心,北京 100089

2 北京城市气象研究院,北京 100089

3 南京大学大气科学学院,南京 210046

4 上海市气象科学研究所,上海 200030

提 要:介绍了城市近地面高分辨率快速风场模型的构建,以中尺度模式结果作为背景驱动场,5 m 分辨率建筑物资料作为模型数据输入,通过区块处理、分区函数插值和质量守恒约束,实现了在较短时间(2~3 h)内获得可覆盖城市尺度的高分辨率(10 m 左右)的近地面风场。基于该模型对北京四环内主城区(20 km×19 km)在 8 个典型时刻的 10 m 分辨率风场进行了模拟和检验,结果如下:(1)在风速方面,模拟值与观测值相比往往会偏大些,夏季 4 个时刻模拟的准确率在 90% 以上,冬季 4 个时刻模拟的准确率在 60% 以上;在风向方面,8 个时刻的准确率均在 40% 以上。(2)基于该风场模型模拟得到的高分辨率风场能够反映出北京主城区风的山谷风日变化特征;明显的风速大值区往往对应着粗糙度较小的下垫面,而一些密集高层建筑区域始终是流场凌乱的风速小值区。(3)以东二环某一区块为例,该高分辨率风场模型还可对重点街区的精细化风场特征进行展示,可以清晰地反映出流场因建筑物分布产生的分流、汇合、局部环流,以及尾流。综上所述,该城市风场模型为实现短时间内获得覆盖城市尺度的高分辨率近地面风场提供了有效途径。掌握城市尺度的精细化风环境特征,有助于识别亟需改善或限制开发的关键区域,辅助城市通风廊道的合理构建和实施,从而达到优化城市内部通风性能、缓解城市热岛、增加风环境舒适度的最终目标。

关键词:风场模型,高分辨率,下垫面,建筑

中图分类号: X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.008

Construction and Application of the Urban Surface High-Resolution and Fast Wind Field Model

XING Pei^{1,2} FANG Xiaoyi¹ ZHANG Ning³ CHENG Chen¹ WANG Xinyao⁴
LIU Yonghong¹ DU Wupeng¹ YANG Ruozhi¹ DANG Bing¹

1 Beijing Municipal Climate Centre, Beijing 100089

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

3 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210046

4 Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030

Abstract: This paper introduces the construction of the Urban Surface High-resolution and Fast Wind Field (USHFWF) model, which uses the mesoscale model simulation as the background field and 5 m resolution

^{*} 中国气象局气候变化专项(CCSF201733)、北京市气象局科技项目(BMBKJ201704004)及国家自然科学基金项目(41675008 和 51538005)共同资助

2018 年 1 月 28 日收稿; 2019 年 3 月 20 日收修定稿

第一作者:邢佩,主要从事应用气候和气候变化研究. Email:20042143xp@163.com

通信作者:房小怡,主要从事应用气候研究. Email:fangxybj@163.com

building data as the model input data. The USHFWF model is developed through block processing, spatial interpolation based on partition function and mass conservation constraint, in order to achieve the near-surface wind field with a high resolution (horizontal resolution of $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ grid) covering city scale over a short period of time (about 2–3 h). Based on this model, wind field with 10 m resolution in downtown of Beijing (i. e. within Fourth Ring Road, $20\text{ km}\times 19\text{ km}$) is simulated and validated at 8 typical times. The main results are as follows: (1) In terms of wind speed, the simulation is usually larger than the observed values. The accuracy rates of the four times in summer and winter are more than 90% and 60%, respectively. In terms of wind direction, the accuracy rate of the eight times is all more than 40%. (2) The high-resolution wind field simulated by USHFWF model reflects the diurnal variation characteristics of wind in the central part of Beijing. Obviously, the area with large wind speed usually corresponds to the underlying surface with less roughness, and the area with small wind speed and disturbed flow usually corresponds to the underlying surface with high-density or high-rise buildings. (3) The USHFWF model can also show fine scale characteristics of the key block's wind field. Take a block near the East Second Ring Road as an example. The simulated wind field can clearly reflect the flow due to the distribution of buildings, such as diffluence, confluence, local circulation, and wake flow. In summary, USHFWF model provides an effective way to obtain high-resolution near surface wind field covering urban scale in a short time. It is helpful to identify the key areas that need to be improved or restricted to development, and to facilitate the rational construction and implementation of the urban ventilation corridors, so as to achieve the ultimate goal of optimizing the internal ventilation performance, alleviate the urban heat island effect and improve the wind-environment comfort.

Key words: wind field model, high resolution, underlying surface, buildings

引言

伴随我国快速城市化而产生的生态环境问题日趋严重,特别是各大城市热岛效应、空气污染等问题尤为突出(徐祥德,2002;刘伟东等,2016;王文杰等,2016)。除了降低污染物排放外,如何增强城市通风,提高大气自净能力,是改善城市环境重要途径之一。众所周知,风在减轻城市热岛效应、缓解局地空气污染、降低建筑物能耗以及提高城市宜居性等方面发挥着重要作用(李鹏和余庄,2006;刘姝宇和沈济黄,2010;黄柏良,2011;郑拴宁等,2012)。风环境是城市生态建设、城市规划和建筑设计中考虑的重要内容,也是城市应对气候变化研究的关注点。2015年召开的中央城市工作会议明确提出“增强城市内部布局的合理性,提升城市的通透性和微循环能力”,2016年印发的《城市适应气候变化行动方案》中也特别提出“打通城市通风廊道,增加城市的空气流动性”。因此,掌握一个城市细致的风环境十分重要,是完成上述工作的基础。

大气流场的变化主要受气象扰动、地形、地表粗

糙度等因素的影响。在郊区,地表覆盖简单,流场相对平直;在城市,高、密、阔的建筑显著改变了城区地面的动力学粗糙度(韩素芹等,2008)。这种高粗糙度的城市下垫面不仅在区域尺度、局地尺度上改变了近地层的流场(陈燕等,2005;彭珍和胡非,2006;徐阳阳等,2009),还显著影响了微尺度的街谷内大气流场,例如产生环流、涡流、管狭风等现象,导致同一街区内的不同位置上的风速、风向都可能存在较大差异(Xie,2011;郑颖生,2013)。而城市内部气象观测站数量有限,密度较低。鉴于城市风场的复杂性,为了客观评估通风能力,营造健康舒适的城市风环境,开展城市尺度的精细化风场模拟分析技术就显得十分必要。

现阶段,国内外学者对城市风场的模拟主要有以下三种方法:(1)通过中尺度气象模式(如 Weather Research and Forecasting Model, WRF; Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model, MM5; Regional Boundary Layer Model, RBLM等)模拟各种复杂地形地貌下的风场,表现城市用地和建筑物对总体风环境的影响(Grossman-Clarke et al, 2008; Jin et al, 2016)。但中尺度模式的局限性在于

它的水平空间分辨率一般为 1~3 km, 不具备直接体现建筑尺度的流体动力学分辨率, 无法很好地反映建筑物对城市内部风场的精细化影响(黄燕燕等, 2006; 李磊等, 2013)。(2) 通过计算流体力学技术(CFD), 针对建筑周边的微尺度范围, 充分发挥其处理复杂几何形体的能力, 得到街区内部几米左右的精细化风场(董文成等, 2014; Toparlak et al, 2015)。然而, 受计算机性能和建模复杂性所限, 利用 CFD 进行城市风环境模拟时仅能覆盖小范围街区, 无法快速完成对整个城市范围内的高分辨率风场模拟。(3) CFD 与中尺度模式耦合, 用中尺度模式获取大尺度气象背景场信息并传递给 CFD 作为边界条件, 用 CFD 精细描述建筑物周边流场和热力场结构(Baik et al, 2009; Li et al, 2010; 李磊等, 2013)。但这种方法仍是针对某一关心区域, 无法应用于整个城市, 且计算时间成本也较高(Neophytou et al, 2011; Nakayama et al, 2012)。如何同时兼顾模拟范围和水平分辨率, 即获得城市尺度体现建筑物对气流影响的 10 m 级风场目前罕有研究。鉴于已有方法的局限性, 本文旨在构建一个快速的城市近地面高分辨率风场模型, 能够在较短的时间内, 提供空间尺度可覆盖城市一局地区域一街区的高分辨率(10 m 左右)的近地面风场, 且该模型能够考虑到建筑物的高度、形状、分布等因子对气流造成的影响。

1 方法和数据

1.1 模型构建思路

Zhang et al(2016a; 2016b) 根据建筑物形态和气流来向, 利用分区函数法进行风场初步插值, 包括垂直廓线、单个建筑(风向垂直建筑表面、风向成夹角建筑表面)、屋顶风速、街区气流的插值, 并利用基于质量守恒的风场调整模型, 为复杂建筑下垫面提供小区尺度(约 1 km × 1 km) 高分辨率(1~10 m) 风场模拟结果。

在建筑密度较小的城市区域, 利用幂指数廓线代替城市近地层风速廓线, 而在建筑物密集的城市区域, 幂指数廓线往往对位于城市建筑物平均高度以下的冠层内的城市平均风场有过高估计的趋势, 为此可采用城市冠层廓线插值方案, 具体如式(1)所示。

$$u_0(z) = u_{\text{can}} \ln[(z-d)/z_0] / \ln(H_{\text{can}}/z_0) \quad z > H_{\text{can}}$$

$$u_0(z) = u_{\text{can}} \exp[\alpha(z)(z/H_{\text{can}} - 1)] \quad z \leq H_{\text{can}} \quad (1)$$

式中, z 为某层高度; $u_0(z)$ 为该层风速差值; H_{can} 为冠层高度, 在城市区域可用区域内建筑物平均高度代替; u_{can} 为冠层顶处的风速值; d 为位移高度, 约为 $0.7H_{\text{can}}$; z_0 为粗糙参数, 约为 $0.1 \sim 0.2H_{\text{can}}$; $\alpha(z)$ 为 e 指数衰减因子。在获得背景风廓线的基础上, 给出建筑物流场关键区域(包括: 迎风位移区、背部空腔区、背部尾流区、顶部涡旋区) 大小和风速特征的估算公式。

其中, 迎风位移区的长度 L_F 为:

$$\frac{L_F}{H} = \frac{2(W/H)}{1 + 0.8W/H} \quad (2)$$

式中, H 和 W 分别是建筑物高度和横风向宽度。迎风位移区风速由初始入流廓线风速乘以一个衰减因子 C_{dz} 获得, 即是: $\frac{u_0(z)}{u_0(H)} = C_{dz} (\frac{z}{H})^p$, 一般可取 C_{dz} 为 0.4, p 为廓线指数。

背部空腔区和背部尾流区的半长轴 L_R 由经验公式给出:

$$\frac{L_R}{H} = \frac{1.8W/H}{(L/H)^{0.3}(1 + 0.24W/H)} \quad (3)$$

式中, L 是建筑物的顺风向宽度。

该区域内空间三维结构近似椭球体, 满足椭球方程:

$$\frac{X^2}{L_b^2[1 - (Z/H)^2]} + \frac{Y^2}{(0.5W)^2} = 1 \quad (4)$$

式中, X, Y, Z 分别为空间直角坐标系下的坐标值。

在背部空腔区和尾流区分别设定 v, w 方向分量风速满足 $v_0(x_b, z_b) = 0, w_0(x_b, z_b) = 0$, 空腔区和尾流区的 u 分量风速插值公式分别为式(5)和式(6):

$$u(x_b, z_b) = -u(H) [1 - (\frac{X}{d_N})^2] \quad (5)$$

$$u(x_b, z_b) = u(z) (1 - \frac{d_N}{X})^{1.5} \quad (6)$$

式中, 参数 d_N 可由式(7)计算得到:

$$d_N = L_R \sqrt{[1 - (\frac{Z}{H})^2][1 - (\frac{Y}{W})^2]} - 0.5L \quad (7)$$

在以上初始插值方案的基础上, 利用质量守恒的风场调整模型获得最终风场模拟结果。Zhang et al(2016a; 2016b) 利用汉堡大学风洞实验数据集(Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models, CEDVAL) 针对

多组情景案例进行了对比研究,验证了风场快速分析模型在小区尺度模拟性能的可靠性。本文以该风场分析模型为核心,与中尺度模式结合,并针对城市尺度的模拟增加了区块划分、拼合等处理,构建了城市近地面高分辨率快速风场模型,应用于城市尺度。具体技术路线如图 1 所示:首先,确定模拟域和典型

个例后,利用 WRF 进行模拟,将得到的模拟结果作为初始场输入城市近地面高分辨率风场模型;其次,对建筑物资料进行预处理,将得到的 5 m 网格分辨率建筑资料(图 2)均匀划分为多个 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的区块,再对每个区块四周各补充 50 网格作为边界缓冲区,最后按照坐标位置对区块依次进行编号;然

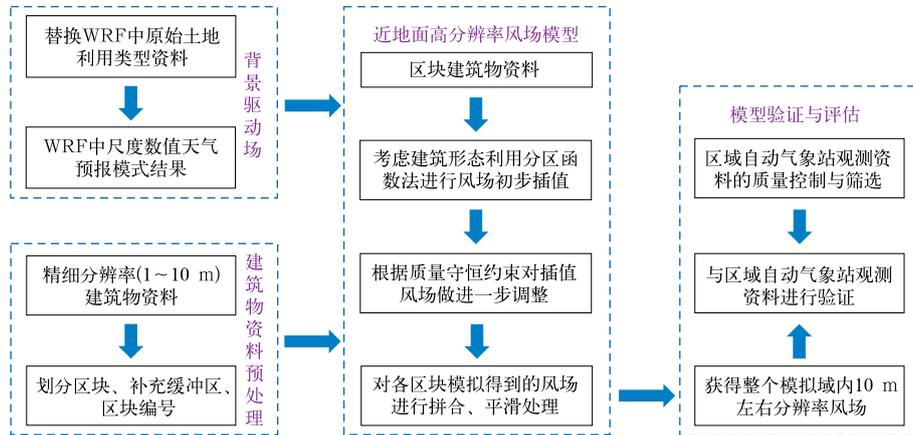


图 1 城市近地面高分辨率风场模型构建技术路线图

Fig. 1 Technical structure of the USHFWF model construction

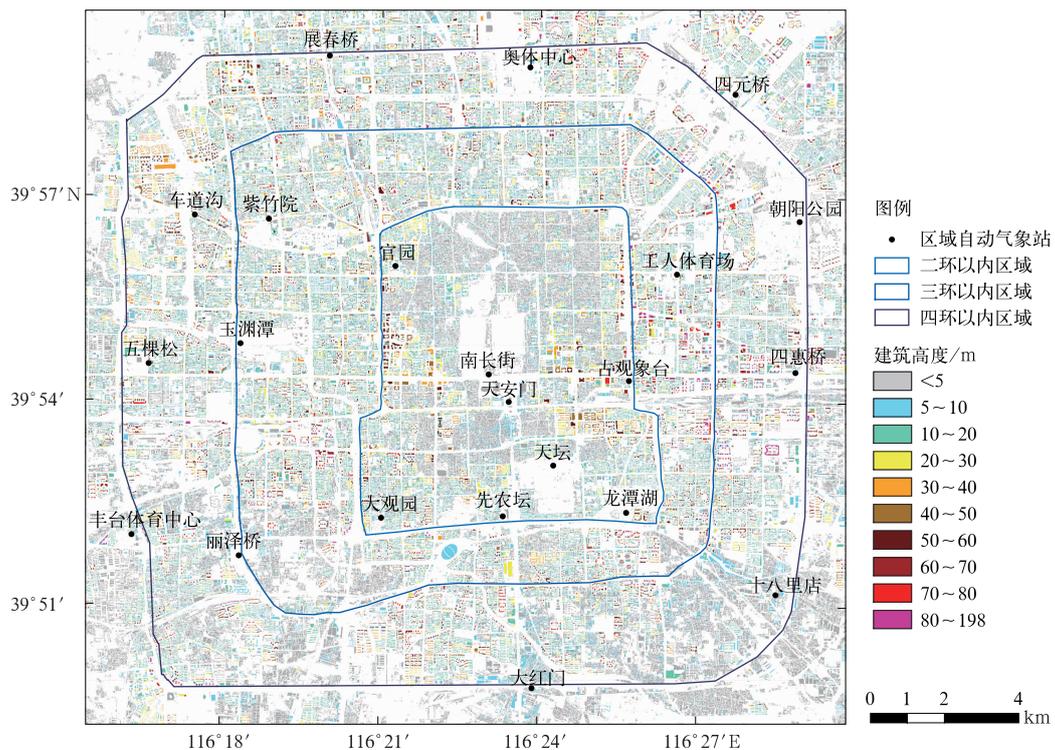


图 2 北京中心城区建筑高度分布图
(5 m 网格分辨率)

Fig. 2 Distribution of the building height in the downtown of Beijing
(horizontal resolution of $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ grid)

后,将 WRF 模拟结果和各区块建筑高度数据输入城市近地面高分辨率风场模型,利用分区函数法进行风场初步插值,再根据质量守恒约束对插值风场做进一步调整,如此对各区块依次进行风场模拟后,对各区块模拟得到的风场进行拼合、平滑处理,获得整个模拟域内 10 m 左右分辨率的近地面风场;最后,将研究区的风场模拟结果与区域自动气象站观测资料进行验证,评估该风场模型的模拟性能。

1.2 模拟区域设置

为了突出城市内部精细化风场的特征,研究区主要集中在北京四环路以内。我们将研究区内区域自动气象站观测资料进行了初步的质量控制(窦以文等,2008),并考虑站点空间分布,选取 22 个自动站用于后面的模型验证与评估(图 2 和图 3)。

采用中尺度数值模式 WRF 的模拟结果作为本文介绍的城市近地面高分辨率快速风场模型的背景驱动场。WRF 模拟的中心经纬度为 39.916°N 、 116.371°E ,范围涵盖了北京六环地区。模式采用四重嵌套,相应的水平网格距分别为 18,6,2 km 和 666 m,模拟区域的分布以及相互的嵌套关系见图 3。模式初始场和边界条件由 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)FNL 全球再分析资料提供,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$,每 6 h 更新一次边界条件。模式积分步长为 30 s,数据输出间隔设定为 1 h。参数化方案选择 WSM 6-class Graupel

scheme (Hong and Lim, 2006)、Kain-Fritsch Eta scheme(Kain,2004)、RRTM(Mlawer et al,1997)、Dudhia scheme(Dudhia,1989)、Noah land surface mode(Chen and Dudhia,2001)和 BouLac PBL(Bougeault and Lacarrere,1989)。本文将 2010 年 30 m Global Land Cover Dataset* 中北京地区土地利用类型数据进行了重投影和重分类,替换了 WRF 中的原始土地利用资料。

本文分别选取了夏季和冬季具有代表性的晴天案例作为典型个例进行模拟。2011 年 7 月 9 日,北京地区受到高压控制,天气晴朗,风速约为 $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,主风向为偏南风,与北京夏季主导风向一致,背景天气较为稳定,没有明显的天气系统干扰;2012 年 1 月 8 日,北京地区位于高压前部的均压场,天气晴朗,风速约为 $1.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,主风向为偏北风,与北京冬季主导风向一致,背景天气较为稳定,没有明显天气系统干扰。综上所述,我们选定的用于模拟的 8 个时刻为:北京时间 2011 年 7 月 9 日和 2012 年 1 月 8 日的 02、08、14 和 20 时。

2 结果分析

2.1 模型检验

将筛选得到的 22 个区域自动气象站的风场观测资料与高分辨率风场模型得到的各站点所在网格

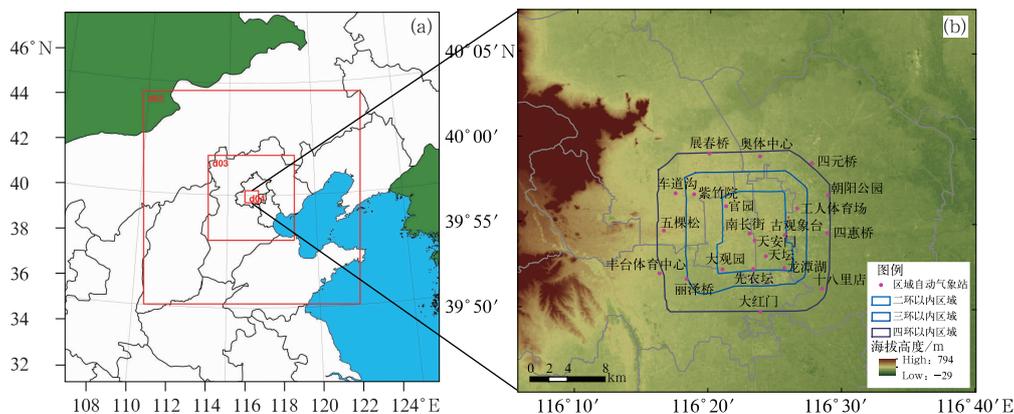


图 3 WRF 四层模拟区域范围(a)以及研究区区域自动气象站分布(b)

Fig. 3 Four nested domains of WRF model and distribution of regional automatic weather stations in the study area

* <http://www.globallandcover.com/Chinese/GLC30Download/download.aspx>

点的 10 m 高度风场模拟结果进行对比。选用了均方根误差、认同指数、平均偏差、平均误差、归一化平均偏差、归一化平均误差、准确率用于评估城市近地面高分辨率风场模型的模拟性能(何建军等,2014)。在计算准确率时所选取的风速和风向标准值分别为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 30° (张碧辉等,2012;何建军等,2014)。

表 1 是高分辨率风场模型模拟的近地面风场与自动站观测值比较的统计结果。受城市下垫面粗糙度影响,研究区整体风速较小,在 8 个时刻的观测上,22 站的风速平均值介于 $0.456 \sim 1.741 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 对应的模型模拟风速的平均值介于 $0.695 \sim 1.688 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由平均偏差可以看出,除了 7 月 9 日 14 和 20 时以外,模拟的 10 m 风速与观测值相比均偏大些。夏季四个时刻模拟的准确率在 90% 以上,相比之下冬季四个时刻模拟的准确率偏低,但也均超过了 60%。7 月 9 日 14 和 20 时观测风速的平均值较大,对应的归一化平均误差较小,7 月 9 日 02 时和 1 月 8 日 20 时观测风速的平均值较小,对应的归一化平均误差较大,这说明该模型的准确性很大程度上依赖于 WRF 背景驱动场,对小风速的模拟容易存在较大误差(Miao et al, 2009; 何建军等, 2014)。而风向的模拟在 8 个时刻的准确率均在 40% 以上,与风向的观测结果大体一致。以上典型个例的统计结果表明,高分辨率风场模型对城市近地面风场的模拟结果接近观测值,模拟效果较好。该高分辨率风场模型最终模拟结果的误差主要来源于两部分,一部分是中尺度模式提供的背景驱动场,一部分是风场模型自身在插值、调整过程中产生的误差,今后可利用该风场模型开展常年模拟,通过长序列对不

同天气背景下的误差来源进行定量化分析。

2.2 风场模拟结果及分析

以 08 和 20 时的模拟结果为例,图 4 和图 5 给出了利用高分辨率风场模型最终模拟得到的近地面 10 m 高度风场的水平分布图。为了更好地体现局地精细化风场特征,避免高分辨率风场图过于凌乱,仅在图中重点展示了风向的模拟值与观测值的对比。

由 7 月 9 日的风场模拟图(图 4)可以看出,在 08 时北京主城区大部分区域盛行偏北风,而在当日 20 时大部分区域盛行偏南风,这是山谷风环流主导该地区近地面风场的结果(窦晶晶等,2014)。冬季白天和夜间的风场模拟结果(图 5)也表现出了与夏季类似的山谷风环流特征。除个别自动站以外,四个时刻模拟的风向分布与观测基本一致,表明该高分辨率风场模型模拟的 10 m 风场能够反映出北京主城区风的日变化特征,受到大地形的影响,午前山风时刻(08 时)以偏北风为主,午后谷风时刻(20 时)以偏南风为主(窦晶晶等,2014)。

从 4 个时刻的风场模拟图(图 4 和图 5)可以看出北京主城区风速大小的空间分布特征,在一些区域往往存在明显的风速大值区,并且与之对应的均是粗糙度较小的下垫面,例如:二环以内的区域(对应天安门、故宫、中山公园、景山公园、北海公园、什刹海公园、陶然亭公园、天坛公园、龙潭公园等);北四环东路和东四环北路沿线,即望和桥—四元桥—朝阳公园桥(对应太阳宫公园、四得公园、朝阳公园、东山墅等);北四环中路沿线(对应国家奥林匹克体

表 1 10 m 风速和风向的模拟值与观测值的验证统计结果

Table 1 Validation statistics of simulated and observed values for wind speed and direction

统计参数	2011 年 7 月 9 日				2012 年 1 月 8 日			
	02 时	08 时	14 时	20 时	02 时	08 时	14 时	20 时
观测平均值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.456	0.626	1.741	1.453	0.627	0.800	0.877	0.558
模拟平均值/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.695	0.984	1.688	1.295	1.182	1.300	1.016	1.399
均方根误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.482	0.587	0.697	0.683	0.866	0.791	0.838	1.186
认同指数	0.379	0.429	0.419	0.565	0.274	0.429	0.249	0.341
风速								
平均偏差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.239	0.358	-0.053	-0.158	0.555	0.500	0.139	0.841
平均误差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.433	0.458	0.516	0.491	0.736	0.649	0.719	1.097
归一化平均偏差/%	73.2	57.1	-3.64	-10.8	69.4	62.5	16.2	139
归一化平均误差/%	132.7	73.2	35.5	33.8	92.0	81.2	83.8	181
准确率/%	95.5	90.9	95.5	95.5	72.7	77.3	72.7	63.6
风向								
均方根误差/ $^\circ$	57.2	69.4	72.6	56.9	73.8	63.3	73.1	54.1
平均误差/ $^\circ$	48.1	54.7	57.1	46.4	58.6	48.6	58.4	43.5
准确率/%	50.0	45.5	40.9	50.0	40.9	54.5	40.9	45.5

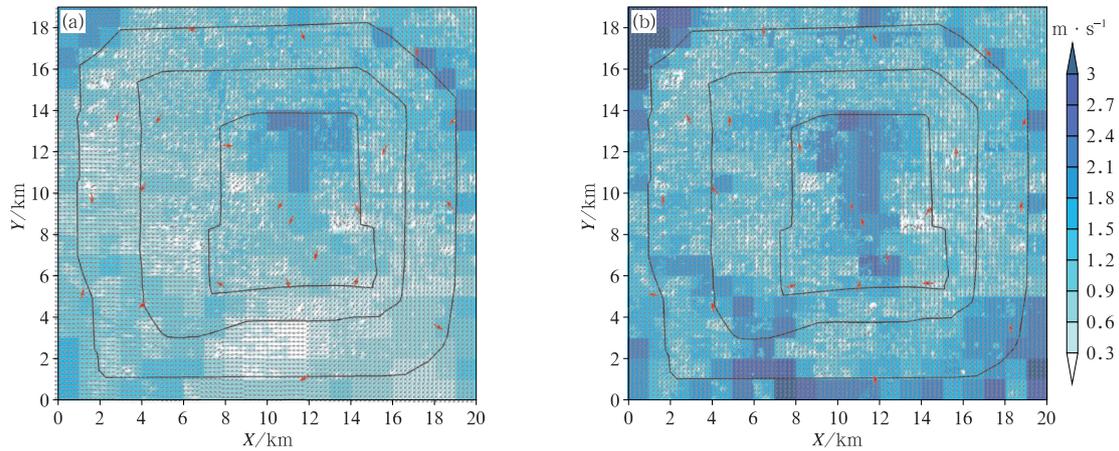


图 4 2011 年 7 月 9 日 08 时(a)与 20 时(b)北京主城区近地面 10 m 风场水平分布
(彩色阴影表示模型模拟的风速大小,黑色箭头表示模拟的近地面水平风向,
红色箭头是 22 个区域自动气象站观测到的水平风向)

Fig. 4 Horizontal distribution of the simulated wind field near the ground
at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 9 July 2011

(Color shading represents wind field simulated by USHFWF, black arrow is the simulated surface wind,
red arrow is the observed surface wind of automatic weather stations for 22 areas)

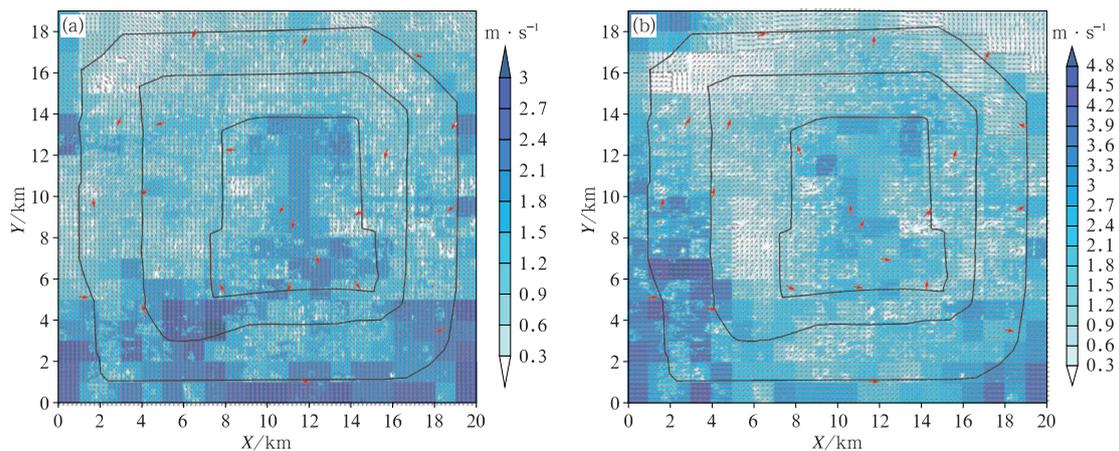


图 5 同图 4, 但为 2012 年 1 月 8 日

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for 8 January 2012

育中心、奥林匹克公园、中华民族园等);邻近四环西北角的外缘区域(对应颐和园)以及西三环中路以东区域(对应玉渊潭)。总体来看,北京主城区的南部区域、二环以内区域以及三环以外区域的风速整体偏大,这一结果与窦晶晶等(2014)基于观测资料分析和数值模拟研究得出“二环和三环之间存在一条‘n’形的风速小值带”的结论基本一致。

另外,从 4 个时刻的风场模拟图(图 4 和图 5)还可以看出,一些区域的流场凌乱无序,而且是明显的风速小值区,与这些区域对应的往往是粗糙度较

大的下垫面,例如:四环的西北角区域,即远大路附近区域(对应世纪城、世纪金源购物中心);西二环,即阜成门内大街、广宁伯街区域(对应金融街中心、北京金融街洲际酒店、威斯汀大酒店、鑫茂大厦、金融街国际会议中心等);东二环,即崇文门东大街、广渠门内大街区域(对应国瑞大厦、国瑞城、新世界百货、太华公寓、富贵园、本家润园等中高层建筑区,以及东花市北里东区、西花市南里西区等密集小区);东三环与东四环之间,即光华路、通惠河北路区域(对应 CBD 国贸,万达广场、新世界、东方梅地亚中

心、北京电视台、SOHO 现代城)。这一结果说明随着城市化发展,由于建筑对近地面空气流动的摩擦作用,城市集中建设区的近地面风速明显受到影响(徐阳阳等,2009;肯巴提·波拉提,2015),尤其是在密集建筑或高层建筑区域的整体近地面风速将相对较小,不利于气流交换(Ng et al, 2011; Yuan and Ng, 2012; 郑颖生, 2013)。

最终得到的高分辨率风场模拟结果是在输入风场模型的 WRF 背景驱动场基础上,再经过风场模型中插值、调整等过程叠加了建筑物影响后产生的。因此,上述的这些明显的风速大值区或小值区,与对应时刻输入风场模型的 WRF 背景驱动场和对应区

域的建筑高度或密度造成的下垫面特征这两方面因素都密切相关。

2.3 重点街区精细化风场特征

上述在 2.2 节中提到的在不同时刻流场凌乱的风速小值区是了解风环境现状的关键区域。利用本文介绍的高分辨率风场模型对这些关键区域所在区块的 10 m 分辨率风场模拟结果进行单独展示,从而能够进一步认识重点街区的精细化风场特征。以东二环某一区块为例,该区块内主要街道与建筑的平面分布如图 6a 所示,建筑的高度分布如图 6b 所示。该区域街区尺度的精细化风场特征见图 6c,

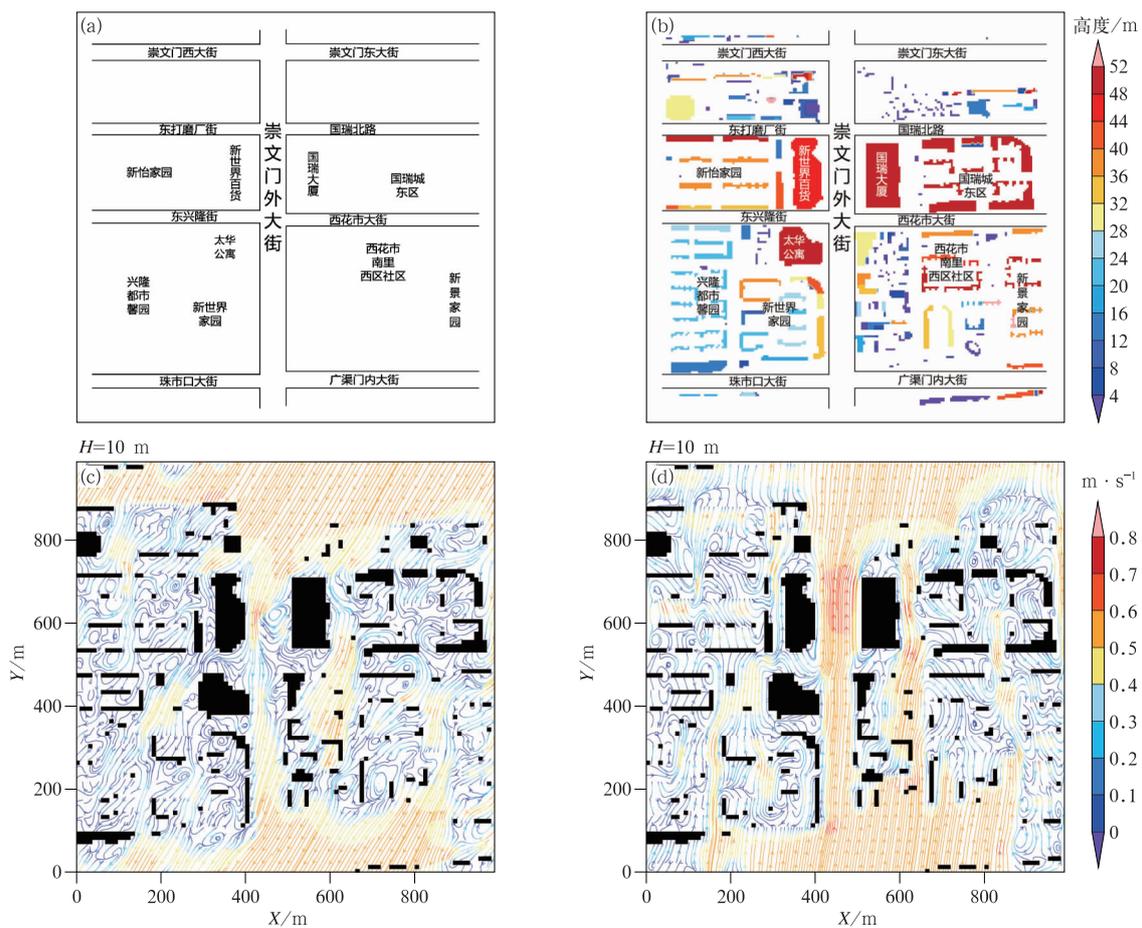


图 6 东二环的崇文门外大街精细化风场特征

(a)街区内主要街道与建筑的平面分布,(b)街区内建筑的高度分布,
 (c)2011年7月9日08时和(d)20时的10 m风场水平分布

Fig. 6 Fine scale characteristics of the key block's wind field, in Chongwenmen Street near the East Second Ring Road

(a) plane map of the main streets and buildings within the block,
 (b) distribution of the building height within the block, horizontal distribution of the simulated 10 m wind field near the ground (c) at 08:00 BT and (d) at 20:00 BT 9 July 2011

6d,可以看出,街区内部的流场发生了显著改变,主要体现在流场会因街道和建筑物的纵横分布产生分流和汇合,因而街区内的风向与入口处风向差别很大,有的甚至相反,并且在建筑物密集区域有局部环流形成。街区内部的风速小于上风向入流区域的风速,表明密集的中高层建筑物对流场具有明显的拖曳作用。如图 6c 所示,7 月 9 日 08 时的背景风为东北风,入口处风向与南北主干道有一定夹角,且大体量的较高层建筑(国瑞大厦、国瑞城中区、新世界百货、太华公寓)在中低层建筑(兴隆都市馨园、新世界家园、西花市南里社区)的上风向,高层建筑对低层建筑有遮挡气流的作用,低层建筑位于高层建筑的尾流区,气流运动微弱,通风效率较低,区块南部的多数区域接近静风状态。如图 6d 所示,7 月 9 日 20 时的背景风为南风,入口处风向与南北主干道平行,且高层建筑在中低层建筑的下风向,因此与 08 时相比,该区块南部区域的空气流通性相对较好。另外,由于南北主干道崇文门外大街两侧有大体量的较高层建筑(国瑞大厦、新世界百货、太华公寓)在道路两侧成排布置,形成了街道峡谷,因此当背景风风向与主干道平行时容易产生狭管效应,即在两侧高层建筑之间存在明显的风速大值区。以上结果表明,建筑布局对改变街区内部的风环境具有重要作用(应小宇等,2013;孟晗和李安桂,2015),该高分辨率风场模型还可对重点街区的精细化风场特征进行展示,可以清晰地反映出流场在街区内部因建筑物分布产生的分流、汇合、局部环流,以及气流通过建筑物后恢复原始风速之前的尾流区。

3 结论与讨论

本文介绍了城市近地面高分辨率快速风场模型的构建,并基于该模型对北京四环内主城区在典型时刻的 10 m 分辨率风场进行了模拟和检验,主要结论如下:

(1) 以 WRF 中尺度模式结果作为背景驱动场,精细分辨率建筑物资料作为模型数据输入,通过分区函数插值和质量守恒约束,构建了城市近地面高分辨率快速风场模型,实现了在较短时间(2~3 h)内获得可覆盖城市尺度(20 km×19 km)的高分辨率(10 m 左右)的近地面风场。

(2) 以北京四环内主城区为例,将基于该模型得到的 10 m 分辨率风场与 22 个区域自动气象站的风场观测资料进行了对比验证发现,在风速方面,模拟值往往偏大于观测值,夏季 4 个时刻模拟的准确率在 90%以上,冬季 4 个时刻模拟的准确率在 60%以上;在风向方面,8 个时刻的准确率均在 40%以上,与风向的观测结果大体一致。各统计参数表明该模型对城市近地面风场的模拟结果接近观测值,模拟效果较好。

(3) 从北京主城区近地面 10 m 风场水平分布可以看出,该风场模型模拟得到的高分辨率风场能够反映出北京主城区风的日变化特征,午前山风时段以偏北风为主,午后谷风时段以偏南风为主;明显的风速大值区往往对应着粗糙度较小的下垫面,例如二环以内的区域、北四环东路和东四环北路沿线、北四环中路沿线、邻近四环西北角的外缘区域,以及西三环中路以东区域;一些密集高层建筑区域始终是流场方向凌乱的风速小值区,例如四环西北角的远大路附近区域、西二环的阜成门附近区域、东二环的崇文门附近区域、东三环与东四环之间的光华路一通惠河北路区域。

(4) 以东二环某一区块为例,该高分辨率风场模型还可对重点街区的精细化风场特征进行展示,可以清晰地反映出流场在街区内部因建筑物分布产生的分流、汇合、局部环流,以及尾流。

综上所述,本文构建的城市风场模型为实现短时间内获得覆盖城市尺度的高分辨率近地面风场提供了有效途径,既能弥补中尺度模式在水平分辨率较粗、不能考虑建筑物影响等方面的缺陷,也避免了 CFD 模拟在覆盖范围较小、计算时间成本高等方面的不足。基于该模型可提供城市尺度的精细化风环境特征,对识别亟需改善或限制开发的关键区域有重要作用,辅助城市通风廊道的合理构建和实施(党冰等,2017),从而达到优化城市内部通风性能,缓解城市热岛,增加风环境舒适度的最终目标。然而,该模型在区块之间的拼合处理上还有待于进一步完善,并且该模型的模拟准确性也在较大程度上依赖于 WRF 背景初始场,特别是对小风速的模拟容易存在较大误差。今后,可以尝试通过同化常规观测数据,进一步改善背景初始场,从而提高该模型的准确性,并将其开发为实时更新的城市近地面风环境

动态监测平台,在气体泄漏应急扩散、灾害预警等更多领域得到应用。

参考文献

- 陈燕,蒋维楣,郭文利,等,2005.珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响[J].环境科学学报,25(5):700-710. Chen Y, Jiang W M, Guo W L, et al, 2005. Study on the effect of the city group development in Pearl River Delta on local air pollutant dispersion by numerical modeling[J]. Acta Sci Circum, 25(5):700-710(in Chinese).
- 党冰,房小怡,吕红亮,等,2017.基于气象研究的城市通风廊道构建初探——以南京江北新区为例[J].气象,43(9):1130-1137. Dang B, Fang X Y, Lü H L, et al, 2017. Preliminary study on building urban ventilation corridors based on meteorological research—taking Nanjing Jiangbei New Region as the example[J]. Meteor Mon, 43(9):1130-1137(in Chinese).
- 董文成,左洪超,邵毅,等,2014. Fluent 在城区内流场及污染扩散模拟的适用性检验[J].环境科学与技术,37(2):61-68. Dong W C, Zuo H C, Shao Y, et al, 2014. Applicability test of fluent in numerical simulation for the flow field and pollutant diffusion in urban areas[J]. Environ Sci & Technol, 37(2):61-68(in Chinese).
- 窦晶晶,王迎春,苗世光,2014.北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J].应用气象学报,25(5):559-569. Dou J J, Wang Y C, Miao S G, 2014. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area[J]. J Appl Meteor Sci, 25(5):559-569(in Chinese).
- 窦以文,屈玉贵,陶士伟,等,2008.北京自动气象站实时数据质量控制应用[J].气象,34(8):77-81. Dou Y W, Qu Y G, Tao S W, et al, 2008. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations in Beijing[J]. Meteor Mon, 34(8):77-81(in Chinese).
- 韩素芹,刘彬贤,解以扬,等,2008.利用255 m铁塔研究城市化对地面粗糙度的影响[J].气象,34(1):54-58. Han S Q, Liu B X, Xie Y Y, et al, 2008. Research of urbanization on surface roughness with 255 m meteorological tower[J]. Meteor Mon, 34(1):54-58(in Chinese).
- 何建军,余晔,刘娜,等,2014.复杂地形区陆面资料对WRF模式模拟性能的影响[J].大气科学,38(3):484-498. He J J, Yu Y, Liu N, et al, 2014. Impact of land surface information on WRF's performance in complex terrain area[J]. Chin J Atmos Sci, 38(3):484-498(in Chinese).
- 黄柏良,2011.城市通风及其影响城市热岛效应与空气质量研究[D].长沙:中南大学. Huang B L, 2011. Urban ventilation and its impact on urban heat island and air quality[D]. Changsha: Central South University(in Chinese).
- 黄燕燕,万齐林,袁金南,等,2006.城市冠层过程的研究与进展[J].热带气象学报,22(3):290-296. Huang Y Y, Wan Q L, Yuan J N, et al, 2006. Development of research on urban canopy parameterization scheme[J]. J Trop Meteor, 22(3):290-296(in Chinese).
- 肯巴提·波拉提,2015.城市下垫面零平面位移和粗糙长度的计算[D].南京:南京信息工程大学. Bolati, 2015. Calculation of urban surface zero-plane displacement and roughness length[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 李鹏,余庄,2006.基于气候调节的城市通风道探析[J].自然资源学报,21(6):991-997. Li K, Yu Z, 2006. Research on urban ventilation channel based on climate regulation[J]. J Nat Resour, 21(6):991-997(in Chinese).
- 李磊,陈柏纬,杨琳,等,2013.复杂地形与建筑物共存情况下的风场模拟研究[J].热带气象学报,29(2):315-320. Li L, Chan P W, Yang L, et al, 2013. Study on numerical simulation of wind field around buildings over complex terrain[J]. J Trop Meteor, 29(2):315-320(in Chinese).
- 刘姝宇,沈济黄,2010.基于局地环流的城市通风道规划方法——以德国斯图加特市为例[J].浙江大学学报(工学版),44(10):1985-1991. Liu S Y, Shen J H, 2010. Urban ventilation channel planning method based on local circulation: a case study of Stuttgart, Germany[J]. J Zhejiang Univ (Engineering Science), 44(10):1985-1991(in Chinese).
- 刘伟东,尤焕苓,孙丹,2016.1971—2010年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析[J].气象,42(5):598-606. Liu W D, You H L, Sun D, 2016. Multi-time scale analysis of megacities heat island effect in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1971 to 2010[J]. Meteor Mon, 42(5):598-606(in Chinese).
- 孟晗,李安桂,2015.基于风环境的布局模式及绿化形式研究综述[J].建筑科学,31(2):54-59. Meng H, Li A G, 2015. Review on the study of layout patterns and greening based on wind environment[J]. Build Sci, 31(2):54-59(in Chinese).
- 彭珍,胡非,2006.北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究[J].地球物理学报,49(6):1608-1615. Peng Z, Hu F, 2006. A study of the influence of urbanization of Beijing on the boundary wind structure[J]. Chin J Geophys, 49(6):1608-1615(in Chinese).
- 王文杰,申文明,刘晓曼,等,2016.基于遥感的北京市城市化发展与城市热岛效应变化关系研究[J].环境科学研究,19(2):44-48. Wang W J, Shen W M, Liu X M, et al, 2016. Research on the relation of the urbanization and urban heat island effect changes in Beijing based on remote sensing[J]. Res Environ Sci, 19(2):44-48(in Chinese).
- 徐祥德,2002.城市化环境大气污染模型动力学问题[J].应用气象学报,13(S1):1-12. Xu X D, 2002. Dynamic issues of urban atmospheric pollution models[J]. J Appl Meteor Sci, 13(S1):1-12(in Chinese).
- 徐阳阳,刘树华,胡非,等,2009.北京城市化发展对大气边界层特性的影响[J].大气科学,33(4):859-867. Xu Y Y, Liu S H, Hu F,

- et al, 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(4): 859-867 (in Chinese).
- 应小宇, 朱炜, 外尾一刚, 2013. 高层建筑群平面布局类型对室外风环境影响的对比研究[J]. *地理科学*, 33(9): 1097-1103. Ying X Y, Zhu W, Hokao K, 2013. Comparative study of the effect on outdoor wind environment by high-rise buildings layout types[J]. *Scientia Geogr Sin*, 33(9): 1097-1103 (in Chinese).
- 张碧辉, 刘树华, Liu H P, 等, 2012. MYJ 和 YSU 方案对 WRF 边界层气象要素模拟的影响[J]. *地球物理学报*, 55(7): 2239-2248. Zhang B H, Liu S H, Liu H P, et al, 2012. The effect of MYJ and YSU schemes on the simulation of boundary layer meteorological factors of WRF[J]. *Chin J Geophys*, 55(7): 2239-2248 (in Chinese).
- 郑拴宁, 苏晓丹, 王豪伟, 等, 2012. 城市环境中自然通风研究进展[J]. *环境科学与技术*, 35(4): 87-92, 194. Zheng S N, Su X D, Wang H W, et al, 2012. Review of natural ventilation in urban environment[J]. *Environ Sci Technol*, 35(4): 87-92, 194 (in Chinese).
- 郑颖生, 2013. 基于改善高层高密度城市区域风环境的高层建筑布局研究[D]. 杭州: 浙江大学. Zheng Y S, 2013. A study of tall building's layout for improvement of wind environment in high-rise and high-density urban areas[D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese).
- Baik J J, Park S B, Kim J J, 2009. Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(8): 1667-1681.
- Bougeault P, Lacarrere P, 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model[J]. *Mon Wea Rev*, 117(8): 1872-1890.
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. *Mon Wea Rev*, 129(4): 569-585.
- Dudhia J, 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. *J Atmos Sci*, 46(20): 3077-3107.
- Grossman-Clarke S, Liu Y B, Zehnder J A, et al, 2008. Simulations of the urban planetary boundary layer in an arid metropolitan area[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 47(3): 752-768.
- Hong S Y, Lim J O J, 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 42(2): 129-151.
- Jin L L, Li Z J, He Q, et al, 2016. Observation and simulation of near-surface wind and its variation with topography in Urumqi, West China[J]. *J Meteor Res*, 30(6): 961-982.
- Kain J S, 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 43(1): 170-181.
- Li L, Zhang L J, Zhang N, et al, 2010. Application of FLUENT on fine-scale simulation of wind field over complex terrain[J]. *Sci Cold Arid Reg*, 2(5): 411-418.
- Miao S G, Chen F, LeMone M A, et al, 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(3): 484-501.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. *J Geophys Res*, 102(D14): 16663-16682.
- Nakayama H, Takemi T, Nagai H, 2012. Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations[J]. *Atmos Sci Lett*, 13(3): 180-186.
- Neophytou M, Gowardhan A, Brown M, 2011. An inter-comparison of three urban wind models using Oklahoma City Joint Urban 2003 wind field measurements[J]. *Int J Wind Eng Industr Aerodyn*, 99(4): 357-368.
- Ng E, Yuan C, Chen L, et al, 2011. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong[J]. *Landscape Urban Plann*, 101(1): 59-74.
- Toparlar Y, Blocken B, Vos P, et al, 2015. CFD simulation and validation of urban microclimate: a case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam[J]. *Build Environ*, 83: 79-90.
- Xie Z T, 2011. Modelling street-scale flow and dispersion in realistic winds-towards coupling with mesoscale meteorological models[J]. *Bound-Lay Meteor*, 141(1): 53-75.
- Yuan C, Ng E, 2012. Building porosity for better urban ventilation in high-density cities—a computational parametric study[J]. *Build Environ*, 50: 176-189.
- Zhang N, Du Y S, Miao S G, 2016a. A microscale model for air pollutant dispersion simulation in urban areas: presentation of the model and performance over a single building[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(2): 184-192.
- Zhang N, Du Y S, Miao S G, et al, 2016b. Evaluation of a micro-scale wind model's performance over realistic building clusters using wind tunnel experiments[J]. *Adv Atmos Sci*, 33(8): 969-978.