

基于 WRF-CFD 耦合的复杂城市形态街道通风性能模拟研究

刘冲^{1a}, 彭云龙^{1b}, 王体健^{1a}, 顾聿笙^{1b}, 张婷婷², 丁沃沃^{1b}

(1. 南京大学 a. 大气科学学院 b. 建筑与城市规划学院, 南京 210093;

2. 山东省滨州市气象局, 山东 滨州 256600)

摘要: **目的** 研究静稳天气下复杂城市形态街道的通风性能。**方法** 用 WRF 中尺度气象模式耦合 CFD 流体模型, 通过选取冬季一次静稳天气过程, 对南京市不同城市形态的街区通风性能进行分析, 评价不同形态街区的通风性能, 给出现有城市通风性能的状态, 并对城市规划提供合理的意见。**结果** 静稳天气条件下, 人口密集居住的住宅区, 通风性能严重不足, 大部分街区风速只有 0.3 m/s, 不利于居民的健康生活。局部区域的通风性能主要由街道的交叉口位置和街道与主导风向的位置关系决定, 此次静稳天气综合型切片的中心区域通风性能明显优于中心区和住宅区。在迎风向的街谷或道路的通风性能明显, 在静稳天气下能够达到 2~3 m/s, 很好地起到了城市通风走廊的作用。**结论** 合理的城市设计和建筑布局能够有效地增加局部区域, 尤其是高密度地区的通风性能, 有利于污染物等的扩散以及居民的健康。

关键词: WRF; CFD; 城市; 通风性能

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.011

中图分类号: P431

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0063-09

Simulation of Ventilation Performance of Complex Urban Forms Coupled Based on WRF-CFD

LIU Chong^{1a}, PENG Yun-long^{1b}, WANG Ti-jian^{1a}, GU Yu-sheng^{1b}, ZHANG Ting-ting², DING Wo-wo^{1b}

(1. a. School of Atmospheric Sciences, b. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Binzhou Meteorological Bureau of Shandong Province, Binzhou 256600, China)

ABSTRACT: Objective To study on ventilation performance of complex urban streets in stationary weather. **Methods** In this paper, CFD fluid model was coupled with mesoscale meteorological model WRF. By choosing a stationary weather process in winter, the ventilation performance of different urban districts in Nanjing was compared and analyzed; the ventilation performance of different urban districts was evaluated; the existing state of urban ventilation performance was given; and rationalization suggestions for urban planning were put forward. **Results** Under static and stable weather conditions, the ventilation of densely populated residential areas was seriously insufficient. The wind speed of most blocks was only 0.3 m/s, which was not conducive to the healthy living of residents. The local ventilation performance was mainly determined by the location of the intersection of the street and the positional relationship between the street and the dominant wind direction. For this case, the ventilation performance of the central area of the integrated section was significantly better than that of other areas. The ventilation

收稿日期: 2019-02-03; 修订日期: 2019-05-05

基金项目: 南京大学研究生院科研基金资助(2017CL13, 201902B080); 国家自然科学基金资助项目(91544230, 41575145, 51538005)

作者简介: 刘冲(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为空气污染和气候变化。

通讯作者: 王体健(1965—), 男, 江苏人, 博士, 教授, 主要研究方向为空气质量、区域气候。

performance of the street or road in the windward direction was obvious, and it could reach 2-3 m/s in static weather, which played a good role of the urban ventilation corridor. **Conclusion** Reasonable urban design and architectural layout can effectively increase the ventilation of local areas, especially in high-density areas, which is conducive to the spread of pollutants and the health of residents.

KEY WORDS: WRF; CFD; urban; ventilation performance

1949年,新中国成立之初,只有10.64%的人口生活在城市地区。随着近现代工业化和城市化进程的加速,人们的生产生活方式发生巨大的改变,人口和产业不断向城市聚集,城市的规模也在逐渐扩大。2017年,我国城镇人口比例已经达到了58.52%^[1]。在城市的发展过程中,涌现出了交通拥挤、资源短缺、区域经济发展不平衡等一系列城市病,尤其是大气环境恶化,直接影响生活在城市中人们的健康。工业排放和机动车排放已经成为了城市大气污染的两大主要来源^[2],尤其在城市街道峡谷尺度,空气中的一氧化碳、O₃、可吸入颗粒物PM_{2.5}等直接影响人们的呼吸系统,长期暴露在空气污染中会诱发肺癌,并增加死亡风险。

城市建筑布局与城市外部风的相互作用决定了城市建成环境内部风环境的特征,而城市形态的复杂性能显著影响城市内部的风环境。城市形态的复杂化一方面体现在城市的整体规模、平均高度和城市密度的增加;另一方面体现在城市内部街道形态特征和街道两侧建筑形态的多样性^[3]。复杂的城市形态形成了极不均匀的大气下垫面,使城市内部的风环境已经不再是自然风的状态,而是出现了局地环流、小尺度的空气平流和复杂的湍流。在这种情况下,城市的近地面风速降低,导致城市呼吸性能(City Breathability)下降^[4]。

影响城市街道通风的主要原因可以归结于源、流、汇三个方面,引发空气污染的源主要是工业生产

和交通污染等,污染物的强度以及流经街道的途径和汇集方式决定了城市街道的通风性能和空气质量^[5]。城市的物质形态直接与街道的通风性能和污染物的流汇有着重要的关系,即使处在同一气候区的城市,由于城市形态的差异产生了不同的街道风环境。因此通过合理控制城市的物质形态,可以有效改善街道的通风性能,这就需要加深对城市形态影响下街道通风性能的研究。

目前大多数三维模型属于欧拉型,可根据规模进一步分为两类:区域尺度或中尺度(CMAQ、CAMx、CALPUFF等)和建筑规模模型(使用CFD, OpenFOAM、ENVI-Met、Urban-CFD等)。对此国内外很多学者开展了一系列数值模拟研究,在方法上基于中尺度气象模式,通过修改模式下垫面条件来模拟城市化过程中人造下垫面的扩张对气候^[6-9]及大气化学环境^[10-15]的影响。尽管研究区域、时间有所差异,但这些研究都表明了城市下垫面的变化,能够显著影响城市区域的微气候特征。如增大城区近地层温度、边界层高度,减小城区10 m风速、水汽比等。表1列出了近年来研究区域尺度以及城市微尺度下垫面对微气候及环境影响的部分工作。

总体上对下垫面复杂性尤为突出的城市地区,通常采用地形追随坐标描述复杂地形,因此多数像WRF这样的中尺度模式对于复杂地形的解决能力有限。一般中尺度模式将建筑高度以下的城市冠层作为

表1 近些年主要区域尺度城市下垫面对微气候和环境的影响研究

作者	使用的大气模型	分辨率	主要结论
Kim 等 ^[16]	CFD	1.25 m	建筑物屋顶冷却使得平均动能增加,气温下降,抑制了建筑物屋顶上方气流的向上和向内运动,增加了屋顶附近气流的水平速度。CFD可以提供加热,通风和空调(HVAC)系统的流入参数,用于评估建筑物能量预算和预测空调系统的性能。与建筑物加热相关的热强迫可以显著改变气流的局部特性。
Dimitrova 等 ^[17]	MM5/CFD	2 m	热条件可以极大地影响街道峡谷内部的流动模式,并定义影响因子 w 来讨论热条件对建筑物周围静压分布的影响。 w 的值随着上风和下风建筑的风速增加而减小。
Wang 等 ^[18]	CFD	15 m	建筑物和地面热通量的日变化影响街道峡谷流体流动和气温昼夜分布,实际的非均匀热力强迫可能导致复杂的局部气流模式。
Neda 等 ^[19]	PALM	15 m	提出新的边界层方案,城市地区的整体扩散受到湍流特征长度尺度的显著控制。
Temel 等 ^[20]	WRF/OpenFOAM	20 m	城市化后边界层高度增加,湍流强度增加。
Ryu 等 ^[14]	WRF/SNUUCM	1 km	近地层温度的变化夏季强于冬季,10 m风速变化冬夏区别很小。
Zhang 等 ^[9]	WRF/UCM	5 km	

一个整体建立冠层模型进行参数化描述,但事实上并不能描述建筑物对城市冠层内流场的影响。到目前为止,发展较为成熟的冠层参数化方案包括单层冠层方案^[21-22]、多层冠层方案^[23-24]和考虑室内外大气能量交换的更加复杂的多层冠层方案^[25-26]三大类。单层冠层方案对辐射、能量传递等过程的描述相对细致,但对城市建筑高度参差不齐、密度非均匀等的特征未能描述,对不同层次上城市湍流的影响未予区分。多层冠层方案对建筑高度以下冠层的过程可以更详细的描述,如区分不同层次内的空气动力学阻力系数,但并没有考虑到建筑物内部热量的产生以及与室外大气的交换。三类冠层方案由于空间分辨率的限制,都不能明显地分辨出街道和建筑物,所以需要更精确的模型给出建筑物的高度、密度等形态特征。为此本研究通过 WRF 耦合 CFD 模拟的方法来更精确地描述城市的微气候特征,并针对以往 CFD 的研究大多集中在城市尺度,文中主要针对不同形态街道小尺度的通风性能进行对比研究。特别是在静稳天气下,城市的通风性能显得尤为重要,文中将通过分析南京城区主要城市形态街道通风性能,为城市规划与建设提供更科学合理的依据。

1 模式实验设计

1.1 WRF

WRF (Weather Research Forecas) 模式^[27]是美国国家大气研究中心 (NCAR) 中小尺度气象处 (MMM)、国家环境预报中心 (NCEP) 的环境模拟中心 (EMC)、预报系统试验室的预报研究处 (FRD) 和俄克拉荷马大学的风暴分析预报中心 (CAPS) 联合开发的新一代高分辨率中尺度天气模式,主要针对分辨率为 1~10 km、时效为 60 h 以内的有限区域天气预报和模拟问题。

文中选用 WRF 的最新版本 4.0.1,采用五层嵌套,水平分辨率分别为 64、16、4、1、0.25 km,垂直分 37 层,模式的中心位于南京 (32°00'N, 118°48'E, 如图 1 所示)。WRF 驱动的气象数据是美国 NCEP 的再分析资料,时空分辨率为 3 h、0.25°×0.25°,适用于高分辨率的城市气候模拟。积分步长为 60 s,模

式中物理过程参数化方案选择见表 2。根据一次典型高压控制的天气过程,模拟南京 2018 年的 1 月 17 日 00:00 至 23 日 00:00 静稳天气下气场要素 (尤其是风速) 的变化。

表 2 模拟中选定的物理过程参数化方案

物理过程	参数化方案	参考文献
微物理过程	Single-Moment 5-class	Hong et al. (2004) ^[28]
积云对流参数化	Grell 3d ensemble cumulus	Grell(1993) ^[29] , Grell and Dévényi(2002) ^[30]
长波辐射	RRTM	Mlawer et al.(1997) ^[31]
短波辐射	Goddard shortwave	Chou and Suarez(1994) ^[32]
行星边界层	Yonsei University	Hong et al.(2006) ^[33]
路面过程	Noah Land Surface Model	Chen et al. (1996) ^[34] and Ek et al.(2003) ^[35]

1.2 CFD

1.2.1 计算模型和区域

对于复杂城市形态特征的微尺度通风性能数值模拟,其形态特征的复杂度要远远高于理想城市形态,虽然有大量学者从复杂的城市特征中抽象并归纳了几类主要的城市形态类型^[24,36-37],但并不能完全代表真实的城市肌理。南京作为向高密度发展的城市之一,既具备高密度的高层商业综合体空间,又具备典型城市中住宅集中的情况。因此选取了具有典型代表性的三个切片:第一个切片位于新街口地区,该区域中主要覆盖了大型的办公、商业建筑,整个区域的建筑体量大,并以较大的单体建筑为主;第二个切片位于南京东部的老城区,该片区以多层、小高层板式住宅为主,具有相对均匀的肌理特征,在一定程度上能够代表住宅区的形态特征类型;第三个切片位于南京老城区的西北区域,该区域既包含了匀质的住宅肌理特征,又有部分办公、商业综合建筑,最主要的特殊性在于其道路多位斜向,是包含多种类型的典型城市形态切片。

1.2.2 边界条件和求解设定

对于湍流模型的选择,标准的雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 和大涡模拟 (LES) 最常在城市通风模拟中进行比较和讨论。在很多研究中,已经充分地确定了 LES 的精度,特别是在预测低风速区域的流动和湍流特征^[38-39]。与 LES 相比,许多文献研究报道了稳定 RANS 方法的局限性^[40-41]。由于 LES 模型的计算成本比 RANS 模型高几倍,RANS 方法仍然是城市通风评估的最常用方法,并且已经显示出通用城市配置的良好结果。与 LES 方法相比,虽然模拟精度存在部分误差,尤其是在复杂的城市区域内高层建筑的尾流区域和狭窄的跨度街道中发生的复杂湍流

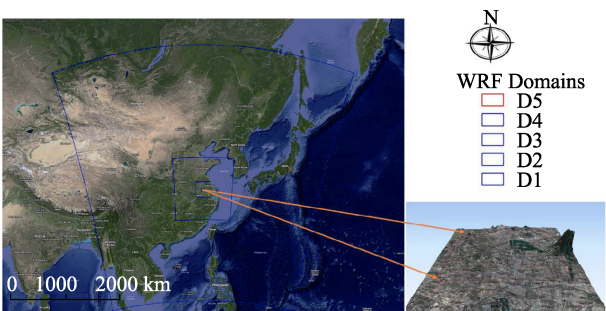


图 1 WRF-Chem 中模拟区域 (五层嵌套)

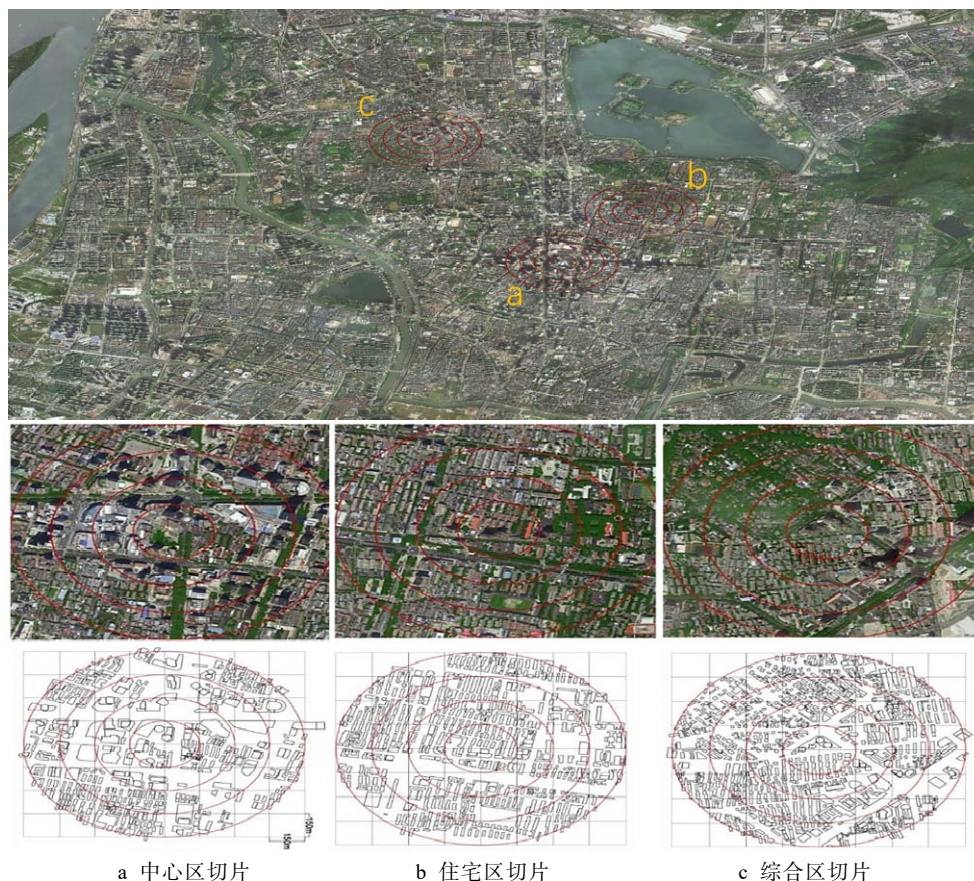


图2 数值模拟的切片肌理形态

无法用 RANS 很好地捕获, 但 LES 方法需要占用大量的计算资源和时间, 所以文中仍采用 RANS 方法中的标准 $k-\varepsilon$ 模型进行数值模拟^[42]。

对于流入边界条件, 大气边界层中 $U(z)$ 、 $k(z)$ 、 $\varepsilon(z)$ 的入口剖面使用 Richards 和 Hoxey^[43] 的方案。速度曲线 (U) 为:

$$U(z) = \frac{u_{ABL}^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad (1)$$

式中: u_{ABL}^* 为大气边界层摩擦速度; z_0 为空气动力学粗糙度长度; z 为高度坐标, m; κ 为卡曼常数, $\kappa=0.4$ 。

以南京为例, 设置 $z_0=0.4$, 这代表了城市内部和周围的林地^[44], 湍流动能分布 (k) 和湍流耗散率分布 (ε) 分别为:

$$k(z) = \frac{u_{ABL}^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_{ABL}^{*3}}{\kappa(z+z_0)} \quad (3)$$

式中: C_μ 是常数, $C_\mu=0.09$ 。

零静压条件定义为流出边界条件, 在计算域的顶部和横向边界处, 应用对称边界条件, 在地面和所有建筑表面上设置为无滑移边界条件。ANSYS Fluent 15.06 用于解决不可压缩和等温流动的 3D 稳定 RANS 方程。由于城市形态的复杂性, 模拟采用

非结构化网格, 在所有方向上, 粗糙、精细与基础网格以大约 1.5 倍的增减系数来产生三种分辨率。粗糙、基本和精细的总网格数分别约为 6400 万、1.01 亿和 1.48 亿。最小的网格单元尺寸单元 δ_x 、 δ_y 、 δ_z 分别为: 1.5、1.5、0.9 m (粗网格), 1.0、1.0、0.5 m (基本网格), 0.5、0.5、0.33 m (细网格)。由于研究的是人行高度的风环境特征, 在 0~1.5 m 高度进行 3 层网格加密, 建筑的表面保证至少覆盖 5 个网格, 通过分析街道中选取点在三种网格分辨率下的测试结果, 发现基本和精细两种网格的计算偏差小于 5%, 因此采用基本网格分辨率方案。压力插值是二阶精度。对于控制方程的对流和黏性项, 使用二阶离散化方案。CFD 详细建模设置见表 3, 计算区域和局部网格如图 3 所示。

表3 CFD 数值模拟边界条件设定

参数	设置
模拟区域	10 800 m(x)×19 850 m(y)×600 m(z)
网格分辨率	约 1 亿个非结构化网格单元
湍流模型	标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型
压力速度算法	SIMPLE
平流项方案	二阶离散化的对流项和黏性项
边界条件	流入: Richards 和 Hoxey (1993) ^[43] 流出: 零梯度地面和墙体 表面: 无滑移顶部和侧面: 对称边界

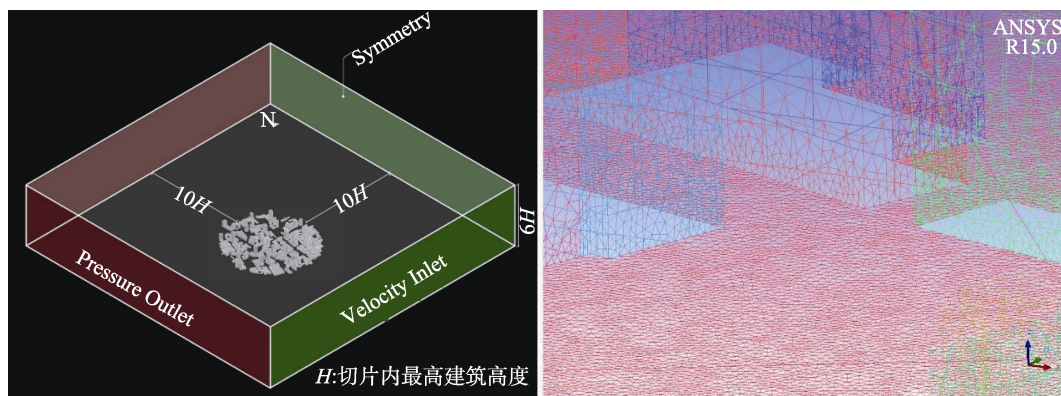


图 3 数值模拟的计算区域与局部网格

1.3 天气形势分析

2018 年 1 月 17—20 日期间, 南京地区冷空气活动较弱, 比多年平均位势高度高出了 20 hPa (气候资料来自于 NCEP 提供的 1981—2010 年逐日大气环流资料, 如图 4 所示), 高压抑制了对流的发展。17 日 08 时 500 hPa 上, 极涡位于北纬 60° 以北, 我国大部地区处于稳定的西风环流中, 700 hPa 处于弱暖高压前部的偏西北气流中, 南京 500 hPa 始终处于稳定的纬向西风环流中。17 日 20 时, 高层 500 hPa 环流无明显变化, 中低层 700 hPa 以下, 江苏南部地区受暖平流影响, 中低层增温明显, 有利于逆温层的形成。持续至 20 日夜間, 高空环流形势变化不明显, 中低层风场不时有切变影响, 但强度较弱, 扩散条件不佳。18 日夜間, 中低层有切变影响南京地区, 但冷暖平流不明显。21 日夜間 08 时, 极涡北部冷涡旋转向东南移动至黑龙江省以东地区, 在黄土高原至川渝一带形成高空槽。高空槽在东移过程中不断加深, 中低层风切变明显, 系统趋于深厚。21 日夜間, 高空槽在携冷空气过境过程中, 甩下冷空气, 逐渐影响南京、江苏南部地区。

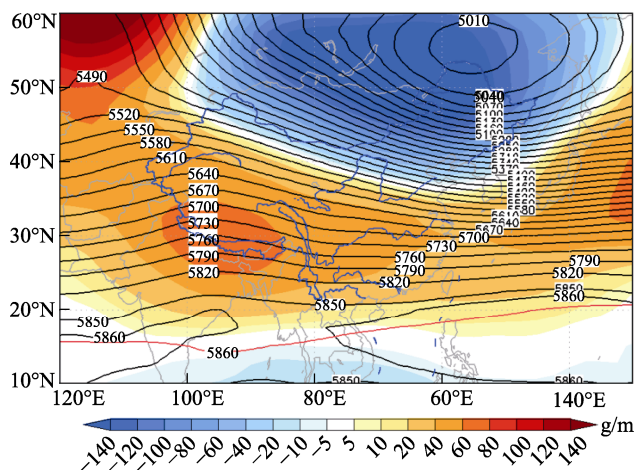


图 4 2018 年 1 月 17—23 日 500 hPa 位势高度距平场

从海平面气压场来看, 16 日夜間至 17 日白天, 江苏中南部大范围都处于地面高压控制中心, 气压梯度较小, 不利于水平扩散。17 日夜間, 地面高压中心不断东移, 后部弱冷空气不断向江苏南部地区渗透, 但强度较弱。18 日白天, 在鲁苏一带再次形成高压中心, 南京处于高压中心南部的偏东气流中。18 日夜間, 在内蒙古东北部形成的低压中心随高空系统向南移动, 对应地面低压区也不断向南扩展, 冷锋从低压中心移动至鲁冀豫交界一带。如图 5 所示, 19 日 20 时 (北京时), 在华东、华南一带形成巨型弱高压中心, 与西北高压构成西北-东南向的不对称鞍型场, 江苏南部地区处于高压中心下沉气流控制中。随后, 华东、华南高压中心强度逐渐减弱, 江浙一带等压线稀疏, 表现为明显的静稳形势。

2 结果及分析

2.1 WRF 模拟验证

WRF 主要为 CFD 模型提供垂直气象廓线参数, 通过观测和模拟的斜温图 (见图 6) 对比, 证明 WRF 的模拟结果能够很好地再现此次静稳天气 (数据来源 <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)。南京站探空资料显示, 16 日 20 时, 探空站上部湿层深厚, 从近地面至高层 500 hPa 左右处, 温度露点差小于 4 °C, 接近饱和, 为大气气溶胶凝结核的吸湿增长提供了足够的水汽条件。17 日 08 时, 随着干空气的卷入, 850 hPa 左右湿度迅速减小, 且在地面上空 1~2 km 高度处出现了逆温层, 逆温程度达到 6 °C, 上干下湿的“暖干盖”结构抑制了垂直湍流扩散。17 时 20 时, 逆温层顶高度下降, 逆温强度明显加强。18 日 08 时, 近地面不足百米高度内出现了“贴地”逆温, 使得大气近地层变得更加稳定。同时其上空至 700 hPa 高度范围内的不同高度处也出现了不同程度的逆温, 多层逆温现象一直持续到 19 日 20 时 (图 6 以 19 日 08 时为例), 多层逆温的存在有效地阻隔了中低层向高处扩散。

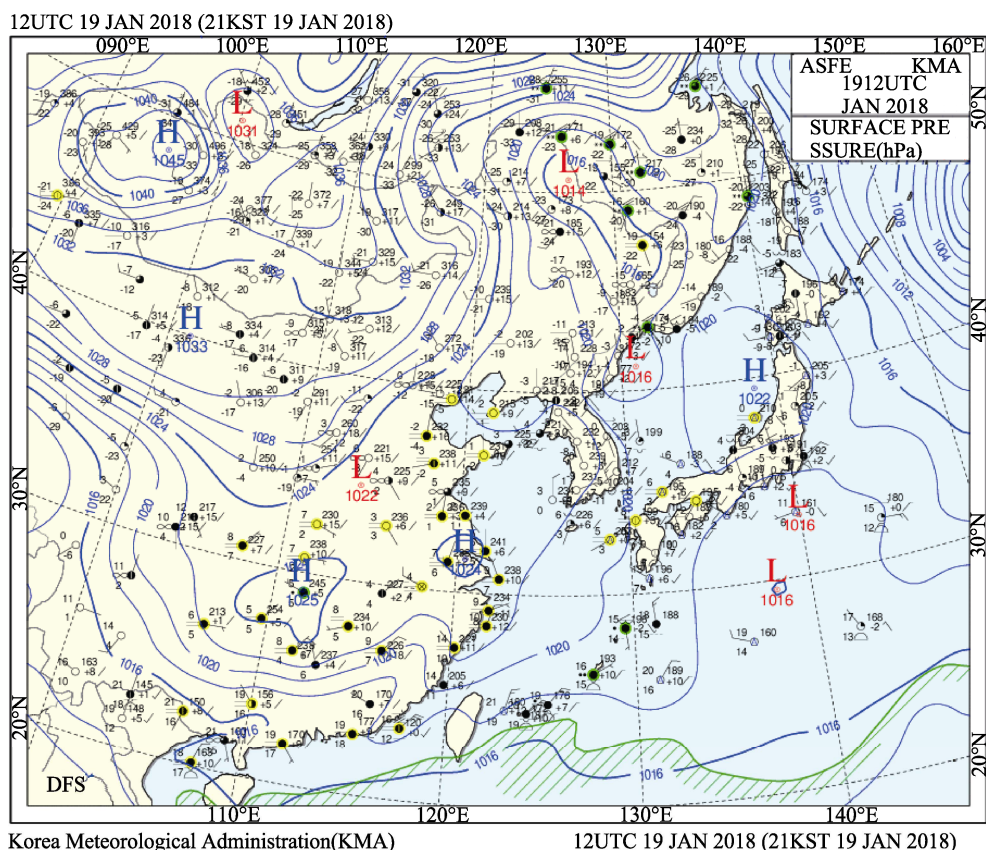


图5 2018年1月19日20时地面天气图(韩国气象厅KMA)

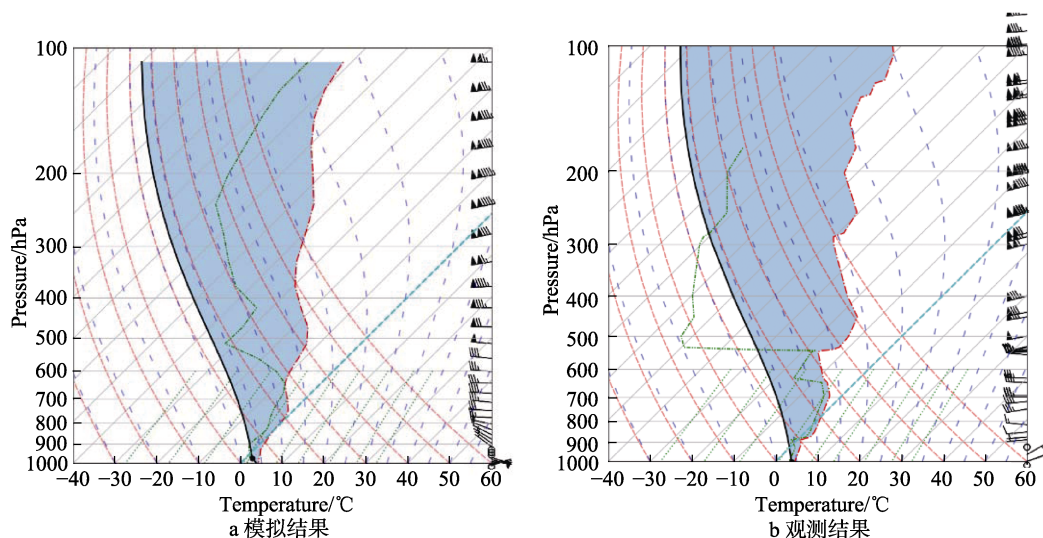


图6 WRF模拟结果与观测结果 Skew-T 斜温图对比(2018年1月19日08时)

由图6可知,整体上模式和观测的结果基本吻合,上层主要为西风,但边界层以内(1000 m以下)的风速较小,在2 m/s左右。边界层顶有明显的风切变和逆温层的存在,将进一步减弱城市下垫面的通风性能^[45]。

2.2 CFD 结果分析

不同形态的城市切片,在同样静稳的大气环流背

景下,表现的通风性能有明显的差别。图7给出了三种不同肌理的复杂城市街道内部的气流情况,从图7a中可以看出,由于大量高层建筑的影响,会在建筑背风面形成风速较小的区域, Juan 等人^[38-39]通过模拟也得到了相类似的结果。其余的主要街道都有较好的通风性能,在静稳天气下,风速能接近背景2~3 m/s的风速。从图7b中可以看出,覆盖率较高的居民区

域导致了通风性能的明显降低,虽然街道交叉口与来流风方向相同的街道内部通风性能较好,但由于大量高密度建筑的聚集,导致切片整体人行高度的通风性能较差^[40-41],风速大部分都在 0.3 m/s 以下。与图 7a、b 相比,图 7c 中存在着大量的通风廊道,虽然切片内建筑的密度与图 7b 相近,甚至局部区域的建筑密度高于图 7b,但从数值模拟的结果可以看出,气流经过主要和次要的街道,基本保证了整个区域内部良好的气流峡谷效应,从而表明适当的建立通风廊道,有助于街区的通风性能增加^[36],特别在静稳天气下有助于空气的流通,进而可以减少污染物以及微生物病

菌等的堆积^[24, 37]。

南京作为古都和现代化城市相结合的代表,其城市的形态复杂多变,不同形态切片的中心区域差异明显,表现出不同的气流分布特征。三个切片中心区域的气流分布具体情况如图 8 所示,可以看出,三个切片的局部形态特征类似,既有体量较大的商业建筑,也混合了高层的板式住宅。从三个切片的模拟结果可以看出,综合型切片中心区域的通风性能显然优于中心区、住宅两种切片。其中两条与来流风相同的街谷具有重要的通风作用,在复杂的城市中形成了明显的峡谷效应,这样能够最大化地加强城市的呼吸作用。

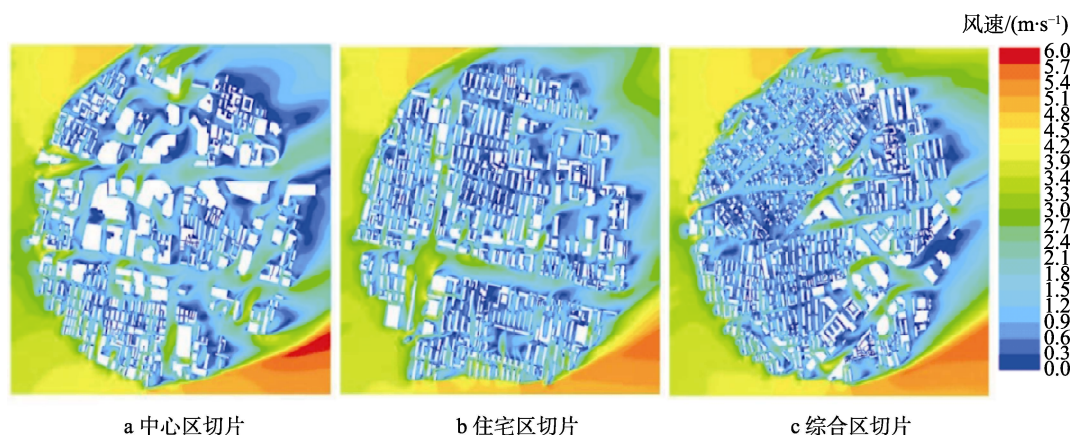


图 7 三个切片 1.5 m 高度的流场云图

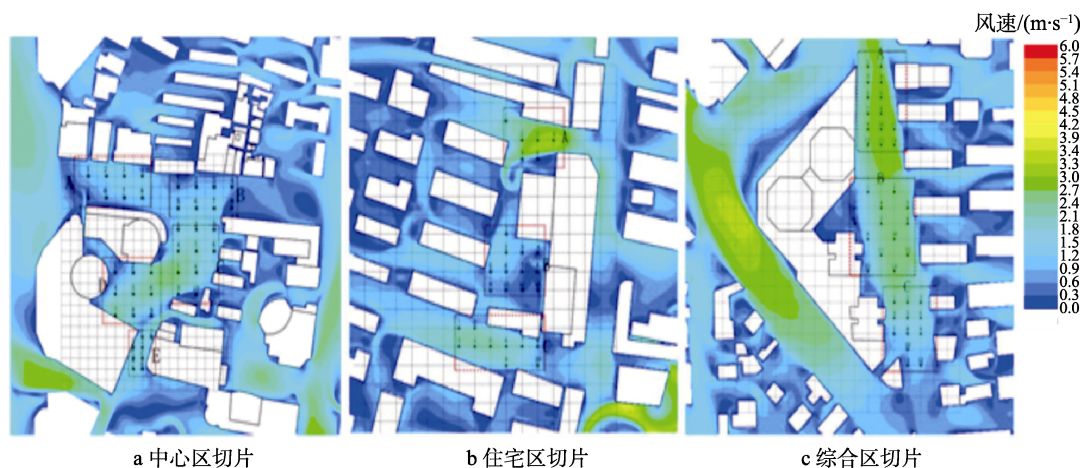


图 8 三个切片内部局部的通风气流分布情况

3 结论

1) 采用 WRF 与 CFD 耦合的数值模拟方法能够最大程度地接近真实复杂城市下垫面影响下的入口边界条件,CFD 模型能够给出不同形态街区风速在静稳天气背景下的分布,可以精细地看出迎风 and 背风面街区通风性能存在很大的差异。

2) 在复杂的城市界面特征中,局部区域的通风性能主要受到街道的交叉口位置和街道与主导风向

的位置关系影响。如果该区域中的街道大多数与来流风的方向一致,那么该区域中有更多的通风廊道;如果街道的方向与来流风的方向近似垂直,那么该区域的通风性能会受到明显的影响。

3) 人们一般生活在住宅区,恰恰由于人口和住宅的密集分布,导致了街区的通风性能明显降低。复杂的高密度城市并非一定会导致街区通风性能下降,合理的城市设计和建筑布局能够有效地增加局部区域,尤其是高密度地区的通风性能,有利于污染物的

稀释和扩散。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴-2018[M]. 北京: 国家统计局, 2018.
- [2] CHENG W C, LIU C H, LEUNG D Y C. Computational Formulation for the Evaluation of Street Canyon Ventilation and Pollutant Removal Performance[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(40): 9041-9051.
- [3] HANG J, SANDBERG M, LI Y. Effect of Urban Morphology on Wind Condition in Idealized City Models[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(4): 869-878.
- [4] BUCCOLIERI R, SANDBERG M, DI SABATINO S. City Breathability and Its Link to Pollutant Concentration Distribution within Urban-like Geometries[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(15): 1894-1903.
- [5] OKE T R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate[J]. *Energy and Buildings*, 1988, 11(1): 103-113.
- [6] LI X, LI B, CHEN H. Study on the Relationship between Urban Land Sprawl Extension and Urban Thermal Environment—Taking Wuhan City as an Example[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 10: 1-14.
- [7] XU D, ZHOU D, WANG Y, et al. Field Measurement Study on the Impacts of Urban Spatial Indicators on Urban Climate in a Chinese Basin and Static-wind City[J]. *Building and Environment*, 2019, 147: 482-494.
- [8] ZHANG D L, LIN Y, ZHAO P, et al. The Beijing Extreme Rainfall of 21 July 2012: “Right Results” But for Wrong Reasons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(7): 1426-1431.
- [9] ZHANG N, GAO Z, WANG X, et al. Modeling the Impact of Urbanization on the Local and Regional Climate in Yangtze River Delta, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 102(3-4): 331-342.
- [10] ZHAO Q, ZOU C, GAO Q, et al. Temporal and Spatial Exposure of Gaseous Pollutants and Its Influence Factors in Shandong Province [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 186: 12-18.
- [11] PENG Y, WANG H, LI Y, et al. Evaluating the Performance of Two Surface Layer Schemes for the Momentum and Heat Exchange Processes during Severe Haze Pollution in Jing-Jin-Ji in Eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(23): 17421-17435.
- [12] WANG Y, YUAN Q, LI T, et al. Evaluation and Comparison of MODIS Collection 6.1 Aerosol Optical Depth Against AERONET over Regions in China with Multifarious Underlying Surfaces[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 200: 280-301.
- [13] CIVEROLO K, HOGREFE C, LYNN B, et al. Estimating the Effects of Increased Urbanization on Surface Meteorology and Ozone Concentrations in the New York City Metropolitan Region[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(9): 1803-1818.
- [14] RYU Y H, BAIK J J, KWAK K H, et al. Impacts of Urban Land-surface Forcing on Ozone Air Quality in the Seoul Metropolitan Area[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(4): 2177-2194.
- [15] YU M, CARMICHAEL G R, ZHU T, et al. Sensitivity of Predicted Pollutant Levels to Urbanization in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 60: 544-554.
- [16] KIM J J, PARDYJAK E, KIM D Y, et al. Effects of Building-roof Cooling on Flow and Air Temperature in Urban Street Canyons[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 50(3): 365-375.
- [17] DIMITROVA R, SINI J F, RICHARDS K, et al. Influence of Thermal Effects on the Wind Field within the Urban Environment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 131(2): 223-243.
- [18] WANG Y, ZHONG K, ZHANG N, et al. Numerical Analysis of Solar Radiation Effects on Flow Patterns in Street Canyons[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2014, 8(2): 252-262.
- [19] YAGHOUBIAN N, KLEISSL J, PAW U K T J B L M. An Improved Three-Dimensional Simulation of the Diurnally Varying Street-Canyon Flow[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2014, 153(2): 251-276.
- [20] TEMEL O, BRICTEUX L, VAN BEECK J. Coupled WRF-OpenFOAM Study of Wind Flow over Complex Terrain [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 174: 152-169.
- [21] LIAN J, WU L, BRÉON F-M, et al. Evaluation of the WRF-UCM Mesoscale Model and ECMWF Global Operational Forecasts over the Paris Region in the Prospect of Tracer Atmospheric Transport Modeling[J]. *Elem Sci Anth*, 2018, 6(1): 64.
- [22] LI H, ZHOU Y, WANG X, et al. Quantifying Urban Heat Island Intensity and Its Physical Mechanism Using WRF/UCM [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 3110-3119.
- [23] KONDO H, GENCHI Y, KIKEGAWA Y, et al. Development of a Multi-Layer Urban Canopy Model for the Analysis of Energy Consumption in a Big City: Structure of the Urban Canopy Model and Its Basic Performance[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 116(3): 395-421.
- [24] YUAN C, SHAN R, ZHANG Y, et al. Multilayer Urban Canopy Modelling and Mapping for Traffic Pollutant Dispersion at High Density Urban Areas[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 647: 255-267.
- [25] SALAMANCA F, KRPO A, MARTILLI A, et al. A New Building Energy Model Coupled with an Urban Canopy Parameterization for Urban Climate Simulations—Part I. Formulation, Verification, and Sensitivity Analysis of the Model[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 99(3): 331.
- [26] SALAMANCA F, MARTILLI A. A New Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for Urban Climate Simulations—Part II. Validation with

- one Dimension Off-line Simulations[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 99(3): 345.
- [27] GRELL G A, PECKHAM S E, SCHMITZ R, et al. Fully Coupled "Online" Chemistry within the WRF Model[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(37): 6957-6975.
- [28] HONG S Y, DUDHIA J, CHEN S H. A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation[J]. Monthly Weather Review, 2004, 132(1): 103-20.
- [29] GRELL G A. Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations[J]. Monthly Weather Review, 1993, 121(3): 764-787.
- [30] GRELL G A, DÉVÉNYI D. A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(14): 38-41.
- [31] MLAWER E J, TAUBMAN S J, BROWN P D, et al. Radiative Transfer for Inhomogeneous Atmospheres: RRTM, a Validated Correlated- k Model for the Longwave[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [32] CHOU M D, SUAREZ M J. An Efficient Thermal Infrared Radiation Parameterization for Use in General Circulation Models[J]. Internet Resource, 1994, 3(3): 85.
- [33] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [34] CHEN F, DUDHIA J. Coupling an Advanced Land Surface-hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569-585.
- [35] EK M B. Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D22): 8851.
- [36] MOUZOURIDES P, KYPRIANOU A, MARINA N K A, et al. Linking the Urban-scale Building Energy Demands with City Breathability and Urban form Characteristics[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 49: 101460.
- [37] HANG J, CHEN L, LIN Y, et al. The Impact of Semi-open Settings on Ventilation in Idealized Building Array[J]. Urban Climate, 2018, 25: 196-217.
- [38] JUAN Y H, YANG A S, WEN C Y, et al. Optimization Procedures for Enhancement of City Breathability Using Arcade Design in a Realistic High-rise Urban Area[J]. Building & Environment, 2017, 121: 247-261.
- [39] CHAO Y, NG E. Building Porosity for Better Urban Ventilation in High-density Cities—A Computational Parametric Study[J]. Building & Environment, 2018, 50(4): 176-189.
- [40] HE B J, DING L, PRASAD D. Enhancing Urban Ventilation Performance through the Development of Precinct Ventilation Zones: A Case Study Based on the Greater Sydney, Australia[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 47: 101472.
- [41] MEI S J, HU J T, LIU D, et al. Wind Driven Natural Ventilation in the Idealized Building Block Arrays with Multiple Urban Morphologies and Unique Package Building Density[J]. Energy and Buildings, 2017, 155: 324-338.
- [42] BLOCKEN B. LES over RANS in Building Simulation for Outdoor and Indoor Applications: A Foregone Conclusion[J]. Building Simulation, 2018, 11(5): 821-870.
- [43] RICHARDS P J, HOXEY R P. Appropriate Boundary Conditions for Computational Wind Engineering Models Using the $k-\epsilon$ Turbulence Model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 46-47: 145-153.
- [44] YAO Y. Nanjing: Historical Landscape and Its Planning from Geographical Perspective[M]. Berlin: Springer, 2016.
- [45] XU T, SONG Y, LIU M, et al. Temperature Inversions in Severe Polluted Days Derived from Radiosonde Data in North China from 2011 to 2016[J]. Science of The Total Environment, 2019, 647: 1011-1020.