

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.003



基于WRF的城市热岛效应高分辨率评估方法

郭飞

(大连理工大学 建筑与艺术学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:为解决城市总规尺度气候评估工具缺乏的问题,分析了不同气候评估方法的特点和应用范围,研究了气象学工具 WRF 在城市热岛效应评估中的应用方法及有效性。建立了针对城市总规尺度的高精度城市规划信息数据库、气象数据库生成 WRF 模拟边界的方法;明确了高精度城市热岛效应模拟所需的 WRF 物理方案。以沿海城市大连夏季典型晴朗高温天气为例,利用 WRF 模型进行了 300 m 的高分辨率模拟。结果表明,WRF 可以较好地模拟出城市热岛效应的强度和时空变化;将模拟结果与气象站和现场观测值进行了对比,两者变化趋势一致,偏差在可接受的范围之内。

关键词:城市环境;高分辨率模拟;气候模型;热岛效应

中图分类号:TU119.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0013-07

Assessment method of urban heat island high resolution based on WRF

Guo Fei

(Architecture and Fine Art School, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liao Ning, P. R. China)

Abstract: Different climate assessment tools' features and application scope were analyzed to solve the problem of lack of climate assessment tools in the urban master planning scale. The WRF model's application method and validity was studied in urban heat island (UHI) evaluation. According to the demand of urban master planning scale, the method to generate WRF simulation boundary conditions with high resolution urban geographic and land cover data was established. The physics schemes for WRF high resolution simulation were also clarified. A typical summer hot weather day was taken as the research background in the coastal city of Dalian, the WRF model was used to simulate the UHI effect with the resolution of 300 meters. The results showed that WRF model could reproduce the intensity, temporal and spatial variation of UHI effect. The simulation results were compared with the data of weather station and the in situ observation, their change trend was found to be consistent and the deviation was within the acceptable range.

Keywords: urban environment, high resolution simulation, climate models, urban heat island

根据《国家新型城镇化规划(2014—2020)》,中国城市人口比例在 2020 年将达到 60%^[1]。城市人口和规模的扩张会带来不透水面积增加、人为热大

量排放等问题,出现城市中心区的温度高于郊区的城市热岛现象^[2]。在全球气候变暖的背景下,城市热岛效应会增加环境的热压力,导致高温天气的死

收稿日期:2016-04-21

基金项目:国家自然科学基金(51308087,51278078)

作者简介:郭飞(1980-),男,副教授,博士,主要从事建筑技术科学、城市气候研究,(E-mail)guofei@dlut.edu.cn。

Received:2016-04-21

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51308087, 51278078)

Author brief: Guo Fei (1980-), associate professor, PhD, main research interests: building technology and science, urban climate, (E-mail) guofei@dlut.edu.cn.

亡率增加^[3-4],也会引发夏季空调大量使用和电力需求上升,导致更多的污染物产生和各种其他健康威胁^[5-6]。缓解城市热岛效应需要综合采取优化城市规划布局、促进通风、建设绿地和屋顶绿化、优化建筑形态、加强建筑节能等各类措施。但是由于城市热岛效应成因非常复杂,与风、热、湿、辐射等多种物理因素有关;既受大气候影响,也受局地地形、下垫面类型、城市和建筑形态的影响。目前,在城市宏观层面的科学评估工具十分缺乏,难以分析规划措施与城市热岛效应之间的定量关系。有鉴于此,许多研究者采用各种研究工具与城市规划相对接,研究了城市热岛的评估方法。代表性的有现场实测、卫星遥感影像反演、计算流体力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)模型和气象学模型等。

例如,王志浩等^[7]通过实测发现了重庆城市热岛存在的带状特征;齐静静等^[8]研究了河流对城市热岛的缓解作用;陈云^[9]利用 Landsat ETM 卫星数据反演出不同城市热岛效应的时空分布特征和发展过程,并提出优化空间结构、建设绿化系统、减少人为排放等规划建议。现场实测对人力物力要求较高,能够获取数据的时间范围和空间精度受到诸多限制;卫星遥感数据则限制较少。但这两种方法都难以对未来城市热岛的变化趋势加以预测,也无法在方案阶段对不同城市规划布局和建筑形态加以评估。

CFD 模型的特点是分辨率较高(1~10 m),可以非常精细地研究城市建筑三维形态特征对气候的影响^[10],许多研究者利用 Fluent、CFD-Urban、StarCD、Phoenix 和 Envimet 等工具进行了研究^[11]。但是 CFD 软件需要针对城市微气候复杂的气候机理开发专门的辐射、蒸发、人工排热等模型,限制了其在总规尺度的使用。

中尺度气候模型原本是针对 10~1 000 km 尺度天气预报和气象研究需求产生的工具,主要的有 WRF、UKMO、ARPS 等^[12]。其中 WRF 气候模型(Weather Research and Forecast Model)是美国国家大气研究中心等机构开发的最新一代天气预报和气象模型,在全世界得到了广泛应用^[13-16]。城市总规尺度的气候现象异常复杂,WRF 模型具有完善的物理方案加以描述。WRF 还有优秀的跨尺度研究能力,其自身内嵌描述城市对气候影响的单层城市冠层模型(UCM)、多层城市冠层模型和建筑能耗模型(BEP+BEM)等,可以设置二十余项参数描述城

市和建筑形态特征。近年来利用 WRF 进行城市局地气候特征分析,并据此提出城市建设、规划和管理政策建议及改善策略,逐渐成为研究的热点之一。

WRF 的模拟分辨率可从 100 m 跨越到 100 km。许多学者研究了将高分辨率的城市信息库数据应用于 WRF 模拟。例如 LIN 等利用 MODIS(中等分辨率成像光谱仪^[17])的 1 km 分辨率的土地利用数据对台北地区的城市热岛效应进行了分析^[18]。ADACHI 等^[19]利用 NUDAPT(美国国家城市数据库^[20])以 1 km 的分辨率对芝加哥的模拟结果研究显示,WRF 耦合的 BEP+BEM 模型能准确地再现城市热岛现象,还可以较为准确地预测空调、采暖的能耗与气候之间的关系。PIU^[21]利用 WRF 模拟了香港和珠江三角洲城市的可见度和空气质量,所采用的 1 km 分辨率城市土地利用信息则来自谷歌卫星影像。

SALAMANCA^[22]利用 NUDAPT 对美国休斯顿和德克萨斯城进行了研究,发现详尽的城市形态数据和信息对成功模拟城市热岛效应十分重要。尽管 1 km 的分辨率对于气象模拟来说已经属于较高的精度,但是 DALESSANDRO 等^[23]的研究发现更高的分辨率(例如 250 m)会提高模拟的准确性。而且对于城市控规、详规和城市设计而言,较高分辨率的气候信息便于研究者对城市形态与气候的关联性加以深入分析,其结果更具有实践参考价值。但是要成功实现 WRF 高分辨率模拟需要解决两个问题,一是设置准确、高精度的边界条件,包括气象数据、城市规划和形态参数信息等,以体现城市对气候的影响;二是采用合适的物理方案,以准确捕捉高分辨率条件下城市热岛的特征。

利用 WRF 以 300 m 分辨率模拟了大连夏季典型气象日的温度场和风场特征,对 WRF 高分辨率模拟的边界条件和物理方案进行了分析。并将模拟结果与气象站和地面现场观测数据进行了对比。研究对了解城市热岛效应特征并提出相应规划策略提供了一种思路。

1 高分辨率评估方法

大连东临黄海、西邻渤海,属于海洋性温暖带季风气候。冬季主导风向为北风,平均风速 5.0 m/s,夏季主导风向为南偏西南风,平均风速为 4.0 m/s(图 1),全年温度在 -16.8~37 ℃ 之间,年平均气温为 11.19 ℃。大连城市山地多、地形较为复杂,区域内有长白山脉的延伸段,主城区西部山地最高海拔

约 360 m, 东部山地最高海拔约 240 m(图 2)。

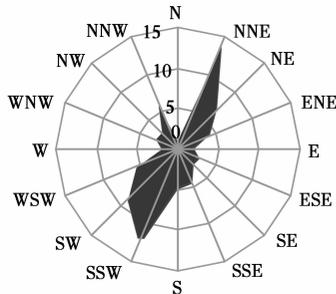


图 1 大连地区风玫瑰图

Fig. 1 Wind rose diagram of Dalian city

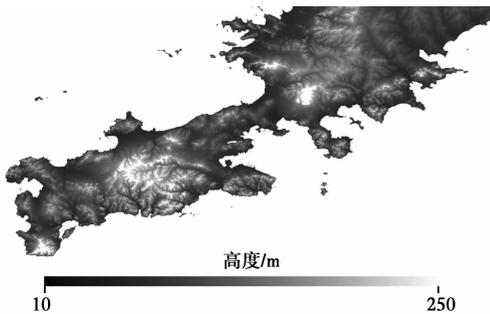


图 2 大连地区地形高程图(90 m 分辨率 DEM 数据, 数据来源 SRTM)

Fig. 2 Topographic maps of Dalian city (SRTM DEM data of 90m resolution)

1.1 边界条件

研究采用的模拟工具是 WRFV3.6 版本。驱动 WRF 模型的数据主要包括气象数据、地形数据、土地利用类型数据 3 种。WRF 的气象数据主要有两种类型。一是美国国家环境预报中心(NECP)提供的覆盖全球的再分析气象资料(FNL)。这个数据来源于全球数据同化系统(GDAS), 主要由全球数据通信网持续地采集并进行实时更新, 并经过数据分析和校正后形成, 数据质量最高。二是 NECP 提供的全球气象预报数据(GFS), 时空分辨率比 FNL 再分析数据高, 并且能够提早 1 h 形成, 可用于驱动 WRF 进行中尺度天气预报。由于本研究是针对历史已发生的真实天气进行模拟, 所以采用 FNL 再分析数据(时间分辨率是 6 h、水平空间分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$ 约 110 km)作为模拟条件。

地形和土地利用类型数据是影响城市热岛特征重要因素, 因此, 获取高精度的数据十分关键。WRF 自带的数据库有美国国家地质调查局(USGS1993 年全球土地分类)和中等分辨率成像光谱仪(MODIS)两种, 尽管质量较高, 但时间较老, 已难反映最新城市状况, 需要加以更新。目前可获取的高精度地形数据有 SRTM 90 m 精度(图 2)和

ASTER/GDEM 30 m 精度的数据两种; 土地利用数据有中国国家基础地理信息中心开发的全球土地覆盖(GLC)30 m 精度数据和清华大学开发的 90 m 精度土地利用观测计划(FROM)的数据。这些数据都是 GIS 格式, 方便了用户使用、比对和进行数据格式的转换。但是 WRF 能够使用的数据都是专用的二进制代码格式, 还需要调用专门的 C 程序对 GIS 数据加以修改和转换, 其流程如图 3 所示。修正前后的土地分类图如图 4 所示, 可以看出大连城市和海岸线已发生了明显的扩张和改变。

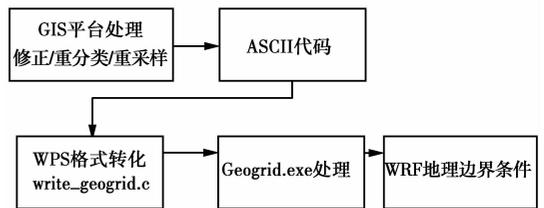
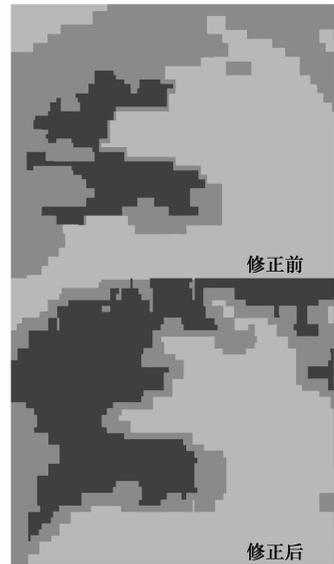


图 3 地形和用地类型边界条件生成方法图示
Fig. 3 Conversion procedure of GIS data to geogrid static data



注: ■ 城市 and 建设用地 ■ 水体 ■ 其他

图 4 第 3 层模拟网格的土地用地分类图

Fig. 4 The land use map of inner grid

1.2 物理方案

WRF 包括了十几个物理方案, 较为全面的描述了各种天气现象, 本研究采用的实验方案如表 1。其中对于高分辨率模拟和城市热岛效应最重要的是陆面表面的物理过程。一般低分辨率的研究采用陆面表面物理方案(LSM)就能够描述城市对气候的影响。此时 WRF 模型将城市简化为一个均质的平板, 设置为均匀的 0.8 m 粗糙度、表面反照率 0.15; 假定城市下垫面的材质主要是混凝土和沥青; 减少

城市部分的绿地面积比例和蒸发量^[14]。但对于高分辨率的城市热岛模拟而言,需要采用专门的城市物理方案,主要有 UCM、BEP 和 BEM 模型 3 种类型。

表 1 WRF 的物理方案设置
Table 1 WRF physics schemes

物理过程	物理方案
微物理	Thompson graupel scheme 一种包含冰、雪、霰过程的适用于高分辨率模拟的微物理方案
长波辐射	Rapid Radiative Transfer Model 一种高精度的快速辐射传输模式
短波辐射	Goddard Shortwave scheme 包含气候态臭氧和云效应的双速多波段短波方案
辐射方案 计算间隔	10 min
近地面 层物理	Monin-Obukhov (Janjic Eta) Similarity scheme 基于含有 Zilitinkevich 热粗糙长度和来自查表的标准相似函数的方案

表 2 UCM 城市物理方案的模拟参数

Table 2 UCM urban categories

城市用地类型	建筑平均高度/m	平均屋顶宽度/m	道路宽度/m	人工产热/(W·m ⁻²)	屋顶热容/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	墙面热容/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	道路热容/(J·m ⁻³ ·K ⁻¹)	屋顶导热系数/(J·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·K ⁻¹)	墙面导热系数/(J·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·K ⁻¹)	道路导热系数/(J·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·K ⁻¹)
低密度住区	5	8.3	8.3	14.69	2.30×10 ⁶	1.25×10 ⁶	1.93×10 ⁶	0.157 5	0.21	0.699
高密度住区	25	12.3	11.78	14.69	2.30×10 ⁶	1.25×10 ⁶	1.93×10 ⁶	0.157 5	0.21	0.699
工业和商业区	30	20	14	14.69	2.30×10 ⁶	1.25×10 ⁶	1.93×10 ⁶	0.157 5	0.21	0.699

1.3 网格设置

模拟以大连中心城区为主要对象,模拟中心点坐标 N38.923°,E121.647°。由于采用了 300 m 高分辨率的网格,需要耗费大量的计算资源。一般来说水平分辨率(网格间距)每提高 1 倍,模拟的总格点数将为原来的 4 倍。此时积分时间步长也需相应减小为原来的 0.5 倍,导致模拟计算的总积分次数为原来的 2 倍。因此一般每提高 1 倍分辨率,完成模拟所需的 CPU 总时间将至少为原来的 8 倍以上,对计算能力的耗费非常巨大。针对这一问题一般可采用嵌套网格的形式,能充分考虑周边大背景气候的影响,也保证核心网格的分辨率较高,在一定程度上节约计算资源。

研究采用 3 层嵌套的方式,第 1 层格点数 60×60,网格间距 2.7 km×2.7 km;第 2 层格点数 81×81,网格间距 0.9 km×0.9 km;第 3 层格点数 105×105,网格间距 0.3 km×0.3 km。计算区域基本覆

续表 1

物理过程	物理方案
陆面表面	Noah Land-Surface Model 含有 4 个不同层次土壤温湿度、积雪覆盖和冻土物理过程
行星边界层	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) Turbulence Kinetic Energy (TKE) 含有局地垂直混合的一维诊断湍流动能方案
城市物理	UCM,单层城市冠层模型

采用了其中较为常用的 UCM 城市物理方案,它可以描述城市和建筑的三维特征和人为产热。UCM 假定城市是一个均匀的、无限长的街道峡谷,峡谷中阴影、反射、辐射的减少效应均被考虑,风廓线按照指数律描述。UCM 允许研究者将城市细分为低密度居住区、高密度居住区、工业和商业区 3 种城市用地类型。采用如建筑平均高度、屋顶和道路平均宽度、人工产热量、建筑墙面、屋顶和道路的热容、导热系数等参数分别描述建筑城市对气候的影响,本文采用的参数如表 2。

盖了大部分的城市建成区,其中第 3 层网格覆盖的是中山区、西岗区等城市中心区(图 4)。

参照典型气象日的标准,选取大连高温、晴朗、南风的气象日,即北京时间 2013-07-06T08:00—2013-07-07T15:00,共计 32 h 作为模拟的对象。

2 模拟结果

2.1 温度场

地面 2 m 的温度场结果显示,7 月 6 日 8 时—7 月 6 日 12 时,气温逐步上升,最高气温达到 30.3 ℃;13 时起温度开始下降,夜间最低是 7 月 7 日 5 时,温度为 22.5 ℃,7 月 7 日 6 时起温度开始上升,至 8 时升至 25.2 ℃。

从模拟期温度场的变化可以看出,海风对陆地及城市的降温效果十分明显。南部海面附近空气温度低 5~10 ℃,南风将冷空气吹向城市,在海洋沿岸形成平行于岸线的等温线,越往陆地深处气温越高。

由于海风的降温作用,海岸线附近的气温比城市中心区低 5 ℃ 左右。受南风影响,城市热岛中心向下风向偏移,位于主城区北部,大连湾附近海面气温受上风向城市的影响比周边海面高(图 5)。

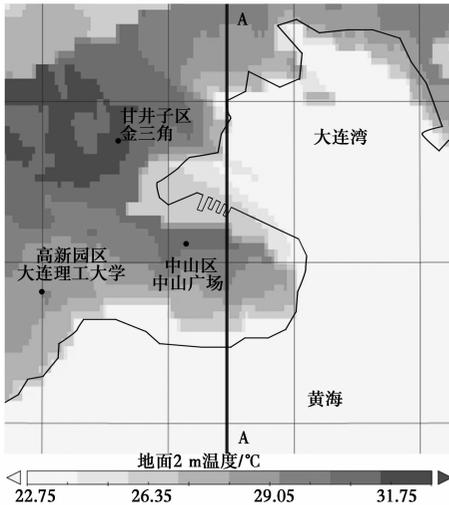
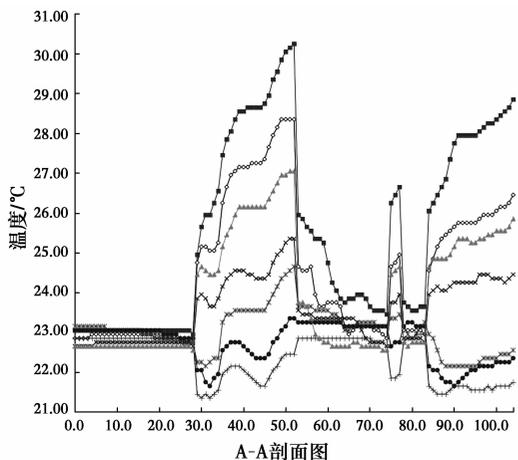


图 5 7 月 6 日 20 时最内层温度场(A-A 为剖面位置)

Fig. 5 Temperature field of the inner grid on 20:00 6th July (A-A is the cross section line)

地面 2 m 温度场剖面变化过程显示,大连中心区存在较强的城市热岛效应(图 6)。其中剖面上显示出有 2 个热岛中心,分别位于中山区和甘井子区。7 月 6 日白天热岛强度较强,热岛强度最大为 5.6 ℃,出现在 7 月 6 日 13 时。7 月 6 日 15 时之后热岛强度有明显的回落,夜间城市热岛最小为 0.5 ℃,出现在 7 月 7 日 6 时。夜间山体降温速度显著快于城市建成区,例如其中 7 月 6 日 20 时的温度场分布显示,山体气温低于城市建成区约 3 ℃,对城市总体提供了良好的冷源。



注: 7月6日 → 12:00 → 16:00 → 20:00
7月7日 → 2:00 → 4:00 → 8:00

图 6 地面 2 m 温度剖面随时间的变化

Fig. 6 Temperature cross section variation with time

2.2 风场

模拟期内风向为南风,7 月 6 日白天城市中心区风速较低,约为 0.5~1.5 m/s 之间。风速最小值 0.5 m/s,出现在 7 月 6 日 8 时(图 7)。由于 7 月 7 日白天风速较低,相应地城市中心热岛强度较高。7 月 6 日 15 时之后风速继续下降,7 月 7 日凌晨 2 时之后风速开始加强,最大值 3.0 m/s,出现在 7 月 7 日 8 时。

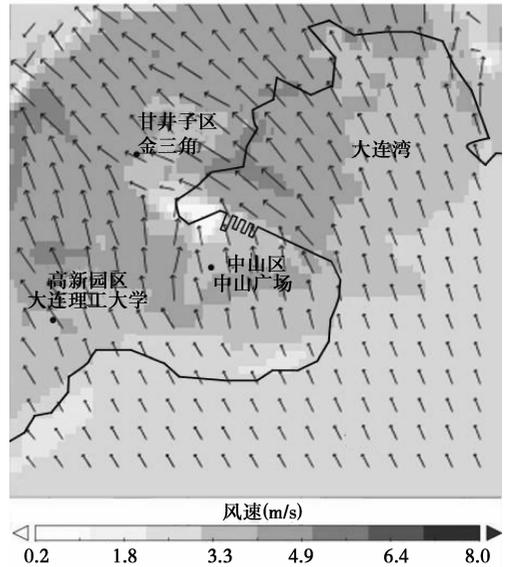


图 7 7 月 6 日 8 时最内层风场

Fig. 7 The inner wind field at 8:00 a.m. on 6th July

2.3 模拟结果验证

为了验证 WRF 模拟结果的准确性,我们将 WRF 数据与气象站和现场观测数据加以对比分析。我们于 2013 年 7 月 6 日—7 月 7 日进行了现场观测,从上午 8:00 到下午 18:00 对大连中山区进行人工现场连续观测,每小时记录一组气象参数,18:00 之后的夜间观测由放置现场的仪器完成(图 8)。人工现场观测采用 NK4500 的手持气象站。风速测量范围是 0.4~40 m/s,测量精度是 3%;空气温度测量范围是 -29~70 ℃,精度是 1 ℃;湿度测量范围是 0~100%,精度 3%。另外在大连理工大学建筑馆屋顶还设置了一个 HOBO 气象站同步观测。风速测量范围是 0~44 m/s,测量精度是 0.5 m/s;空气温度测量范围是 -40~75 ℃,精度是 0.2 ℃;湿度测量范围是 0~100%,精度 2.5%。

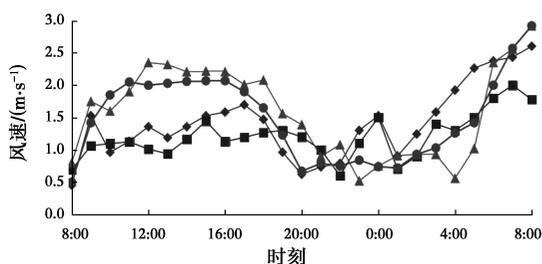
将 WRF 温度场模拟结果分别与现场实测和气象站结果对比,可以发现两者之间的变化趋势基本吻合。温度场观测值与模拟值最大偏差 2.2 ℃,最小 0.1 ℃,平均偏差 0.9 ℃(图 9)。风速模拟结果与现场实测及气象站观测数据也基本吻合,最大偏



图 8 现场观测及固定气象站观测

Fig. 8 In situ observation (left) and weather station (right)

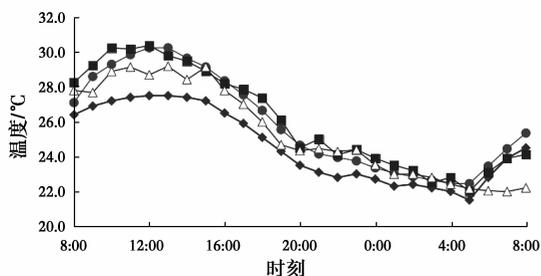
差 1.0 m/s, 最小 0 m/s, 平均 0.3 m/s(图 10)。对于尺度较大的城市而言, 这些模拟结果的准确性是十分理想的, 用于分析城市温度场、风场的变化规律具有较高的可信度。



注: ◆ 中山广场WRF模拟(1.5 m) ● 大连理工大学WRF模拟(1.5 m)
■ 中山广场实测结果 ▲ 大连理工大学气象站实测结果

图 9 温度场模拟结果与实测对比
(7月6日8时至7月7日8时)

Fig. 9 Comparison of temperature field between simulation and observations(from 8:00 6th July to 8:00 7th July)



注: ● 中山广场WRF(2 m)结果 ◆ 大连理工大学WRF(2 m)结果
■ 中山广场实测结果 ▲ 大连理工大学气象站实测结果

图 10 风场模拟结果与实测对比
(7月6日8时至7月7日8时)

Fig. 10 Comparison of wind field between simulation and observations(from 8:00 6th July to 8:00 7th July)

3 结论

进行高分辨率的气象模拟可以准确的研究城市

局地气候的变化特征, 为分析城市热岛效应、采取相应的缓解措施提供了依据。进行 WRF 高分辨率模拟需要采用高精度城市地形和土地利用数据修正模型自带的数据库以提供准确的边界条件, 并选择 UCM 等合适的城市物理方案。以大连为例进行了 300 m 高分辨率夏季典型气象日的模拟, 结果表明模拟期内城市存在较强的热岛效应, 最高时强度达 5.6 °C, 热岛中心位于城市北部即甘井子区金三角一带。但是由于陆地和海洋温差较大, 因此海风会对城市热岛具有较强的缓解作用, 风速大于 2 m/s 时城市热岛效应得到了明显的削弱。因此沿海城市规划应当考虑如何充分利用清洁的海风为城市夏季提供致冷源。例如规划平行于主导风、垂直于岸线的风道等措施。

参考文献:

- [1] 国务院. 国家新型城镇化规划(2014—2020年)[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm, 2014-03-16.
The State Council. National new urbanization plan [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm, 2014-03-16. (in Chinese)
- [2] OKE T R. The energetic basis of the urban heat island [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108(455): 1-24.
- [3] OLESON K W, MONAGHAN A, WILHELMI O, et al. Interactions between urbanization, heat stress, and climate change [J]. Climatic Change, 2015, 129(3/4): 525-541.
- [4] OHASHI Y, IHARA T, KIKEGAWA Y, et al. Numerical simulations of influence of heat island countermeasures on outdoor human heat stress in the 23 wards of Tokyo, Japan [J]. Energy and Buildings, 2015, (5): 40-44.
- [5] ZHONG S, QIAN Y, ZHAO C, et al. A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area: Urban heat island versus aerosol effects [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(20): 33-36.
- [6] FALLMANN J, FORKEL R, EMEIS S. Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality [J]. Atmospheric Environment, 2016, 125: 199-211.
- [7] 王志浩. 山地城镇热岛特征与测评方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
WANG Z H. Study on characteristics and evaluation methods of heat island in mountainous city [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)

- [8] 齐静静,刘京,宋晓程,等. 大型城市河流对城市气候影响的实测研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011(10):56-59.
QI J J, LIU J, SONG X C, et al. Field measurement of the influence of large urban river on urban thermal climate [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011(10):56-59. (in Chinese)
- [9] 陈云. 基于Landsat8的城市热岛效应研究初探——以厦门市为例[J]. 测绘与空间地理信息,2014(2):123-128.
CHEN Y. A preliminary study on the urban heat island effect based on landsat 8; case of xiamen city [J]. Geomatics & Spatial Information Technology,2014(2):123-128. (in Chinese)
- [10] 寿亦萱,张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报,2012,70(3):338-353.
SHOU Y X, ZHANG D L. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3): 338-353. (in Chinese)
- [11] YANG X, ZHAO L, BRUSE M, et al. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments [J]. Energy and Buildings, 2012, 54: 243-251.
- [12] 黄菁,张强. 中尺度大气数值模拟及其进展[J]. 干旱区研究,2012,29(2):273-283.
HUANG J, ZHANG Q. Mesoscale atmospheric numerical simulation and its progress [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(2):273-283. (in Chinese)
- [13] CHEN F, KUSAKA H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system; development, evaluation, and applications to urban environmental problems [J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(2): 273-288.
- [14] 郭飞,祝陪生,段栋文,等. 高密度城市气候评估方法与应用[J]. 西部人居环境学刊,2016,30(6):19-23.
GUO F, ZHU P S, DUAN D W, et al. High-density urban climate evaluation method and application [J] Journal of Human Settlements in West China, 2015, 30(6):19-23. (in Chinese)
- [15] GUO F, WANG S Y, ZHU P S. Numerical urban climate simulation and preliminary planning strategies of dalian city based on WRF model [C]//The 9th International Conference of Urban Climate, Toulouse, France. 2015.
- [16] 郭飞. 基于WRF/UCM的城市气候高分辨率数值模拟研究[J]. 大连理工大学学报,2016,56(5):502-509.
GUO F. Urban climate high resolution numerical simulation research based on WRF/UCM [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(5): 502-509. (in Chinese)
- [17] 李成才,毛节秦,刘启汉,等. 利用MODIS研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J]. 科学通报,2003,19:2094-2100.
LI C C, MAO J T, LIU Q H et al, Distribution and seasonal variation research of aerosol optical thickness in eastern China using MODIS [J]. Chinese Science Bulletin, 2003,19:2094-2100. (in Chinese)
- [18] LIN C Y, CHEN F, HUANG J C, et al. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land-sea circulation over northern Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(22): 5635-5649.
- [19] ADACHI S A, KIMURA F, KUSAKA H, et al. Moderation of summertime heat island phenomena via modification of the urban form in the tokyo metropolitan area [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2014, 53(8):1886-1900.
- [20] CHING J, BROWN M, BURIAN S, et al. National urban database and access portal tool [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(8): 1157.
- [21] PIU N C, HAO S, FAT L Y. High-resolution visibility and air quality forecasting using multi-layer urban canopy model for highly urbanized Hong Kong and the Pearl River Delta [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts, 2015, 17: 44-51.
- [22] SALAMANCA F, MARTILLI A, TEWARI M, et al. A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(5): 1107-1128.
- [23] DALESSANDRO J. Comparisons of anvil cirrus spatial characteristics between airborne observations in DC3 campaign and WRF Simulations [C]//2015 AGU Fall Meeting, 2015.