文章编号：1000-8608(2016)05-0502-08

基于 WRF/UCM 的城市气候高分辨率数值模拟研究

郭 飞*

（大连理工大学 建筑与艺术学院，辽宁 大连 116024）

摘要： 以沿海城市大连2015年7月3日2时至7月4日2时的晴朗高温天气为研究背景，利用WRF/UCM以1 km的高分辨率进行了城市气候数值模拟.结果表明：海风、山体对城市热岛有明显的缓解作用；中心城区受山地影响，形成了管道风效应；模拟期间城市热岛中心位于大连开发区一带，热岛强度最高达6.9 ℃，出现在2015年7月3日19时30分.将模拟结果与两个气象站和现场观测值进行了对比，发现模拟值与观测值变化趋势基本一致，地面温度场模拟结果优于风场模拟结果.温度场误差最大－3.10 ℃，最小0.08 ℃；平均误差最大0.88 ℃，最小0.52 ℃；均方根误差最大1.23 ℃，最小0.63 ℃.对于大尺度的城市气候研究而言误差在可接受的范围之内.对相应的缓解城市热岛的城市规划策略也进行了初步探讨.

关键词： WRF/UCM；城市气候；数值模拟；大连

中图分类号： TU111.19 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201605010

0 引 言

中国目前城市居民已占人口总数的54%，城市面临着巨大的环境压力.良好的城市气候是营造生态环境的重要基础.城市规划应当与城市气候评估相结合，采取科学措施推动城市建设顺应气候规律.国外许多城市的成功经验表明，这样能够有效缓解城市气候恶化和污染问题.

城市气候成因复杂，既受大尺度背景气候、局地下垫面材质影响，也受建筑形态和能耗情况影响，如何科学准确分析城市气候特征是进行城市气候规划的关键环节[1].气象研究模型WRF (weather research and forecasting model)，是由美国环境预测中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)等科研机构于2000年起共同参与开发的新一代中尺度预报系统[2].WRF具有完善的物理方案描述各类复杂的气候现象，在全世界范围内广泛用于天气预报和气象研究.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、规划和管理的政策建议及改善策略，逐渐成为研究的热点之一[3-5].WRF可以耦合Noah陆地下垫面、城市冠层模型(如UCM、BEP和BEM)，甚至与微尺度CFD模型耦合来模拟城市气候，详细描述城市空间形态的特征、建筑信息、人为产热的数据等，为理解和评估城市气候提供了有力的工具[6-7].许多学者研究了使用WRF和高分辨率的城市信息库数据模拟城市气候.例如伍见军等利用333 m分辨率的GIS数据针对重庆的城市气候进行了研究[8].蒙伟光等利用更新的GIS土地利用资料和城市冠层模型针对广州的一次高温天气进行了数值实验[9].Lin等利用MODIS卫星1 km分辨率的土地利用数据对中国台湾北部地区的城市热岛效应进行了分析[10].Kusaka等将平板模型和UCM的模拟结果与气象观测数据对比，发现UCM能够模拟出热岛效应而平板模型没有，平板模型比实际观测值最大偏离幅度达6.2 ℃[11].这些研究表明，WRF可以成功模拟城市热岛效应、海风环流等城市气候现象，其模拟结果与观测数据吻合也较好.WRF应用于城市总体尺度的气候评估具有较好的优势.

大连是典型的沿海山地城市，自然条件良好，

收稿日期： 2016-01-25； **修回日期：** 2016-07-12.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51278078,51308087)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT13RW306).
作者简介： 郭 飞*(1980-)，男，博士，副教授，E-mail：guofei@dlut.edu.cn.

温度适宜，是北方的旅游热门城市.

过去 60 余年大连城区面积逐步扩张，从 50 km^2(1950 年)扩展为 387.7 km^2(2009 年). 由于城市范围扩张、土地高强度开发利用，在中心城区形成了高层、高密度的形态特征. 过去 60 余年城市中心区年均气温逐步升高、风速降低、空气污染逐渐加重. 根据环境监测数据，2014 年大连空气质量为优的天数仅为 69 d[12]. 利用科学的工具分析大连城市扩张带来的气候影响，据此提出相应的规划策略也成为当务之急.

本文以 2015 年 7 月 3 日为例，利用 WRF 模拟大连城市温度场和风场特征，并与气象站和地面现场观测数据进行对比，为了解城市气候特征并提出规划策略提供一种全新思路.

1　城市下垫面信息处理

伴随着城市化的过程，城市下垫面类型发生了很大的转变. 然而城市土地资料的更新往往跟不上改变的速率，许多研究结果表明，如果不根据实际情况加以修改，就会造成某些相关变量产生较大的模拟偏差[13-14]. 目前 WRF 提供的土地资料有两套，一为美国地质调查局(USGS)1993 年全球 24 种类型的 30 s(约 50 km)分辨率数据，二为基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)的 2001 年全球 20 种类型的 15 s(约 25 km)分辨率数据，虽然整体分类精度和质量较高，但在许多地区仍有较为明显的分类错误. 本文在大连市土地利用现状图的基础之上，利用 GIS 平台对不符合现状的地方进行了修正. 然后将 GIS 土地利用数据处理成 WRF 的静态地理场，替换默认的 USGS 和 MODIS 土地利用数据，为 WRF 数值试验提供更准确的城市覆盖范围和土地利用边界条件，修正前后对比如图 1 所示. 数据修正和处理流程如图 2 所示.

2　模拟期间背景天气

由于静稳天气有利于城市热岛的形成，适合用来研究 WRF/UCM 的模拟效果，选取大连受高气压控制的高温、晴朗的气象日，即 2015 年 7 月 2 日 18 时～2015 年 7 月 4 日 2 时，共计 32 h 作为模拟的时间段(图 3). 由于前 8 h 为模型物理过程的调整适应时间，本文仅讨论后 24 h 的模

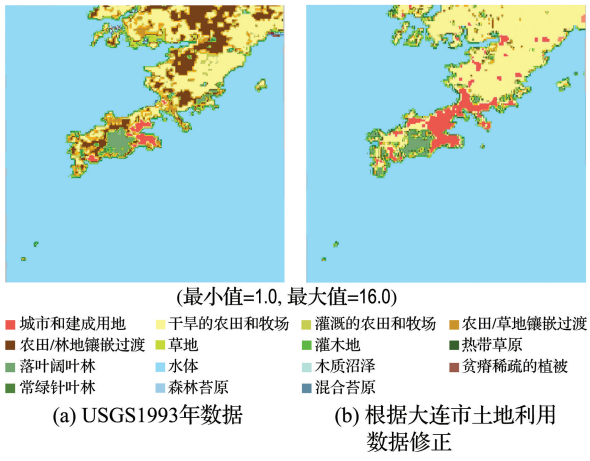

图 1　大连地区用地类型分布图

Fig. 1　Dalian city landuse map

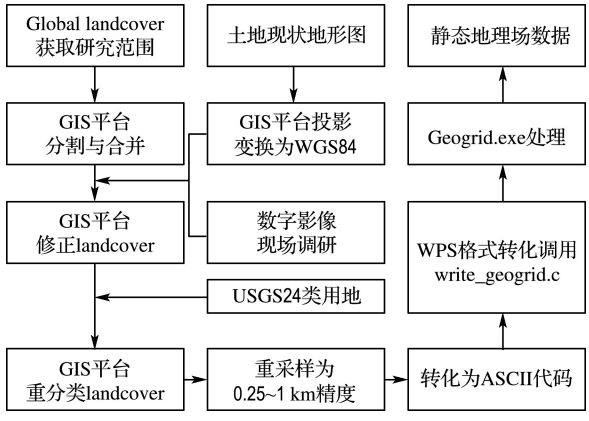

图 2　土地利用数据向 WRF 静态地理场的转换流程

Fig. 2　Process of converting landuse data to WRF geogrid data

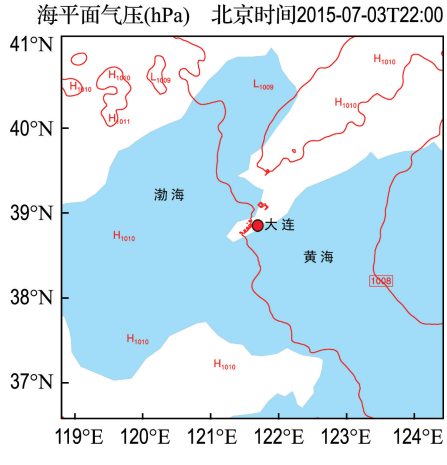

图 3　2015 年 7 月 3 日 22 时海平面大气压等值线图

Fig. 3　Sea surface pressure contour at 22:00 July 3rd, 2015

拟结果.为了对比验证模型设置和物理方案的有效性,在西尖山和大连理工大学(以下简称理工)进行了现场固定观测,并获取了周水子国际交换站(以下简称周水子)的逐时观测结果(表 1).根据观测结果,模拟时段内大连区域风向为北偏西,风速 0.2～7.0 m·s^{-1},温度 19.0～25.7 ℃(图 4).

表 1 地面气象站观测数据简况

Tab.1 The basic information of ground weather station

站点	地理位置	气温/℃	相对湿度/%	风向	风速/(m·s^{-1})
理工	38.88°N121.52°E	19.3～24.8	30.4～55.1	NNW	0.2～4.5
西尖山	38.87°N121.54°E	19.8～25.7	48.3～67.6	NNW	0.4～6.5
周水子	38.96°N121.52°E	19.0～24.0	NA	NNW	1.0～7.0

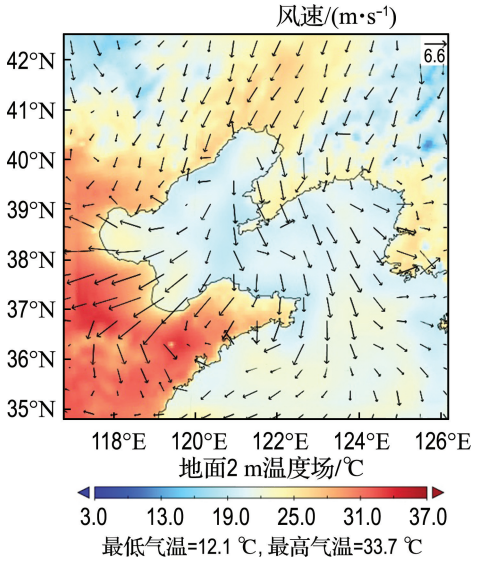

图 4 2015 年 7 月 3 日 12 时背景风场及温度场

Fig.4 The background wind field and temperature field at 12:00 July 3rd, 2015

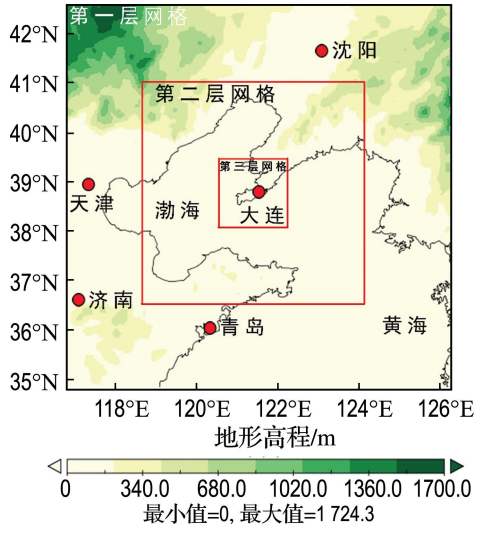

图 5 嵌套网格设置与地形

Fig.5 Nesting grids setting and the topography

3 模拟参数设置

模拟区域采用嵌套网格的设置.嵌套网格的优势是既可以提高核心关注区域的模拟精度,同时也能充分考虑周边的气候影响并节约计算资源.本次采用三层嵌套网格,第一层格点数 99×99,网格间距 9 km×9 km;第二层格点数 168×168,网格间距 3 km×3 km;第三层格点数 156×156,网格间距 1 km×1 km.垂直方向设置 54 层,总高度 16 km.网格中心点坐标 38.923°N,121.647°E.模拟计算区域基本覆盖了大部分的大连城市建成区(图 5).

驱动 WRF 的气象数据是美国 NCEP 的全球 3 h 0.25°×0.25°再分析气象资料,由于时空分辨率较高,适合用于高分辨率的城市气候模拟.模拟积分步长为 54 s.本研究采用的物理方案如表 2 所示.

表 2 WRF 的物理方案设置

Tab.2 WRF physics schemes setting

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
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

4　模拟结果分析及验证

4.1　温度场

对城市气候而言，地面 2 m 的温度场对人体热舒适影响最重要. 地面 2 m 温度场变化结果显示，模拟期间城市中心区最高气温达到 26.5 ℃，出现在 2015 年 7 月 3 日 13 时 30 分和 14 时 30 分，位于金州区一带；7 月 3 日 15 时 30 分起温度开始下降(图 6). 夜间最低温度为 13.6 ℃，出现在 7 月 3 日 4 时 30 分，位于普兰店一带. 模拟期间城市热岛最强时刻出现在 2015 年 7 月 3 日夜间 19 时 30 分(图 7). 此时所有的城市建成区无论大小均存在较强的热岛效应，最高强度达 6.9 ℃，位于大连开发区一带. 形成的原因主要是风受到开发区北面山地的阻挡，因此城市内部蓄积的热量难以有效地散发出去.

从模拟期间温度场的变化可以看出，白天陆地附近气温升高速度快于海面，但是海风对陆地及城市的降温效果十分明显. 例如 2015 年 7 月 3 日 13 时 30 分，大连北侧渤海海面 2 m 空气温度约为 17.7 ℃，北风将凉爽空气吹向陆地，形成较强的降温作用，渤海岸线附近的气温比城市中心区低 5 ℃左右. 越往陆地深处气温越高，大连城市

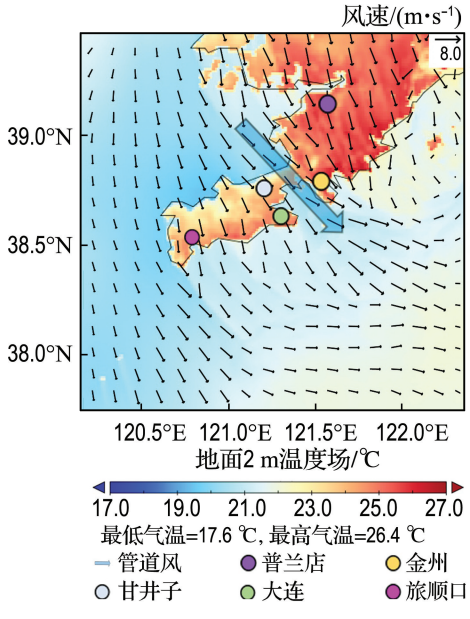

图 6　2015 年 7 月 3 日 15 时 30 分风场及温度场(最内层模拟域)

Fig. 6　The wind field and temperature field at 15:30 July 3rd, 2015 (the inner domain)

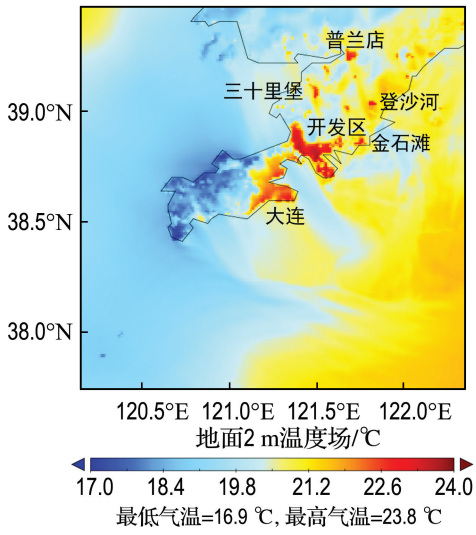

图 7　2015 年 7 月 3 日 19 时 30 分温度场(最内层模拟域)

Fig. 7　The temperature field at 19:30 July 3rd, 2015 (the inner domain)

中心区、旅顺口、开发区等比普兰店、金州等地温度低 2～3 ℃. 受海面凉爽的风影响，城市热岛中心向下风向偏移，黄海区域大连湾附近海面气温受上风向城市的影响比周边海面高.

为了研究温度场在高度上的变化，绘制 3 个不同剖面，剖切位置如图 8 所示. 温度剖面显示陆地地形及城市下垫面对大气产生了较强的影响，

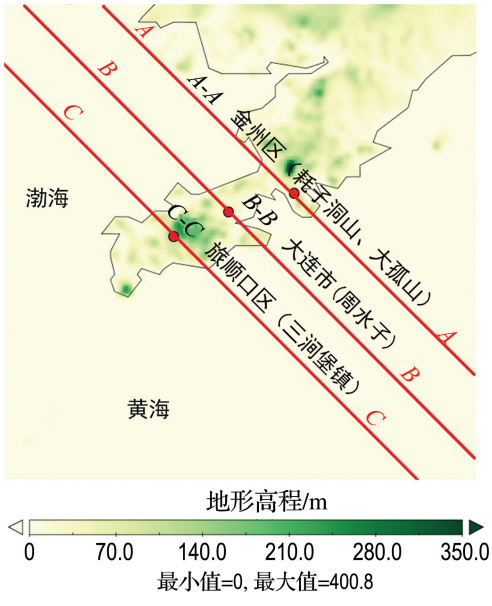

图 8　最内层模拟域地形及温度场剖面位置

Fig. 8　The inner nesting grid with topography and temperature section position

地面 200 m 以下尤为显著(图 9). *A*-*A* 剖面热岛中心为大连开发区,模拟期间处于北面山地形成的风影区之内,存在较强的城市热岛效应,热岛强度达 3 ℃. *B*-*B* 剖面热岛中心位于大连甘井子区、中山区等处,受海风影响热岛强度不高,为 1～2 ℃. *C*-*C* 剖面主要位于高新区及旅顺口区之间,山体及绿化覆盖率高,热岛效应也在 1～2 ℃.

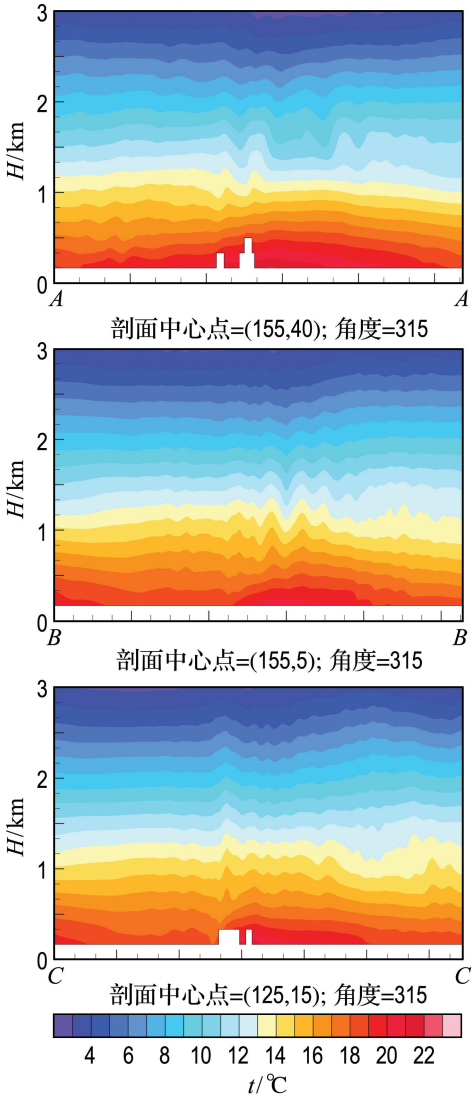

图 9 2015 年 7 月 3 日 13 时 30 分温度场剖面

Fig. 9 Temperature section at 13:30 July 3rd, 2015

4.2 风 场

对城市风场,一般主要评估地面 10 m 的风场分布情况. 风速和热岛强度及污染物浓度呈反比关系,风速越大热岛强度和污染物浓度越低[15]. 模拟期间大连市区风向为北偏西风,与气象站观测结果一致.

模拟结果显示,7 月 3 日夜间城市风速较低,为 1.5～2.5 m·s^{-1}. 风速最小值 1.58 m·s^{-1},出现在 7 月 4 日 1 时. 7 月 3 日 9 时至 17 时风速较高,相应地城市中心热岛强度较低. 风速最大值 5.83 m·s^{-1},出现在 7 月 3 日 17 时. 相对于温度场,风场受地形影响更大,例如金州区和甘井子区之间两处山体地势较高,在两者之间形成了管道风效应,风速有加强的趋势(图 6). 受此影响甘井子区和中山区的城市热岛强度也有所减弱.

4.3 模拟结果验证

为了验证 WRF 模拟结果的准确性,将 WRF 数据与气象站和现场观测数据加以对比分析. 于 2015 年 7 月 3 日至 7 月 7 日进行了现场观测,从 8 时到 18 时对西尖山进行人工现场连续观测,每 15 min 记录一组气象参数,18 时之后的夜间观测由放置现场的仪器完成. 另外获取了周水子气象站、理工气象站在此期间的逐时气象数据.

将 WRF 温度场模拟结果分别与现场实测和气象站结果对比,可以发现模拟与观测值之间的变化趋势基本吻合,且温度场模拟结果优于风场(图 10、11). 温度场观测值与模拟值最大误差 −3.10 ℃,最小误差 0.08 ℃,平均误差 0.52～0.88 ℃,均方根误差 0.63～1.23 ℃. 风速模拟结果与现场实测及气象站观测数据吻合度低于温度场,最大误差 −5.10 m·s^{-1},最小误差 0.01 m·s^{-1},平均误差 1.03～2.19 m·s^{-1},均方根误差 1.37～2.47 m·s^{-1}(表 3). 对于尺度较大的城市

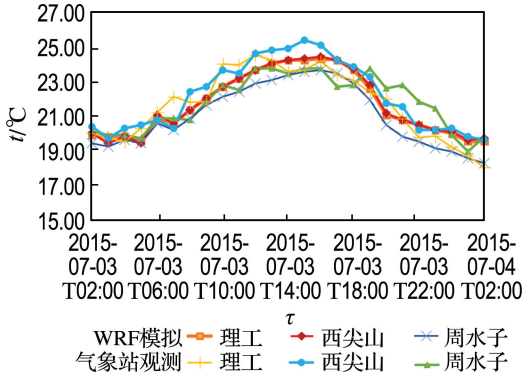

图 10 地面 2 m 温度模拟结果与气象站观测对比

Fig. 10 The comparison of 2 m surface temperature simulation to the station observed data

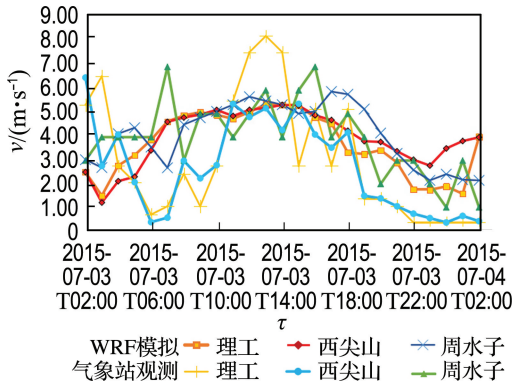

图 11　地面 10 m 风速模拟结果与气象站观测对比

Fig. 11　The comparison of 10 m surface wind speed simulation to the station observed data

表 3　模拟与观测数据的误差分析

Tab. 3　The error analysis of simulation and observed data

地点	温度误差/℃			
	最大误差	最小误差	平均误差	均方根误差
理工	1.57	0.08	0.63	0.77
西尖山	−1.10	0.10	0.52	0.63
周水子	−3.10	0.10	0.88	1.23
地点	风速误差/(m·s⁻¹)			
	最大误差	最小误差	平均误差	均方根误差
理工	−5.10	0.02	2.19	2.47
西尖山	4.09	0.01	1.90	2.27
周水子	−4.31	0.04	1.03	1.37

而言，模拟结果尤其是温度场的准确性是较为理想的，用于分析城市温度场、风场的基本变化规律具有较高的可信度.

5　应用前景

每个城市的气候现象都有其独特的特征，既受地理条件和背景气候的影响，也受城市内部用地布局和建筑形态的影响，因此开展城市气候的研究难度较高. 而 WRF 通过采用丰富完善的物理方案、嵌套网格、真实的地理和气象数据、建筑和城市形态参数等设置，可以较为准确地获取不同时空分辨率的气候信息，为研究城市气候的科学规律提供了极大的方便. WRF 的应用前景较为广泛，例如应用于将规划、气候和地理研究相结合的城市气候图当中. 德国鲁尔工业区 20 世纪 70 年代曾深受大气污染的困扰，最早开始进行城市气候图研究，采取规划措施促进弱风条件下空气流动，缓解大气污染. 通过编制气候分析图，直接指导了许多城市的土地利用规划. 其内容包括：城市气候分区（绿地、开敞空间、城市功能区等）、各类污染源（交通、燃气、工业等）、风环境信息（不同区域和季节的风玫瑰、地形风、管道风、风屏障等）[16]（图 12）. WRF 获取的城市气候数据分辨率可从数百米到数百千米，将在气候图研究中起到重要作用.

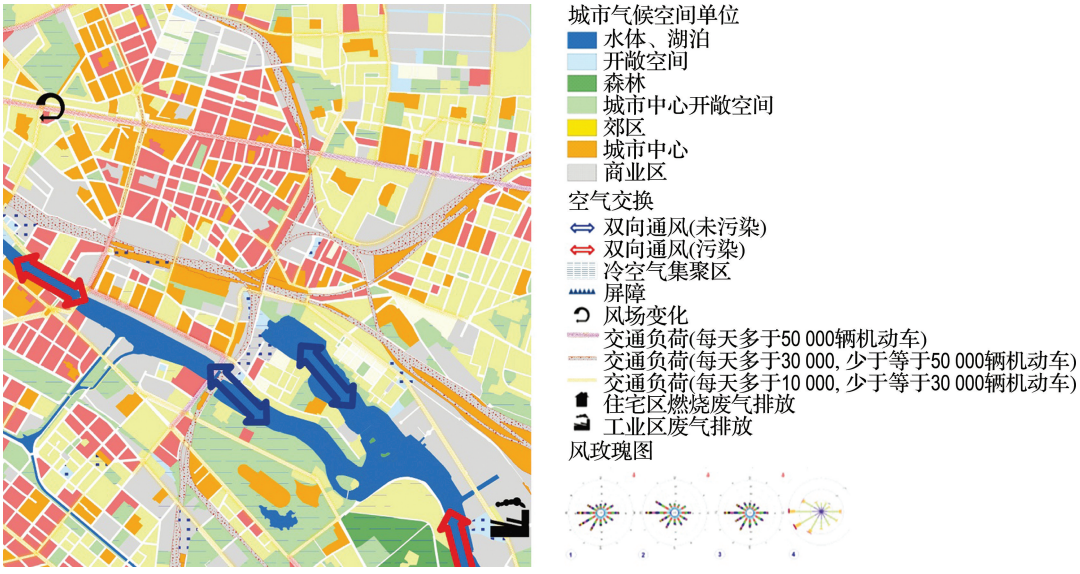

图 12　柏林地区气候分析图局部（2014 年，1∶30 000）

Fig. 12　Berlin climate analysis map partial (2014, 1∶30 000)

6 结 语

本文用WRF对大连城市进行高分辨率的气候模拟,其结果与观测结果吻合得较好.模拟期间城市热岛效应强度最高时达6.9 ℃,但是海风对城市热岛起到了良好的缓解作用.因此大连城市规划应当充分利用黄海和渤海海风资源,为城市夏季和污染天气提供清洁凉爽的空气.例如保护海岸线、降低岸线开发强度和密度,规划河流沿岸景观带、建设低密度区并建设城市通风道,将海面上的清洁新鲜空气引导进入城市内部,有助于缓解热岛效应和大气污染.

山体对城市热岛具有良好的缓解作用.由于一般山体绿化较好,并且气温会随着高度上升而下降,一定高度的山丘将会形成冷气团的聚集区,为周边城市环境提供山谷风和冷空气.城市规划应当对此加以保护和利用,将山体与绿带、公园相联系,有助于分割城市热岛、避免其蔓延扩张,对改善城市环境具有较大的作用.

利用WRF模拟结果对城市总体温度场和风场变化规律加以总结,结合地形分析、土地利用、城市规划管理政策等,可以绘制城市气候图,并提出改善城市风环境、减缓城市热岛效应和空气污染的策略.

参考文献:

[1] 郭 飞,祝培生,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, 2015, **30**(6):19-23.
GUO Fei, ZHU Pei-sheng, DUAN Dong-wen, *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)

[2] Michalakes J, Dudhia J, Gill D, *et al*. Design of a next-generation regional weather research and forecast model [J]. **Towards Teracomputing**, 1998: 117-124.

[3] GUO Fei, WANG Shi-yuan, ZHU Pei-sheng. Numerical urban climate simulation and preliminary planning strategies of Dalian city based on WRF model [C] // **The 9th International Conference of Urban Climate**. Toulouse: ICUC, 2015.

[4] Kong S F, Li L, Li X X, *et al*. The impacts of firework burning at the Chinese Spring Festival on air quality: Insights of tracers, source evolution and aging processes [J]. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 2015, **15**(4):2167-2184.

[5] Lu X, Pan N, An H. Comparison of traffic noise spatial distribution based on road network - a case study of typical area in Dalian city, China [C] // **Proceedings of the 12th Western Pacific Acoustic Conference 2015**. Singapore: WESPAC, 2015.

[6] CHEN Fei, 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.

[7] Tewari M, Kusaka H, CHEN Fei, *et al*. Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion [J]. **Atmospheric Research**, 2010, **96**(4):656-664.

[8] 伍见军,王咏薇,朱 彬,等. WRF模式中城市冠层参数化方案在重庆气象环境模拟中的性能比较[J]. 长江流域资源与环境, 2013, **22**(12):1627-1634.
WU Jian-jun, WANG Yong-wei, ZHU Bin, *et al*. Performance comparison of different urban canopy schemes in WRF model under Chongqing meteorological simulation [J]. **Resources and Environment in the Yangtze Basin**, 2013, **22**(12): 1627-1634. (in Chinese)

[9] 蒙伟光,张艳霞,李江南,等. WRF/UCM在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用[J]. 热带气象学报, 2010, **26**(3):273-282.
MENG Wei-guang, ZHANG Yan-xia, LI Jiang-nan, *et al*. Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou city [J]. **Journal of Tropical Meteorology**, 2010, **26**(3):273-282. (in Chinese)

[10] LIN Chuan-yao, CHEN Fei, 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.

[11] Kusaka H, Chen F, Tewari M, *et al*. Numerical

simulation of urban heat island effect by the WRF model with 4-km grid increment: an inter-comparison study between the urban canopy model and slab model [J]. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, 2012, **90B**: 33-45.

[12] 中国环境监测总站. 2014 年大连市区空气质量概述[EB/OL]. (2015-05-08)[2015-12-15]. http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_44673.html.
China Environmental Monitoring Terminal. Dalian urban area air quality summary[EB/OL]. (2015-05-08)[2015-12-15]. http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_44673.html. (in Chinese)

[13] LIN Chuan-yao, Chen Wan-chin, CHANG Pao-liang, *et al*. Impact of the urban heat island effect on precipitation over a complex geographic environment in northern Taiwan [J]. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 2011, **50**(2): 339-353.

[14] Sertel E, Robock A, Ormeci C. Impacts of land cover data quality on regional climate simulations [J]. **International Journal of Climatology**, 2010, **30**(13): 1942-1953.

[15] Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city [J]. **Journal of Applied Meteorology**, 2001, **40**(2): 169-182.

[16] The Association of German Engineers. Environmental Meteorology-Climate and Air Pollution Maps for Cities and Regions: VDI 3787 [S]. Berlin: The Association of German Engineers, 2014.

Urban climate high resolution numerical simulation research based on WRF/UCM

GUO　Fei*

(School of Architecture and Fine Art, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Choosing a sunny and high temperature day from 2:00, 3 July to 2:00, 4 July in 2015 as the research background, a 1 km high resolution numerical simulation for the urban climate in the coastal city of Dalian was implemented by WRF/UCM. The experimental results show that the wind from the sea and mountain can significantly moderate the UHI (urban heated island); the wind funnel effect is found in the urban center area caused by the mountain terrain. The UHI center with the maximum intensity reaching 6.9 ℃ is located in the Dalian Development Zone, appeared at 19:30 on 3 July, 2015. The simulation results are compared with the data from two weather stations and the field observation, it is found that the variation tendency of them is consistent. The accuracy of the surface temperature field is better than that of the wind field. The maximum bias of temperature is −3.10 ℃, the minimum is 0.08 ℃; the maximum mean bias of temperature is 0.88 ℃, the minimum is 0.52 ℃; the maximum RSME of temperature is 1.23 ℃, the minimum is 0.63 ℃. For a large-scale urban climate simulation, the deviation is within the acceptable range. The correspondent UHI moderation strategies for urban planning are also analyzed.

Key words: WRF/UCM; urban climate; numerical simulation; Dalian