文章编号：1000-8608(2019)04-0372-07

城市化进程对热环境影响的 WRF/UCM 评估方法

张弘驰，唐　建，郭　飞*

（大连理工大学 建筑与艺术学院，辽宁 大连　116024）

摘要： 建立了一种评估总规尺度城市规划布局对热环境影响的高精度模拟方法.实现了高精度土地利用、地形等数据向WRF静态数据场的转化，并确立了所需的物理方案和UCM城市参数.以大连连续晴朗天气2015-08-09—2015-08-14为例，进行了100 m的高分辨率模拟，模拟结果与气象站观测值吻合较好.以1993年和2020年的两种土地利用和规划资料进行了WRF模型对比试验，结果表明自1993年以来，随着城市扩张，城市温度不断升高，平均风速下降.城市总体升温幅度为0.56 ℃，甘井子区、金普新区等地区温度上升最明显，在1.0～1.5 ℃.温度上升幅度超过1 ℃的地区占城市总面积的12.6%.中山区、西岗区、沙河口区等城市建成区的温度升高范围较小，介于0.3～0.8 ℃.金普新区风速下降最明显，下降平均值为0.62 m·s^{-1}；中山区、西岗区、沙河口区的城市扩张与1993年相比并不明显，但受到周边影响，风速也有所下降.

关键词： WRF/UCM；城市气候；数值模拟；城市化

中图分类号： P423.3　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201904007

0　引　言

由于城市化导致的城市人口增长、城市规模扩张、建筑高度和密度增大、通风不良、自然下垫面面积减少和人工热大量排放等，城市与郊区平均温差不断扩大，城市中心区域易产生城市热岛现象[1].随着全球气候变暖不断加剧，城市热岛协同高温热浪不仅影响城市的热舒适，导致死亡率增加[2-3]，尤其在夏季，还会引起空调等电器的大规模使用，导致电力大量消耗并排放更多大气污染物，威胁呼吸道的健康[4-5].国外许多城市的成功经验表明，城市规划与城市气候评估相结合能够有效缓解城市气候恶化和污染问题.

大连是辽东半岛最南端的一个典型沿海山地城市，东邻黄海、西邻渤海，属于海洋性温暖带季风气候.大连统计局统计数据显示，过去60余年大连城区面积从50 km^2(1950年)逐渐扩大到396 km^2(2017年).按照大连城市规划，2020年人口将从目前的669万增长为710万左右，中心城区建设用地将持续扩张.研究表明，自1951年以来，大连年均气温增加0.034 5 ℃，年均风速下降0.035 7 m·s^{-1}，热岛效应有所增强[6].

城市气候是一种特殊的气候类型，既受大气环流、地形地貌、海陆格局等较大范围因素影响，又为人类活动、用地布局、建筑形态等自身特征所塑造.目前从事城市气候规划的难点就在于如何获取高分辨率、科学可靠的气候数据和数值模拟工具，来自中尺度气象学领域的WRF/UCM(Weather Research and Forecast，天气预报和气象研究/Urban Canopy Model，城市冠层模型)恰好能够较好地满足这一要求.本文研究目的在于建立一种评估城市土地利用变化和城市化进程对气候和热环境影响的方法，提供高分辨率、具有可信度的城市气候场数据，为城市发展和规划提供基础数据和依据.

1　模拟区域参数设置

首先利用WRF/UCM对大连城市现状2015-08-09—2015-08-14共5个连续晴朗天气进行100 m精度的数值试验(以下简称test0)，将结

收稿日期： 2019-02-18；　**修回日期：** 2019-05-28.
基金项目： 国家社科基金资助项目(18BGL233).
作者简介： 张弘驰(1990-)，男，博士生，E-mail：zhanghc1130@mail.dlut.edu.cn；郭　飞*(1980-)，男，博士，教授，E-mail：guofei@dlut.edu.cn.

果与气象站实测数据进行对比，验证模型的准确性. 接着利用与 test0 相同的物理模型设置，但是两种不同的城市用地数据情景进行对比试验，一是大规模城市化之前（1993 年，以下简称 test1993）；二是大连市总体规划（2020 年，以下简称 test2020）. 自 1993 年开始，大连城市的发展向东北部逐步扩张，农田和林业用地急剧减少，大部分农田与牧场变为城市建设用地，贫瘠的植被区被开发成农田，由于城市的扩张和土地利用的高度集中，在城市中心区，高层建筑和高人口密度的形态特征与复杂地形形成了犬牙交错的形态[7].

模拟区域设置为多层嵌套网格. 多层嵌套网格的内层分辨率高，能够提高核心区域的模拟精度并分析出其特征；同时外层分辨率低、范围大，能够看到核心区域的背景场，充分考虑周边的气候影响并节约计算资源. 本次采用 4 层嵌套网格，各层格点数与间距分别为 99×99，6.4 km×6.4 km；100×100，1.6 km×1.6 km；152×136，0.4 km×0.4 km；224×224，0.1 km×0.1 km. 垂直方向设置 47 层，总高度 16 km（ptop=10 000）. 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连城市建成区（图 1）.

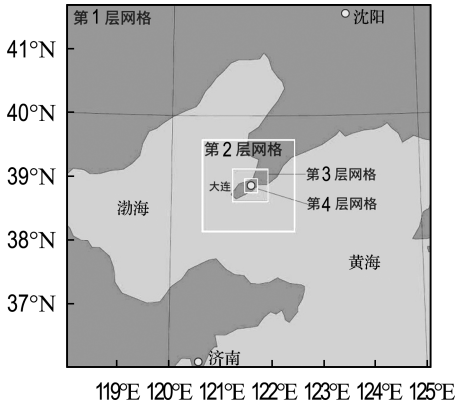


图 1　模拟区域嵌套网格设置

Fig. 1　Nesting grids setting of simulation area

驱动 WRF 模型的气象数据是美国 NCEP 的全球 3 h 的 0.25°×0.25°再分析气象资料，由于数据时空分辨率较高，适合用于高分辨率的城市气候模拟. 大连位处辽东半岛最南端，三面环海，气候受海洋强烈影响，因此模拟还采用了 0.5°×0.5°分辨率的海温数据作为模拟的初始条件. 模拟积分步长为 30、7.5、1.88 和 0.47 s. 本研究采用的物理模型方案如表 1 所示.

表 1　WRF 物理模型

Tab. 1　WRF physical model

选项	模型
微物理	Thompson graupel scheme
长波辐射	RRTM 辐射传输模型
短波辐射	Goddard scheme 双速多波段短波方案
近地面层	Monin-Obukhov (Janjic Eta) 近似方案
陆地表面	Noah Land 表面模型
边界层	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) 湍流动能模型
城市冠层	Urban Canopy Model

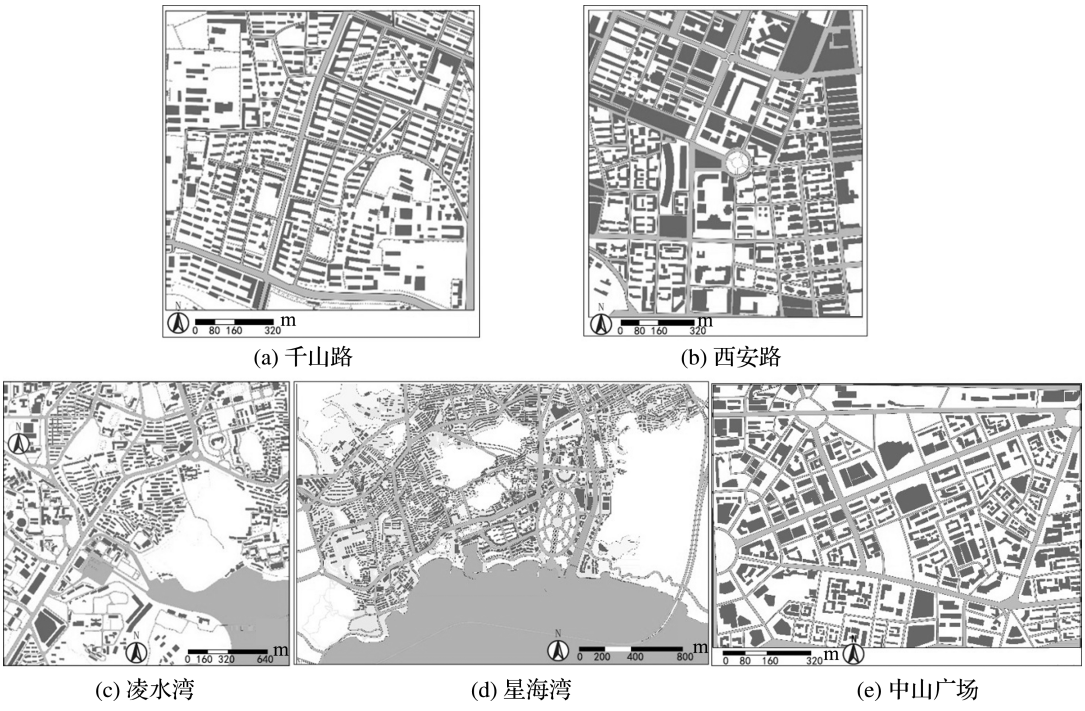
UCM 模型允许研究者设置的城市形态参数有 20 项，本文选取了重要的城市形态参数进行设置（表 2）. 准确地设置这些城市形态参数是反映某个城市自身特征、成功进行模拟的重要条件. 但是由于城市和建筑的分布是一个非常不均匀的状态，要想完全获取所有城市信息具有较大的困难. 本研究获取了大连 5 个典型城市区域的三维信息图，对其形态参数进行了计算. 以这 5 个区域的平均值作为 UCM 的城市形态参数（图 2）. 墙体和屋面的导热系数则根据建筑节能规范的规定计算得出，路面的导热系数根据大连地区常见的路面做法计算得出.

表 2　UCM 城市参数设置

Tab. 2　UCM urban categories setting

城市参数	参数值
建筑高度/m	26.69
建筑宽度/m	12.3
道路宽度/m	11.78
人为热/(W·m^{-2})	14.69
屋顶热容/(J·m^{-3}·K^{-1})	2.30×10^{6}
建筑墙面热容/(J·m^{-3}·K^{-1})	1.25×10^{6}
道路热容/(J·m^{-3}·K^{-1})	1.93×10^{6}
屋面导热系数/(J·m^{-1}·s^{-1}·K^{-1})	0.157 5
建筑墙面导热系数/(J·m^{-1}·s^{-1}·K^{-1})	0.21
道路导热系数/(J·m^{-1}·s^{-1}·K^{-1})	0.699

由于工业生产、交通、采暖和空调的使用等人为活动会产生大量的废热，这些热量会对城市局地的气温、辐射和空气质量造成显著的影响. 许多研究表明人为热也是造成城市热岛现象的重要成因之一. 但是人为热的准确计算需要分别统计工业、交通和建筑部门的能耗，再按照城市面积折算成地面热通量值，并且还要考虑其在时空上的不规律分布. 由于这些信息获取较为困难，本研究利用每万元 GDP 能耗来计算城市总体能源消费，再折合到城市总用地面积中，得到大连城市平均人为热为 14.69 W·m^{-2}. 计算公式为



(a) 千山路 (b) 西安路

(c) 凌水湾 (d) 星海湾 (e) 中山广场

图 2 大连 5 个典型城市区域

Fig. 2 Five typical urban districts in Dalian

$$E=E_G G_t \times 10^{-4}/(S\times 365\times 24\times 3\ 600) \quad (1)$$

式中：E_G 是大连地区每万元 GDP 能耗，G_t 为 GDP，S 为城市总用地面积.

2 模拟期间背景天气

由于城市热岛易在静稳天气下形成，更适合 WRF/UCM 的模拟效果，选取大连最热月份 8 月，受高气压控制的高温、晴朗的静稳天气，即北京时间 2015-08-09T8:00 至 2015-08-14T8:00，共 120 h 作为研究的时段. 为了对比验证模型设置和物理方案的有效性，在中山区和高新区进行了现场固定观测，并获取了中山国际交换站(以下简称中山站)的逐时观测结果(表 3). 观测结果显示，模拟时段内大连区域风速 0～7 m·s^{-1}，温度 23～33 ℃(图 3).

表 3 中山站观测数据

Tab. 3 The observed data of Zhongshan weather station

日期	气温范围/℃	平均气温/℃	风向	风速/(m·s^{-1})
2015-08-09	24.0～30.0	26.3	SE	1～7
2015-08-10	24.0～30.7	26.8	SW	1～6
2015-08-11	23.0～31.0	27.0	NW	0～5
2015-08-12	24.0～32.0	27.5	NW	0～5
2015-08-13	25.0～33.0	28.4	SE	1～7

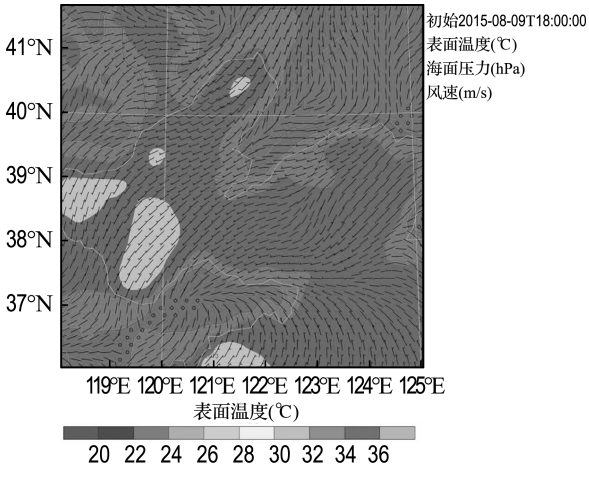


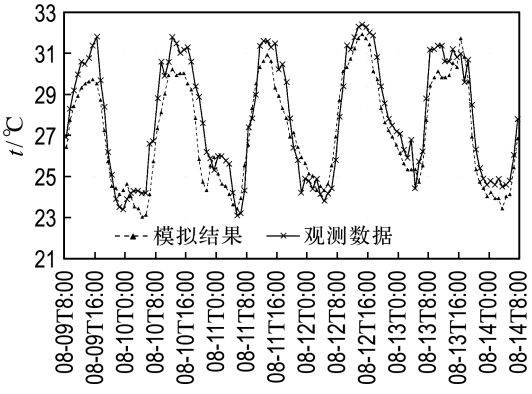
图 3 模拟时段大连风速和温度气象图

Fig. 3 Meteorological diagram of wind speed and temperature of the simulation period in Dalian

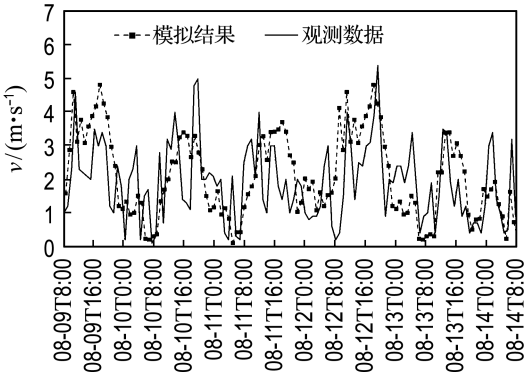
3 模拟结果验证

为了验证 WRF 模型模拟结果的准确性，需要将 WRF 模型所得 test0 结果数据与气象站观测数据进行对比分析. 结果表明，温度场观测值与模拟值最大误差 3.36 ℃，最小误差 0 ℃，平均误差 1.00～1.07 ℃，标准误差 1.13～1.34 ℃. 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，最大偏差 4.25 m·s^{-1}，最小偏差

0.01 m·s^{-1}，平均偏差 1.07～1.08 m·s^{-1}，均方根误差在 1.23～1.50 m·s^{-1}. 可以发现模拟结果与观测数据之间的变化趋势基本一致，且温度场的吻合程度优于风场(图 4). 风速模拟结果(图 4(b))表明，大连市风速呈现一定的日周期变化规律. 风速一般在日间较高，11:00～16:00 达峰值，最大值达到 3～5 m·s^{-1}. 风速在日落后迅速降低，19:00～次日 6:00 风速为 0～2 m·s^{-1}.



(a) 温度对比图



(b) 风速对比图

图 4　test0 模拟结果与气象站观测数据对比

Fig. 4　Comparison of test0 simulated results with measured data of the weather station

4　试验结果

4.1　城市热岛强度

城市热岛强度一般指的是城市与郊区之间的温度差. 其有两种计算方法：一是将所有城市用地修改为农林用地进行模拟，对比两种情景的温度差；二是分别计算城市用地和所有郊区的平均温度，计算两者之间的温度差. 本文采用第 2 种计算方法，将城市不同用地的温度求平均值以进行分析(其中郊区温度为城市之外其他所有陆地温度的平均值). 同时计算了模拟区域内所有海面的温度平均值，并与城市用地的温度进行了比较.

温度变化的结果(图 5)显示，陆地气温一般于 8:00～9:00 迅速升高，此时各种土地类型之间的温差最小. 最高气温一般出现在当地时间 17:00～18:00，其中 17:00 最为常见. 模拟期间气温最高值 30.3 ℃出现在 2015-08-12T17:00. 气温一般于 17:00 开始缓慢降低，日最低值出现在次日 6:00～7:00. 在 4 个案例中的最低值为 25.9 ℃，出现在 2015-08-10T7:00. 从模拟期陆地上不同用地类型温度场的对比可以看出，日间气温高低的排序是城市、农田、郊区和森林. 农田和森林之间也存在温度差异，并且日间差异大于夜间. 海面温度尽管变化较小，但也存在 24 h 为周期的日变化，日夜温差幅度在 0.91～1.58 ℃. 一般日间最高气温出现在 17:00～19:00，其中 17:00 最为常见；最低温度出现在 3:00. 海面温度不仅比陆地低，升温的速度和幅度也低于陆地，因此从海面来的海风对陆地及城市的降温效果十分明显.

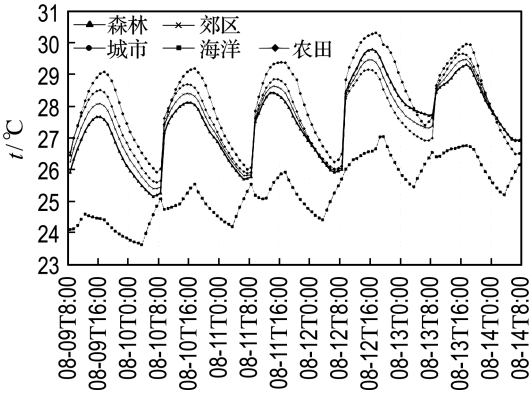


图 5　不同用地类型表面温度

Fig. 5　The surface temperature of different land use

城市热岛强度的变化趋势(图 6)显示，模拟期间为 2015-08-09—2015-08-14，城市一直存在热岛效应，热岛强度的平均值为 0.62 ℃. 最高值为 1.3 ℃，出现在 2015-08-12T21:00；最低值为 0.03 ℃，出现在 2015-08-14T0:00. 1 d 中城市热岛强度最高值一般出现在 19:00～22:00，其中 20:00 最为常见. 热岛强度最低值一般出现在每日的 6:00～9:00，此时陆地迅速升温，各种下垫面之间的温差较小. 城市和海洋之间的温差远大于城市和郊区之间的温差. 两者温差的最大值达到 4.7 ℃，最小值 0.34 ℃，平均值 2.82 ℃. 城市-海洋温差最小值一般出现在 8:00，最大值一般发生在午后. 与城市和郊区温差相比，相对没有那么规律，5 d

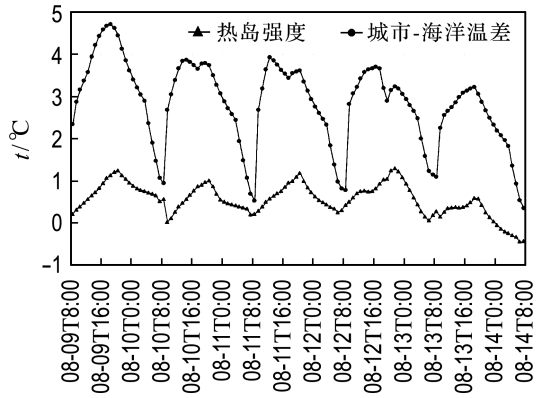


图 6 城市热岛强度

Fig. 6 Urban heat island intensity

依次发生在 18:00、14:00、12:00、16:00 和 18:00.

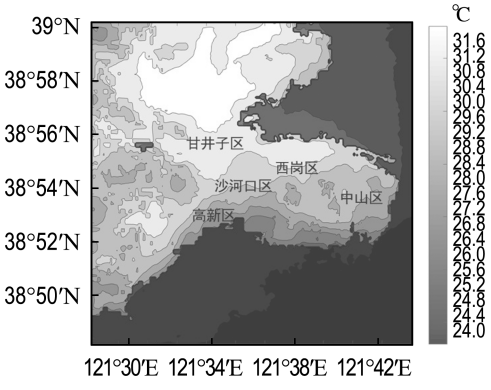
为了研究城市热岛分布的空间变化，分别计算了 5 d 日间(8:00～18:00)气温和夜间(20:00～次日 6:00)气温平均值，并绘制成图(图 7). 日间平均温度图(图 7(a))显示，城市热岛呈现多核状分布. 其中最大的中心位于城区北部甘井子区一带，平均气温超过 30 ℃. 城区东部中山区和西南部高新区也存在两个次级中心. 沿海陆地受到海洋影响温度较低，尤以黄海沿岸的陆地最显著，温度比周边地区降低 1 ℃左右. 陆地受影响最明显的范围大致在沿海 1～4 km.

夜间平均温度图(图 7(b))显示，城市整体气温较日间降低，城市高温的范围大幅缩小. 但由于郊区夜间降温幅度更大，城市和郊区的温差加大，城市热岛强度比白天更强烈. 甘井子区一带的城市热岛中心气温尽管有所降低，但是热岛的范围基本未发生较大的变化. 山体由于海拔高、绿化较好，温度无论日间还是夜间都显著低于城市建成区，对城市热岛起到了分割和缓解的作用. 大连湾海面受到中山区和西岗区的影响，气温比周边的海面高 0.5 ℃左右.

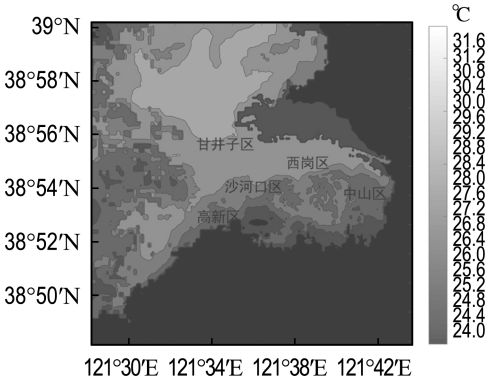
4.2 温度场

本文以温度场、风场为例，将两种情景的 WRF 模型模拟结果相减(test2020－test1993)，d03 为第 3 层模拟网格，d04 为第 4 层模拟网格，可直观地分析出城市化对气候和热环境的影响.

自 1993 年以来，随着城市向北扩张，城市温度不断升高. 如图 8 所示，城市区域温度明显升



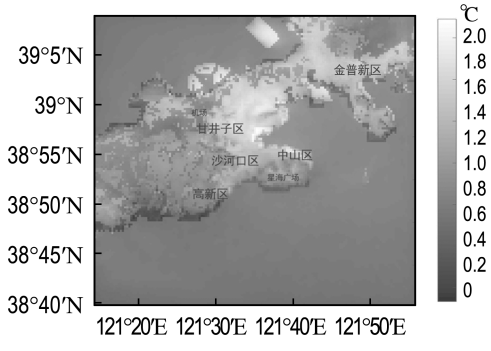
(a) 日间平均温度图



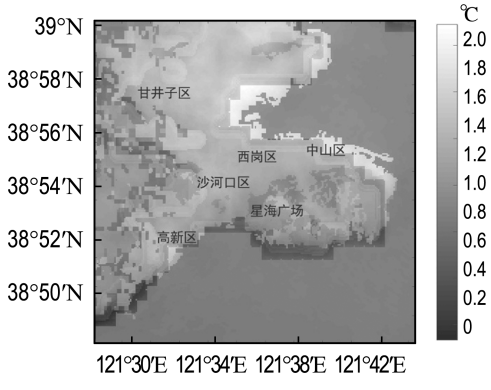
(b) 夜间平均温度图

图 7 温度场平均值

Fig. 7 Mean temperature field



(a) test2020－test1993, d03



(b) test2020－test1993, d04

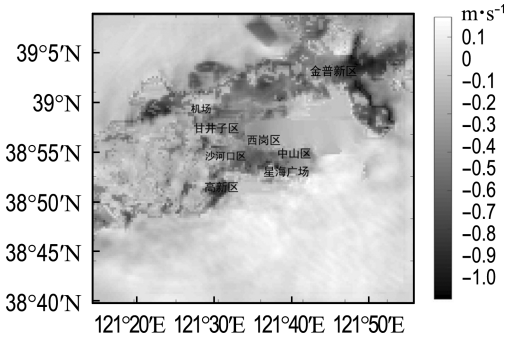
图 8 海拔 2 m 高温度场差值

Fig. 8 Temperature field difference at 2 m above sea level

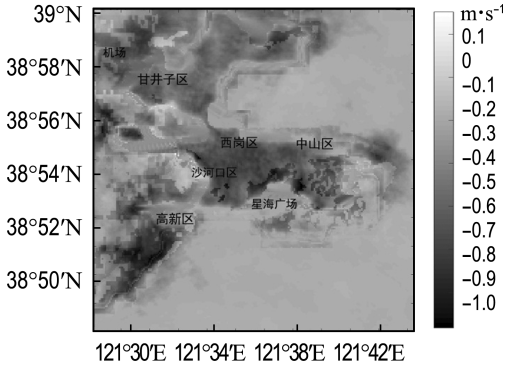
高，甘井子区、金普新区等地区在 2 m 高度的温度明显增加，升高幅度在 1.0～1.5 ℃. 城市总体平均升温幅度为 0.56 ℃. 温度上升幅度超过 1 ℃的区域占总面积的 12.6%. 如图 8(b)所示，原来已经是城市的区域变化幅度较小，如中山区、西岗区、沙河口区等，温度升高幅度介于 0.3～0.8 ℃. 城市区域总体平均气温上升幅度为 0.48 ℃. 温度升高超过 1 ℃的地区占总面积的 9.6%. 由于大连湾沿岸海域以前的海岸线和地貌变化明显，温度升高幅度在 1.0～1.5 ℃.

4.3 风　场

随着城市化进程加快，平均风速总体呈下降趋势. 如图 9(a)，总体平均风速下降了 0.48 m·s^{-1}. 金普新区风速下降最明显，平均值达 0.62 m·s^{-1}. 虽然中山区、西岗区、沙河口区的城市扩张与 1993 年相比并不明显，但受到周边的影响风速也有所下降. d04 的平均风速下降 0.33 m·s^{-1}.



(a) test2020－test1993，d03



(b) test2020－test1993，d04

图 9　海拔 10 m 高风场差值

Fig. 9　Wind speed field difference at 10 m above sea level

5　结　语

城市规模扩张引起的城市下垫面生物物理学属性改变，城市低反照率、低蒸散量加剧白天城市热岛强度，夜间城市建筑物和空调系统热排放增强夜间城市热岛强度[8-9]，均会导致城市温度不断升高，城市区域平均风速逐年降低，城市热岛效应越发明显. 本文研究的结果表明，城市热岛强度最高值一般出现在 19:00～22:00，其中 20:00 最为常见，平均值为 0.62 ℃. 城市化进程影响较大的区域在大连市北部甘井子区、金普新区等处. 自 1993 年以来城市气温升高幅度平均值为 0.56 ℃，城市平均风速下降了 0.48 m·s^{-1}.

本文所提出的方法，可为总规和详规尺度评估城市规划用地布局和规划指标的气候效应的需求提供一种思路和工具. 未来仍需通过 GIS 平台等工具，将城市气候定量评估数据与规划实践更加紧密结合起来. 城市规划结合城市气候评估的研究与实践已有所进展，例如设置城市通风廊道. 城市通风廊道有利于风的流通，一定的风速能够显著减弱热岛效应、促进污染物扩散、改善城市热舒适度[10-11]. 其次在城市中心区域增设水体、绿化植被，减少建设密度等，对缓减热岛效应也有显著的效果.

最新研究发现，城市形态对降低污染物浓度及加速污染物扩散均有着重要的作用[12-13]. 因此，想要达到标本兼治的目的，政府决策者与城市规划师们需要进行更深入的研究和长期的坚持.

参考文献：

[1] OKE T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations [J]. **International Journal of Climatology**, 1981, **1**(3):237-254.

[2] 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.

[3] GASPARRINI A, GUO Yuming, HASHIZUME M, *et al*. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study [J]. **The Lancet**, 2015, **386**(9991):369-375.

[4] WONG N H, JUSUF S K, TAN C L. Integrated urban microclimate assessment method as a sustainable urban development and urban design tool [J]. **Landscape and Urban Planning**, 2011, **100**(4):386-389.

[5] FALLMANN J, FORKEL R, EMEIS S. Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality [J]. **Atmospheric Environment**, 2016, **125**(A):199-211.

[6] GUO Fei, ZHANG Hongchi, FAN Yue, *et al*. Detection and evaluation of a ventilation path in a mountainous city for a sea breeze: The case of Dalian [J]. **Building and Environment**, 2018, **145**: 177-195.

[7] 郭 飞,金 云. 高密度城区调查与数值模拟研究——改善行人风环境的策略 [C] // 2017 城市发展与规划论文集. 北京: 中国城市出版社, 2017:1-4.
GUO Fei, JIN Yun. Investigation and numerical study on a high density district: Strategies to improve pedestrian level wind environments [C] // **The 2017 Conference on Urban Development and Planning**. Beijing: China City Press, 2017:1-4. (in Chinese)

[8] TAHA H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat [J]. **Energy and Buildings**, 1997, **25**(2): 99-103.

[9] OLESON K W, BONAN G B, FEDDEMA J, *et al*. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities [J]. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 2008, **47**(4):1038-1060.

[10] 黄柏良. 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, 2011.
HUANG Bailiang. Urban ventilation and its impact on urban heat island and air quality [D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)

[11] 郭 飞,张鹤子. 可持续城市总体通风规划策略 [J]. 城市发展研究, 2014, **21**(S2):1-4.
GUO Fei, ZHANG Hezi. Sustainable urban overall ventilation planning strategy [J]. **Urban Development Studies**, 2014, **21**(S2): 1-4. (in Chinese)

[12] SHI Yuan. Mapping the air pollution in high-density urban environments of Hong Kong for environmental urban planning and design using land use regression approach [D]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong, 2016.

[13] 郭 飞,张鹤子,刘术国. 基于风热环境的高密度城市形态优化——以大连中山区为例 [C] // 2014 全国建筑热工与节能学术会议论文集. 昆明:《云南建筑》杂志社, 2014: 188-192.
GUO Fei, ZHANG Hezi, LIU Shuguo. High density urban morphology optimization based on wind and heat environment: a case study of Zhongshan district, Dalian [C] // **The 2014 National Academic Conference on Building Envelope and Energy Saving**. Kunming: Periodical Office of Yunnan Architecture, 2014: 188-192. (in Chinese)

Evaluation method of impact of urbanization on thermal environment based on WRF / UCM

ZHANG Hongchi, TANG Jian, GUO Fei*

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

Abstract: A high-precision simulation method is established to evaluate the impact of urban master planning layout on thermal environment. The process of transforming high-precision land use and terrain data into WRF static data field is achieved, and the required physical scheme and UCM urban categories are established. A 100 m finer high resolution simulation is conducted for 5 consecutive days (August 9, 2015 - August 14, 2015) in Dalian, the simulation results are in good agreement with the observation data of the weather station. Two types of land use and planning information in 1993 and 2020 are compared by WRF model. The results show that since 1993, with the urban expansion, the city temperature increases continuously and the average wind speed decreases. The average temperature increases 0.56 ℃ in urban constructed area. The temperatures of Ganjingzi District and Jinpu New District are evidently increased with the range between 1.0 ℃ and 1.5 ℃. The urban area with a temperature increase range above 1 ℃ accounts for 12.6% of the total area. The temperature increase range of urbanized areas formerly, such as Zhongshan District, Xigang District and Shahekou District, is smaller (between 0.3 ℃ and 0.8 ℃). The wind speed shows a significant downward trend in Jinpu New District, and the average value declines 0.62 $m \cdot s^{-1}$. Although the urban expansions of Zhongshan District, Xigang District and Shahekou District are not evident compared with that in 1993, the wind speed also drops as a result of the surrounding influences.

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