

# 人为热排放对不同类型建成区温度影响的模拟研究

曹 崢<sup>1,2</sup>, 吴志峰<sup>3\*</sup>, 马文军<sup>4</sup>

(1. 广州地球化学研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广州大学地理科学学院, 广州 510006; 4. 广东省疾病预防控制中心广东省公共卫生研究院, 广州 511430)

**摘 要:**为探究不同类型建成区能源消耗与城市热环境特征的关系, 本文利用中尺度天气预报模式(Weather Research & Forecasting, WRF)对2010年7月2日-7月6日发生在广州地区的一次高温热浪过程进行数值模拟试验, 定量分析了逐日平均气温及逐日气温日较差对人为热排放的时空敏感性。结果表明:①WRF模型能够较好地实现2010年7月2日-7月6日高温热浪期间气温的模拟, 模拟结果与气象观测结果的相关系数均大于0.80, 均方根误差均小于2.27;②逐日平均气温空间分布特征为:高密度住宅区>商业区>低密度住宅区;逐日气温日较差空间分布特征为:低密度住宅区>高密度住宅区>商业区;③人为热排放使得3种类型建成区平均气温升高, 且人为热的增温效应与高密度住宅区、低密度住宅区及商业区的建筑密度的空间关联度分别为0.17、0.13和0.16;④人为热排放使得三种类型建成区的气温日较差降低, 且气温日较差减少程度与高密度住宅区、低密度住宅区及商业区建筑密度的空间关联度分别为0.14、0.15及0.19;⑤当人为热排放为正常排放的两倍时, 人为热的增温效应、人为热对气温日较差的减小作用与不同类型建成区的建筑密度空间关联度均有增强趋势。

**关键词:**人为热排放; 建成区类型; 高温热浪过程; 数值模拟; WRF模型; 地理探测器

## 1 引言

IPCC第五次评估报告指出, 全球气温升高已成为无可争议的事实, 且近30年是全球气温升高最为明显的时期(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014)。城市区域由于城市化过程的影响已成为全球升温最为明显的热点之一(Li et al, 2013; Wu et al, 2013)。现有研究表明城市区域增温的2个主要要素为城市化过程及人为热排放(曲建升等, 2003; 蒙伟光等, 2010; 麦健华等, 2011; 崔耀平等, 2015; 李烜等, 2015; 李元征等, 2016; 方迎波等, 2017)。不同于城市化过程, 人为热排放是促使气温升高的一种内在能量源, 是指由于工业生产、

汽车排放、人体新陈代谢、空调使用等排放出的多余热量, 这种能量直接被排放到大气中, 通过影响城市能量平衡、水汽交换等最终影响城市气温(张弛等, 2011)。最早针对人为热增温效应的研究多是基于污染排放清单(Lee, Song et al, 2009; Lee, Mckeen et al, 2014; Koralegedara et al, 2016), 此方法假定人为热排放在城市内部平均分布, 且无季节性差异, 利用自上而下或自下而上的方法, 根据工业排放、汽车保有量、生活消耗等数据计算人为热排放的平均量。随着遥感技术的发展, 美国陆地资源卫星(Landsat)、夜间灯光数据(DMSP-OLS)也被应用于人为热排放或人为热导致的城市热岛效应研究(Kato et al, 2005; Peng et al, 2016)。但由于人为热

收稿日期: 2017-07-04; 修订日期: 2017-10-13。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671430, 41701204); 广东省自然科学基金项目(2016A030310266)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671430, No.41701204; Natural Science Foundation of Guangdong Province, China, No.2016A030310266]。

作者简介: 曹崢(1989-), 男, 山东济南人, 博士生, 主要从事城市生态与人居环境研究, E-mail: jnczdl@163.com。

通讯作者: 吴志峰(1969-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 教授, 博导, 主要从事城市生态与人居环境研究, E-mail: gzuwzf@163.com。

引用格式: 曹崢, 吴志峰, 马文军. 2018. 人为热排放对不同类型建成区温度影响的模拟研究[J]. 地理科学进展, 37(4): 515-524. [Cao Z, Wu Z F, Ma W J. 2018. Effect of anthropogenic heat release on temperature in different types of built-up land in Guangzhou, China[J]. Progress in Geography, 37(4): 515-524.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.04.007

的精确排放量非常难以估算,因此准确地评估人为热排放对于气温升高的贡献率存在困难。21世纪以来,随着计算机运算能力及数值模拟理论的发展,中尺度气候模型如MM5(Mesoscale Model 5, MM5)耦合了较为精准的人为热排放量及日排放曲线,使得定量评估人为热排放对气温升高的贡献率成为可能(Fan et al, 2005; Lee, Song et al, 2009)。WRF(Weather Research & Forecasting, WRF)模型作为新一代中尺度天气预报模型,最初应用于城市天气要素业务预报,随着其参数多样化、空间分辨率高的特点被众多学者认可,近年来越来越多应用于城市气候特征变化及其影响因素研究,并且WRF模型对人为热的局地增温效应模拟精度较高(Feng et al, 2012; 陶玮等, 2014; 郑玉兰等, 2017)。现有研究分析表明,人为热排放具有局地增温效应且此效应具有时空差异性,夏冬两季增温效应强于春秋两季,城市大于郊区;人为热排放的减少能有效地减轻城市热岛效应。

现有的研究区域均为城市群或单个城市,其研究的时间尺度通常将一年作为基本单位(Block et al, 2004; Narumi et al, 2009; Pigeon et al, 2007),而对于短时间尺度城市内部区域特别是人口稠密区人为热的增温效应研究较为缺乏,但短时间内人为热的增温效应对人类生产生活及人体健康的影响更为明显(Heaviside et al, 2016),并且城市内部小尺度人为热增温效应研究对于合理的城市规划及公共资源配置也具有指导意义。为探究精细空间尺度内人为热排放的短期影响效应,本文将利用WRF/UCM模型对2010年7月2-6日广州市的一次高温热浪进行数值模拟试验,通过有无人热排放及2倍人为热排放的敏感性试验探讨人为热排放增温效应的空间差异,并利用地理探测器揭示人为热与不同建成区类型密度之间的空间关联。

## 2 研究数据与试验设计

### 2.1 研究数据

#### 2.1.1 人为热排放量估算

本文考虑3种人为热排放源:工业排放、交通排放、生活排放,假定3种排放平均分布于城市建成区内,且无季节性差异(王志铭等, 2011)。采用能源清单法(陆燕等, 2014; 王建鹏等, 2015),利用广州市汽车保有量、年均行驶里程、生活消费的能源总量等

数据(广州市2011年统计年鉴),按照Kimura等(1991)及车汶蔚(2010)研究中对日排放比率的分配结果,估算出广州市各时段内人为热排放通量及比率变化曲线,并替代WRF模型中旧的逐小时人为热排放比率(图1)。新排放因子为工业排放、交通排放及生活排放的综合分类结果,9-16时为人为热高排放阶段,0-5时为低排放阶段。广州市人为热日排放通量全天平均为 $42\text{W/m}^2$ ,最大值为 $73\text{W/m}^2$ ,出现在10时。此人为热估算结果与王志铭等(2001)计算的2009年广州市人为热排放量相比仅增长0.9%,并与人为热排放的逐年增长趋势相一致。

#### 2.1.2 土地利用/覆被数据

广州市土地利用/覆被数据来自于清华大学制作的Globaland30-2010数据集(<http://www.global-landcover.com>)。该数据利用30 m多光谱影像,包括美国陆地资源卫星(Landsat) TM5、ETM+多光谱影像和中国环境减灾卫星(HJ-1)多光谱影像进行土地利用/覆被类型分类。数据分类类型包括10大类,分别为:耕地、森林、草地、灌木丛、水体、湿地、苔原、人造覆被、裸地、冰川与永久积雪。Globaland 30数据的总体精度达到60%以上。广州市主城区建筑密度数据来自广东省地理国情监测与综合分析工程技术研究中心,包括住宅区(高密度、低密度)和商业区。研究中将所有数据的空间分辨率均重采样为500 m。土地利用数据分类见表1。

#### 2.1.3 气象观测数据

广州市中心城区2010年7月2-6日21个自动站点气象数据来自于广东省气候中心(图1),主要气象要素包含逐小时风速、逐小时正点气温、逐小时累计降雨量、逐小时正点相对湿度及逐小时正点气压。

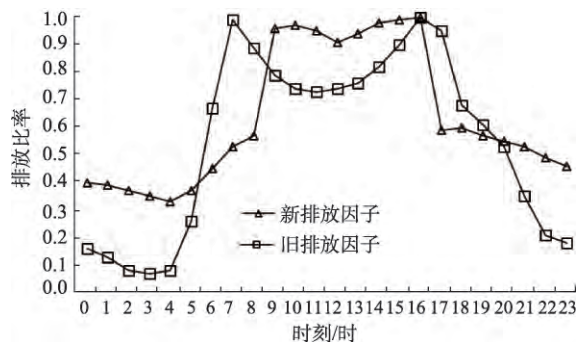


图1 人为热排放日变化曲线更新

Fig. 1 Modified diurnal profile of anthropogenic heat release

表1 土地利用数据简介  
Tab.1 Summary of land use/cover data

| 数据名称        | 数据分类    |                                   | 分辨率/m |
|-------------|---------|-----------------------------------|-------|
|             | 一级类     | 二级类                               |       |
| Globaland30 | 耕地      | 水田、旱地、菜地、雨养旱地、牧草种植地等              | 30    |
|             | 森林      | 落叶阔叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、混交林       |       |
|             | 草地      | 草原、草甸、稀树草原、荒漠草原、人工草地              |       |
|             | 灌木地     | 山地灌丛、落叶灌丛、常绿灌丛、荒漠灌丛               |       |
|             | 湿地      | 内陆沼泽、湖泊沼泽、河流洪泛湿地、森林/灌木湿地、泥潭沼泽、红树林 |       |
|             | 水体      | 江河、湖泊、水库、坑塘                       |       |
|             | 苔原      | 灌丛苔原、禾本苔原、湿苔原、高寒苔原、裸地苔原           |       |
|             | 人造地表    | 居民地、工矿、交通设施                       |       |
|             | 裸地      | 荒漠、沙地、砾石地、裸岩、盐碱地                  |       |
|             | 冰川/永久积雪 | 永久积雪、冰川、极地冰盖                      |       |
|             |         |                                   |       |
| 广州市中心城区     | 居住地     | 高密度住宅区、低密度住宅区                     | 500   |
| 建筑密度数据      | 商业用地    |                                   |       |

2.2 模拟试验设计

2.2.1 研究区域概况

研究区域位于广州市中心城区,涉及荔湾区、越秀区、海珠区、天河区及黄浦区,介于113.17°E~113.56°E、23.03°N~23.24°N之间,总面积为467.75 km<sup>2</sup>,总人口为380.2万(2010人口普查数据)。主要用地类型包括居民居住地、商业用地、草地及林地等。研究区2010年能源消耗量为4 024 805 kW·h,占广州市能源消耗总量的50.3%,较高的能源消耗使得此地区成为人为热排放“热点区域”。

2.2.2 试验设计

数值模拟采用WRF 3.5版本,使用三重1:3嵌套,中心经纬度为113.37°E、23.13°N,网格数分别为124×157、124×157、130×175,对应的网格分辨率为9 km (Domain1)、3 km (Domain2)、1 km (Domain3)(图2)。模拟时间为北京时间2010年6月30日8时0分0秒–2010年7月8日4时0分0秒,其中前40小时为模式spin-up。初始气象边界条件为1°×1°的fml再分析资料,此数据空间分辨率为1°,时间分辨率为6 h。模式选用的物理参数方案为:Lin微物理过程,Goddard短波辐射方案,rrtm长波辐射方案,MYJ边界层条件,Noah陆面过程方案和UCM城市冠层方案,最外层(Domain1)土地利用/覆被数据为模式自带的30 s分辨率数据,最内层(Domain3)土地利用/覆被数据为Globaland 30数据。

为探究人为热及城市化对热浪期间气温的影响,本文在第三重嵌套区域设计了3个敏感试验。试验A第三重嵌套即Domain 03不引入人为热排

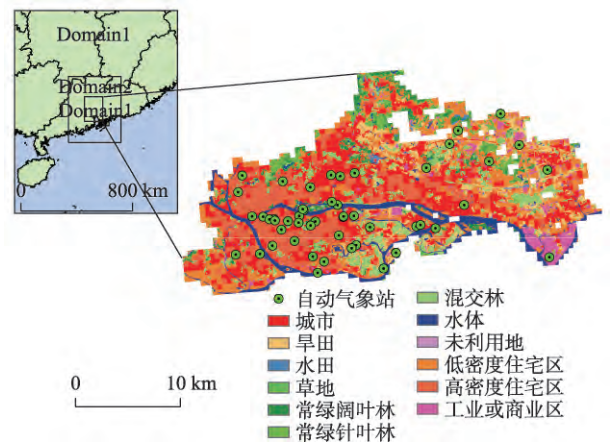


图2 研究区域土地利用类型及自动站点空间分布图

Fig.2 Land use/cover type and spatial distribution of automatic meteorological stations in the study area

放,试验B引入真实人为热排放,试验C人为热排放为试验B的2倍;通过对比3次试验,能得出人为热排放对高温热浪期间气温的影响。

2.2.3 模拟结果验证

利用偏差(Bias)、相关系数(R)及均方根误差(RMSE)对模拟结果进行检验,各指标计算公式如下:

$$Bias = X_{exp} - X_{ms} \tag{1}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{21} (X_{ims} - \overline{X_{ms}})(X_{iexp} - \overline{X_{exp}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{21} (X_{exp} - \overline{X_{ms}})^2 \cdot \sum_{i=1}^{21} (X_{iexp} - \overline{X_{exp}})^2}} \tag{2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{exp} - X_{ms})^2}{n_{ms}}} \tag{3}$$



式中:  $X_{\text{exp}}$  表示以观测站点为圆心, 100 m 为半径的缓冲区内平均模拟气温值;  $X_{\text{ms}}$  为气象站点气温逐日值;  $\overline{X_{\text{ms}}}$  为模拟时段内气象站点气温平均值;  $X_{\text{exp}}$  为  $i$  站点模拟气温值;  $\overline{X_{\text{exp}}}$  为模拟时段内模拟气温平均值;  $n_{\text{ms}}$  为气象站点数量;  $i$  为站点数。

### 2.2.4 地理探测器

地理探测器用于评估 2 种地理环境要素的空间异质性联系。其基本原理为: 若要素  $Y$  与要素  $X$  的空间异质性特征一致, 则认为两者存在空间关联。可利用式(4)进行计算:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式中:  $h=1, \dots, L$  为变量  $Y$  或因因子  $X$  的分层; 即分类或分区;  $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区的  $Y$  值的方差;  $q$  度量的是因子  $X$  多大程度上解释属性  $Y$  的空间分异(王劲峰等, 2017)。

## 3 结果与分析

### 3.1 模式模拟结果评价

$X_{\text{exp}}$  与  $X_{\text{ms}}$  对比表明, 模拟结果存在冷偏差, 即模拟温度小于真实温度值。5 天的气温模拟结果与真实观测数据相关系数均达到 0.80 以上, 均方根误差均小于 2.27。为进一步检验 WRF 模型对不同类型建成区气温的模拟能力, 本文挑选了主城区内自动气象站进行进一步检验, 结果显示不同建成区模拟气温与自动监测站数据的相关系数高于 0.8, 均方根误差小于 2.27。以上结果表明: 模拟结果无论是在时间尺度还是针对不同建成区类型都与观测结果具有较高的一致性(表 2)。

表 2 气温模拟结果验证

Tab.2 Validation of the simulated temperature at 2 meter height

|                | Bias/°C | R    | RMSE |
|----------------|---------|------|------|
| 7月2日           | -0.36   | 0.81 | 2.22 |
| 7月3日           | -0.25   | 0.85 | 2.20 |
| 7月4日           | -0.29   | 0.82 | 2.27 |
| 7月5日           | -0.22   | 0.88 | 2.16 |
| 7月6日           | -0.15   | 0.89 | 2.13 |
| 高密度住宅区(7月2-6日) | -0.17   | 0.91 | 2.01 |
| 低密度住宅区(7月2-6日) | -0.20   | 0.87 | 2.10 |
| 商业区(7月2-6日)    | -0.26   | 0.80 | 2.25 |

\*高密度住宅区、低密度住宅区及商业区的 Bias、R、RMSE 为 7 月 2-6 日的平均值。

### 3.2 不同类型建成区逐日气温特征时空特征

本文选取了逐日平均气温及逐日气温日较差 2 个气象要素来分析不同类型建成区气象特征的时空分布特征。

#### 3.2.1 不同类型建成区逐日平均气温时空特征

不同类型建成区逐日平均气温呈现先升高后下降的趋势, 这可能与热浪强度趋势一致。高密度住宅区逐日平均气温最大, 高密度住宅区与另外 2 种类型最大温差达到 0.57 °C(高密度住宅区—低密度住宅区)、0.50 °C(高密度住宅区—商业区); 商业区的逐日平均气温略高于低密度住宅区, 两者最大温差为 0.10 °C(图 3)。这种现象的产生可能与建筑物密度相关。Correa 等(2012)与 Huang 等(2015)的研究指出, 高密度住宅区及商业区由于其建筑密度大, 导致其通风廊道较短, 从而使得风场的降温作用被减弱; 同时由于建筑密度较高, 使得此类型区域的植被覆盖度较低, 进一步减弱了植被的降温作用。

7 月 2-6 日逐日气温平均值介于 32.09~31.08 °C 之间(图 4)。高温区位于荔湾区东北部、越秀区海珠区西部以及天河区西部, 此区域的平均气温为 31.94 °C; 天河区东部、海珠区东部及黄浦区为低温区, 此区域的平均气温为 31.22 °C。气温与不同类型建成区类型叠加效果显示, 高温区与高密度住宅区空间分布较为一致, 低温区主要位于商业区与低密度住宅区。

#### 3.2.2 不同类型建成区逐日气温日较差差异

不同类型建成区逐日气温日较差呈现先降低后上升最后下降的趋势。低密度住宅区的逐日气温日较差最大, 区域内最大值为 9.12 °C, 出现在 7 月 5 日, 最小值为 8.02 °C, 出现在 7 月 3 日; 高密度住宅区逐日气温日较差次之, 最大值为 8.67 °C, 出现在 7 月 5 日, 最小值为 7.22 °C, 出现在 7 月 3 日; 商业区的气温日较差最小, 最大值为 7.99 °C, 同样出现在 7 月

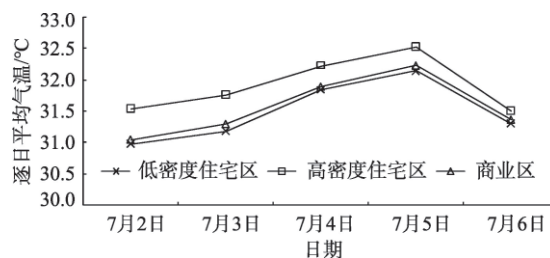


图 3 不同类型建成区逐日平均气温变化图

Fig.3 Daily average temperature in different types of built-up land

5日,最小值为6.89℃,出现在7月2日。不同类型建成区气温日较差的差异性可能与其所处区域的城市不透水面强度有关。Hinkel等(2003)对阿拉斯加巴罗地区的研究表明,伴随着城市不透水面面积的增加,气温日较差有减小的趋势。而高密度住宅区、商业区下垫面类型多为不透水面,不透水面具有储热能力强的特征,可在白天将太阳辐射进行存储,在夜间进行释放使得夜间气温较高;同时,此过程使得高密度住宅区、商业区昼夜温差较小(图5)。

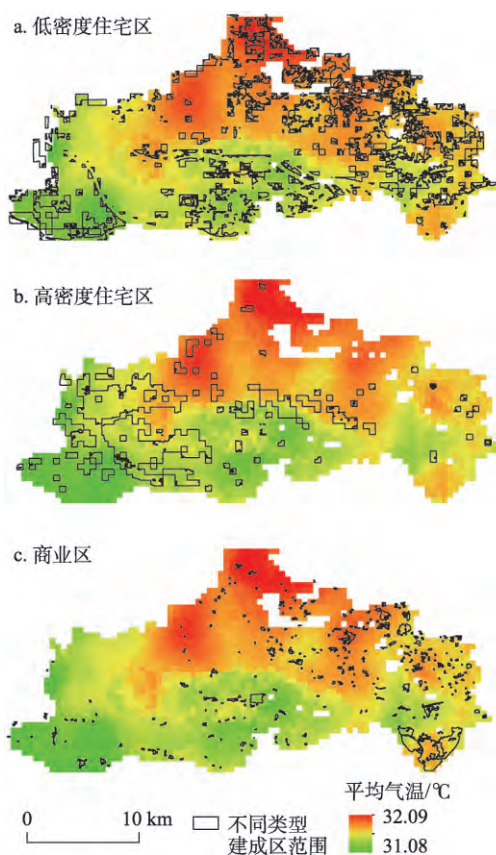


图4 不同类型建成区逐日平均气温空间分布图  
Fig.4 Spatial distribution of daily average temperature in different types of built-up land

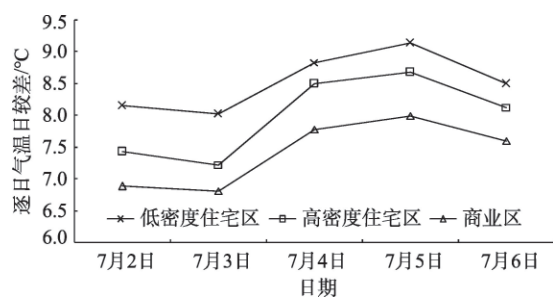


图5 不同类型建成区逐日平均气温变化图  
Fig.5 Daily diurnal temperature range in different types of built-up land

7月2-6日平均气温日较差介于7.00~7.74℃之间(图6)。气温日较差高值区位于荔湾区西南部、天河区北部及东北部、黄浦区西北部,此区域日较差平均值为7.59℃;气温日较差低值区位于荔湾区西北部、海珠区北部、天河区南部、黄浦区西南及东南部,此区域平均气温日较差为7.20℃。气温日较差与不同类型建成区数据叠合显示,气温日较差高值区与低密度住宅区空间重合度高,气温日较差低值区域则主要位于高密度住宅区与商业区内。

### 3.3 不同建成区人为热排放对逐日气温要素的影响

#### 3.3.1 对逐日平均气温的影响

图7为人为热在低密度住宅区、高密度住宅区及商业区的增温作用。结果表明,人为热增温效应在研究时段内呈现缓慢减小的趋势,这可能与热浪过程减弱相关;人为热排放在不同类型建成区均有增温作用,且高密度住宅区(0.19℃)与商业区(0.32℃)的增温效应最为明显,低密度住宅区(0.18℃)增温效应较弱;当人为热排放量翻倍时,其增温效应在不同类型建成区更为明显,增幅表现为高密度住宅区

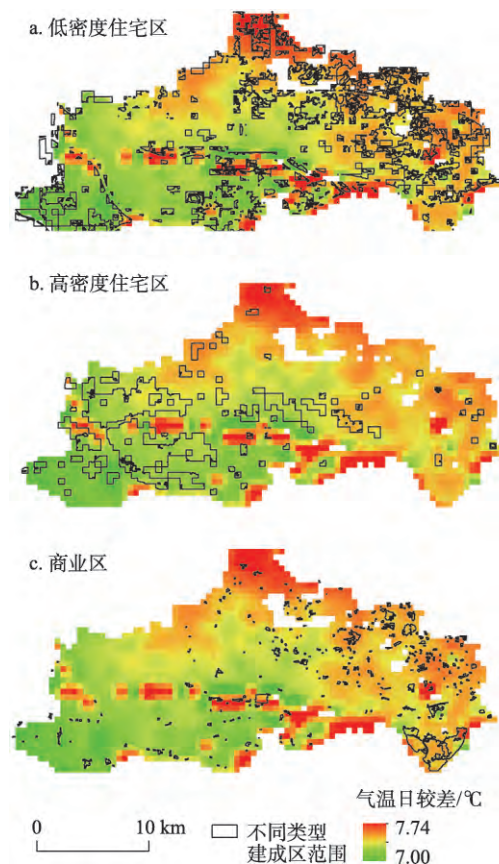


图6 不同类型建成区气温日较差空间分布图  
Fig.6 Spatial distribution of temperature range in different types of built-up land



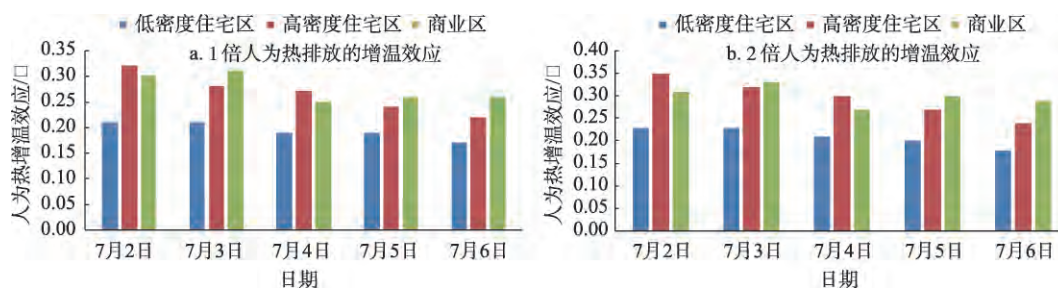


图7 不同类型建成区人为热增温效应对逐日气温影响

Fig.7 The impact of temperature rising caused by anthropogenic heat release on daily mean temperature in different types of built-up land

(0.03℃)>商业区(0.02℃)>低密度住宅区(0.01℃)。

利用地理探测器分析不同建成区建筑物密度对于人为热增温效应的空间解释度(表3),结果表明:人为热增温效应与不同建成区建筑密度存在空间关联,且表现为高密度住宅区(0.17)>商业区(0.16)>低密度住宅区(0.13);伴随着人为热排放量的翻倍,人为热增温效应与建筑物密度的空间关联度均增强,增幅呈现为高密度住宅区(0.04)>商业区(0.03)>低密度住宅区(0.02)。上述现象表明不同类型建成区人为热的增温效应可能与建筑物的类型相关。Strømman-Andersen等(2011)的研究表明,适当降低

建筑密度将有助于缓解城市热环境。其研究认为,在夏季时建筑密度增大时,虽然楼体间遮阳作用使得制冷设备使用率下降,但照明设备的使用率却大幅度增加,使得城市温度大幅度上升。

### 3.3.2 对逐日气温日较差的影响

人为热排放对不同类型建成区气温日较差的影响分析表明(图8),人为热排放对气温日较差有减弱作用,且减弱作用表现为商业区(0.27℃)>高密度住宅区(0.26℃)>低密度住宅区(0.19℃);热浪期间人为热排放对气温日较差的减弱作用呈现先升高后减弱的趋势;当人为热排放量增加时,其对气温日较差的减弱作用也增强,增幅表现为高密度住宅区(0.03℃)>商业区(0.02℃)>低密度住宅区(0.01℃)。

利用地理探测器分析不同建成区建筑物密度对于人为热造成的气温日较差减小幅度的空间解释度(表4),结果表明,人为热造成的气温日较差减弱幅度与不同建成区建筑密度存在空间关联,且表现为商业区(0.19)>低密度住宅区(0.15)>高密度住宅区(0.14);伴随着人为热排放量的翻倍,人为热造成的气温日较差减弱程度与建筑物密度的空间关联度均增强,增幅呈现为商业区(0.04)>高密度住宅区(0.02)>低密度住宅区(0.01)。此现象表明人为热

表3 人为热增温效应与不同类型建成区建筑密度的空间关系

Tab.3 Spatial association between temperature rising caused by anthropogenic heat release and building density in different types of built-up land

| 建成区类型       | 高密度住宅区 | 低密度住宅区 | 商业区    |
|-------------|--------|--------|--------|
| 1倍人为热增温效应q值 | 0.17** | 0.13** | 0.16** |
| 2倍人为热增温效应q值 | 0.21** | 0.15** | 0.19** |
| q值增幅        | 0.04   | 0.02   | 0.03   |

注\*\*表示  $P < 0.05$ 。

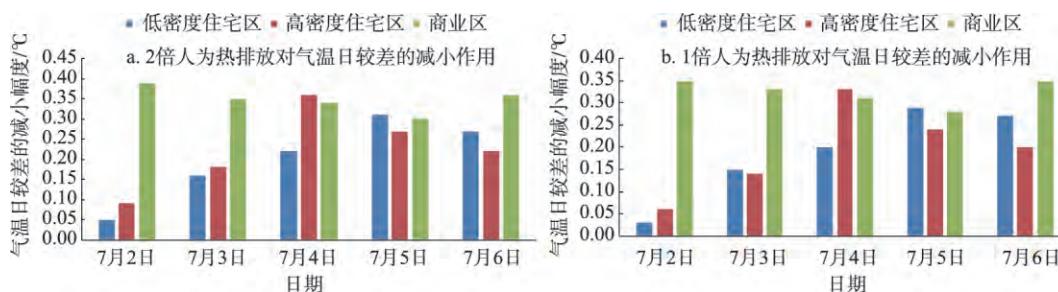


图8 不同类型建成区人为热排放对气温日较差的减小作用

Fig.8 The impact of anthropogenic heat release on daily temperature range in different types of built-up land

表4 气温日较差减弱程度与不同类型建成区  
建筑密度的空间关系

Tab.4 Spatial association between daily temperature  
range decreasing caused be anthropogenic heat release  
and building density in different types of built-up land

| 建成区类型             | 高密度住宅区 | 低密度住宅区 | 商业区    |
|-------------------|--------|--------|--------|
| 1 倍人为热增<br>温效应q 值 | 0.14** | 0.15** | 0.19** |
| 2 倍人为热增<br>温效应q 值 | 0.16** | 0.16** | 0.23** |
| q 值增幅             | 0.02   | 0.01   | 0.04   |

注\*\*表示  $P<0.05$ 。

排放对气温日较差的影响与建筑物密度存在关联。Yang 等(2015)的研究表明,建筑物密度增加时逐日最高气温会有所增强。其原因可能是太阳辐射被道路、墙体多次反射,而这个反射过程导致墙体对太阳辐射的吸收能力增强,进而增强了逐日最高气温,逐日最高气温的升高又使气温日较差增大。

4 结论与讨论

本文利用WRF模型对广州市主城区2010年7月2-6日的一次热浪过程进行了模拟,并通过情景模拟的方法测定了不同类型建成区平均气温及气温日较差对于人为热排放的敏感性。结果表明:研究时段内广州市主城区逐日平均气温商业区>高密度住宅区>低密度住宅区,此结果与Guo等(2015)对广州市主城区不同密度建筑热环境研究结论相似(即高层高密度区域处于高温区域)。这种现象的出现可能与其地表覆被类型相关(Weng et al, 2007)。首先,在高密度住宅区、商业区地表覆盖基本为不透水面,由于其具有比热小的热力特性,因此造成其升温快的特点,最终导致此地区成为高温区域;其次,此类型区域植被覆盖度较低,Giridharan 等(2008)的研究表明,当研究区域有低植被覆被时,其温度可比高植被覆盖地区高0.5~1℃,这可能是由于此类地区地表反照率较小,白天不能够将大部分的太阳辐射反射到大气层,而在夜晚地表长波辐射又不能轻易穿透,进一步使得此地区温度升高。

逐日气温日较差在空间上表现为:低密度住宅区>高密度住宅区>商业区。此结论与吴风波等(2015)对长江三角洲地区城市化的局地气候效应研究结论相似。后者研究结果表明,伴随着城市化过程,大面积不透水面产生,其将导致气温日较差的

减小,而这种现象产生的可能原因为:不透水面的增加会导致白天和夜间的气温均呈现升高的趋势,但在夜间最低气温上升更为明显,这主要是由于不透水面能的热力性质,导致其显热通量减小。

人为热排放的作用主要有2个:增强逐日平均气温、减小逐日气温日较差。这与Chen等(2009)、Wang等(2015)的研究结果一致。根据Oke(1988)在1988年提出的城市能量平衡公式,太阳的短波辐射是城市区域主要的能量来源,地表除去存储的能量外将大部分能量以长波辐射的形式反射到大气中,但人为热的加入将使地表多出一部分额外的能量来源,因此产生了人为热的增温效应。逐日气温日较差减小则是由于,在白天以短波辐射为主,而人为热排放量远远小于短波辐射,因此人为热排放量对白天的气温影响较小;但在夜晚太阳短波辐射消失,以长波辐射为主,但长波辐射的能量与人为热排放量基本相当,因此当加入人为热时,夜间气温升高,最终导致气温日较差缩小。此外,地理探测器结果表明,人为热的增温效应和人为热排放对气温日较差的减小作用均与建成区密度有空间关联,但这种关联并不明显,可能是因为城市热环境并非单由人为热排放这一个因素所决定,也可能与植被覆盖、水体面积、大气环流等其他因素相关。不同与现有研究,本文着重对不同类型建成区的人为热敏感性进行探讨,结果表明,人为热增温作用表现为:商业区>高密度住宅区>低密度住宅区;人为热对逐日气温日较差减弱作用表现为:商业区>高密度住宅区>低密度住宅区。这种现象出现的可能原因与模式控制城市冠层参数变量有直接关系。UCM城市观测中对气温模拟会产生影响的参数包括人为热日排峰值、楼体高度、楼顶宽度、楼顶反照率、楼体热容量等(Kusaka et al, 2012)。以人为热日排放峰值为例,商业区的日排放峰值为90 W/m<sup>2</sup>,高密度住宅区为50 W/m<sup>2</sup>,低密度住宅区仅20 W/m<sup>2</sup>。虽然上述2种类型建成区每日人为热排放曲线一致,但每日人为热排放总量相差明显(商业区与高密度城区人为热排放相差610 W/m<sup>2</sup>,高密度住宅区与低密度住宅区相差475.5 W/m<sup>2</sup>),由此导致了2种类型的建成区人为热敏感性差异较大。

本文也存在一定的不足:所采用的UCM参数除人为热日排放曲线外,其余均为默认值,可能会使模拟结果与真实情景存在一定的偏差;其次,本文的关注重点为夏季,但冬季人为热排放更为明

显,其对气温的影响有待进一步探索。

## 参考文献(References)

- 车汶蔚. 2010. 珠江三角洲高时空分辨率机动车污染排放清单开发及控制对策研究[D]. 广州: 华南理工大学. [Che W W. 2010. A highly resolved mobile source emission inventory in the Pearl River Delta and assessment of motor vehicle pollution control strategies[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology.]
- 崔耀平, 刘纪远, 张学珍, 等. 2015. 京津唐城市群土地利用变化的区域增温效应模拟[J]. 生态学报, 35(4): 993-1003. [Cui Y P, Liu J Y, Zhang X Z, et al. 2015. Modeling urban sprawl effects on regional warming in Beijing-Tianjing-Tangshan urban agglomeration[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(4): 993-1003.]
- 方迎波, 占文凤, 黄帆, 等. 2017. 长三角城市群表面城市热岛日内逐时变化规律[J]. 地球科学进展, 32(2): 187-198. [Fang Y B, Zhan W F, Huang F, et al. 2017. Hourly variation of surface urban heat island over the Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Advances in Earth Science, 32(2): 187-198.]
- 李焜, 束炯, 谈建国, 等. 2015. 基于土地利用和人为热修正的城市夏季高温数值试验[J]. 热带气象学报, 31(3): 364-373. [Li D, Shu J, Tan J G, et al. 2015. A numerical simulation experiment of an urban summer heat wave based on modified data of land-use and anthropogenic heat[J]. Journal of Tropical Meteorology, 31(3): 364-373.]
- 李元征, 尹科, 周宏轩, 等. 2016. 基于遥感监测的城市热岛研究进展[J]. 地理科学进展, 35(9): 1062-1074. [Li Y Z, Yin K, Zhou H X, et al. 2016. Progress in urban heat island monitoring by remote sensing[J]. Progress in Geography, 35(9): 1062-1074.]
- 陆燕, 王勤耕, 翟一然, 等. 2014. 长江三角洲城市群人为热排放特征研究[J]. 中国环境科学, 34(2): 295-301. [Lu Y, Wang Q G, Zhai Y R, et al. 2014. Anthropogenic heat emissions in the Yangtze River Delta region[J]. China Environmental Science, 34(2): 295-301.]
- 麦健华, 罗乃兴, 赖文锋, 等. 2011. 城市化对珠江三角洲热岛效应影响的模拟[J]. 热带地理, 31(2): 187-192. [Mai J H, Luo N X, Lai W F, et al. 2011. A simulation about the impact of urbanization on the urban heat island in the Pearl River Delta region[J]. Tropical Geography, 31(2): 187-192.]
- 蒙伟光, 张艳霞, 李江南, 等. 2010. 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, 26(3): 273-282. [Meng W G, Zhang Y X, Li J N, et al. 2010. Application of WRF/UCM in the simulation of a heat wave event and urban heat island around Guangzhou City [J]. Journal of Tropical Meteorology, 26(3): 273-282.]
- 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 2003. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 18(6): 980-987. [Qu J S, Sun C Q, Zhang Z Q, et al. 2003. Trends and advances of the global change studies on carbon cycle[J]. Advances in Earth Sciences, 18(6): 980-987.]
- 陶玮, 刘峻峰, 陶澍. 2014. 城市化过程中下垫面改变对大气环境的影响[J]. 热带地理, 34(3): 283-292. [Tao W, Liu J F, Tao S. 2014. Effects of urban underlying surface change on ambient atmospheric environment[J]. Tropical Geography, 34(3): 283-292.]
- 王建鹏, 薛春芳, 黄少妮, 等. 2015. 城市化及人为热对西安市气象要素影响差异敏感性分析[J]. 干旱气象, 33(3): 434-443. [Wang J P, Xue C F, Huang S N, et al. 2015. Sensitivity test of impact of urbanization and anthropogenic heat on meteorological elements in Xi'an[J]. Journal of Arid Meteorology, 33(3): 434-443.]
- 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 72(1): 116-134. [Wang J F, Xu C D. 2017. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 116-134.]
- 王志铭, 王雪梅. 2011. 广州人为热初步估算及敏感性分析[J]. 气象科学, 31(4): 422-430. [Wang Z M, Wang X M. 2011. Estimation and sensitivity test of anthropogenic heat flux in Guangzhou[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 31(4): 422-430.]
- 吴风波, 汤剑平. 2015. 城市化对长江三角洲地区夏季降水、气温的影响[J]. 热带气象学报, 31(2): 255-263. [Wu F B, Tang J P. 2015. The impact of urbanization on summer precipitation and temperature in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Tropical Meteorology, 31(2): 255-263.]
- 张弛, 束炯, 陈珊珊. 2011. 城市人为热排放分类研究及其对气温的影响[J]. 长江流域资源与环境, 20(2): 232-238. [Zhang C, Shu J, Chen S S. 2011. Urban anthropogenic heat release categorizing and its effects on urban temperature[J]. Resource and Environment in the Yangtze Basin, 20(2): 232-238.]
- 郑玉兰, 苗世光, 包云轩, 等. 2017. 建筑物制冷系统人为热排放与气象环境的相互作用[J]. 高原气象, 36(2): 562-574. [Zheng Y L, Miao S G, Bao Y X, et al. 2017. Interaction of anthropogenic heat emission from building cooling system and meteorological environment[J]. Plateau Meteorology, 36(2): 562-574.]
- Block A, Keuler K, Schaller E. 2004. Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns[J]. Geophysical Research Letters, 31(12): 1570. [Block A, Keuler K, Schaller E. 2004. Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns[J]. Geophysical Research Letters, 31(12): 1570.]



- search Letters, 31(12): L12211.
- Chen Y, Jiang W M, Zhang N, et al. 2009. Numerical simulation of the anthropogenic heat effect on urban boundary layer structure[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 97 (1-2): 123-134.
- Correa E, Ruiz M A, Canton A, et al. 2012. Thermal comfort in forested urban canyons of low building density: An assessment for the city of Mendoza, Argentina[J]. *Building and Environment*, 58(58): 219-230.
- Fan H L, Sailor D J. 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two pbl schemes[J]. *Atmospheric Environment*, 39(1): 73-84.
- Feng J M, Wang Y L, Ma Z G, et al. 2012. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China[J]. *Journal of Climate*, 25 (20): 7187-7203.
- Giridharan R, Lau S S, Ganesan S, et al. 2008. Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence[J]. *Building and Environment*, 43(10): 1583-1595.
- Guo G H, Wu Z F, Xiao R B, et al. 2015. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters[J]. *Landscape and Urban Planning*, 135: 1-10.
- Heaviside C, Vardoulakis S, Cai X M. 2016. Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK[J]. *Environmental health*, 15(S1): S27.
- Hinkel K M, Nelson F E, Klene A E, et al. 2003. The urban heat island in winter at Barrow, Alaska[J]. *International Journal of Climatology*, 23(15): 1889-1905.
- Huang L H, Long E S, Ouyang J L. 2015. Measurement of the thermal environment in temporary settlements with high building density after 2008 Wenchuan earthquake in China [J]. *Procedia Engineering*, 121: 95-100.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014. Climate change 2014: Synthesis report[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kato S, Yamaguchi Y. 2005. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux[J]. *Remote Sensing of Environment*, 99(1-2): 44-54.
- Kimura F, Takahashi S. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment[J]. *Atmospheric Environment: Part B: Urban Atmosphere*, 25(2): 155-164.
- Koralegedara S B, Lin C Y, Sheng Y F, et al. 2016. Estimation of anthropogenic heat emissions in urban Taiwan and their spatial patterns[J]. *Environmental Pollution*, 215: 84-95.
- Kusaka H, Chen F, Tewari M, et al. 2012. 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 Series I*, 90B: 33-45.
- Lee S H, McKeen S A, Sailor D J. 2014. A regression approach for estimation of anthropogenic heat flux based on a bottom-up air pollutant emission database[J]. *Atmospheric Environment*, 95: 629-633.
- Lee S H, Song C K, Baik J J, et al. 2009. Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-In region of Korea [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(3-4): 291-303.
- Li Y, Zhu L J, Zhao X Y, et al. 2013. Urbanization impact on temperature change in China with emphasis on land cover change and human activity[J]. *Journal of Climate*, 26(22): 8765-8780.
- Narumi D, Kondo A, Shimoda Y. 2009. Effects of anthropogenic heat release upon the urban climate in a Japanese megacity[J]. *Environmental Research*, 109(4): 421-431.
- Peng J, Xie P, Liu Y X, et al. 2016. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 173: 145-155.
- Pigeon G, Legain D, Durand P, et al. 2007. Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France) [J]. *International Journal of Climatology*, 27(14): 1969-1981.
- Strømman-Andersen J, Sattrup P A. 2011. The urban canyon and building energy use: Urban density versus daylight and passive solar gains[J]. *Energy and Buildings*, 43(8): 2011-2020.
- Oke T R. 1988. The urban energy balance[J]. *Progress in Physical Geography*, 12(4): 471-508.
- Wang X M, Sun X G, Tang J P, et al. 2015. Urbanization-induced regional warming in Yangtze River Delta: Potential role of anthropogenic heat release[J]. *International Journal of Climatology*, 35(15): 4417-4430.
- Weng Q H, Liu H, Lu D S. 2007. Assessing the effects of land use and land cover patterns on thermal conditions using landscape metrics in city of Indianapolis, United States[J]. *Urban Ecosystems*, 10(2): 203-219.
- Wu K, Yang X Q. 2013. Urbanization and heterogeneous surface warming in eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(12): 1363-1373.

Yang X Y, Li Y G. 2015. The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and

street surface temperature[J]. Building and Environment, 90: 146-156.

## Effect of anthropogenic heat release on temperature in different types of built-up land in Guangzhou, China

CAO Zheng<sup>1,2</sup>, WU Zhifeng<sup>3\*</sup>, MA Wenjun<sup>4</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 4. Guangdong Provincial Institute of Public Health, Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou 511430, China)

**Abstract:** Along with the rapid urbanization process, large amounts of anthropogenic heat are released into the atmosphere, which are becoming a key issue for regional weather condition. To understand what role anthropogenic heat release plays in regional temperature warming, Weather Research & Forecasting (WRF) model was applied to simulate temperature during 2 - 6 July 2010 with different configuration of anthropogenic heat release. The results indicate that the simulated temperature is consistent with the meteorological station observation data, with the correlation coefficient of 0.89 and the root-mean-square error of 2.96. High density residential area had the highest daily average temperature followed by industrial or commercial zone and low density residential area. On the other hand, low density residential area had the highest daily diurnal temperature range followed by high density residential area and industrial or commercial zone. Anthropogenic heat release caused a notable warming in the whole downtown area of Guangzhou City, which was more significant in high density residential area and commercial zone than low density residential area. The spatial association between temperature rise caused by anthropogenic heat release and building density is 0.17 (high density residential area), 0.14 (low density residential area), and 0.16 (industrial or commercial zone), respectively. Conversely, anthropogenic heat release decreased diurnal temperature range (the difference between daily maximum temperature and daily minimum temperature), which was more significant in high density residential area and commercial zone than low density residential area. The spatial association between daily temperature range decrease caused by anthropogenic heat release and building density is 0.14 (high density residential area), 0.15 (low density residential area), and 0.19 (industrial or commercial zone). Furthermore, when doubling the anthropogenic heat release, the spatial association between building density and simulated temperature rise and daily temperature range decrease was enhanced.

**Key words:** anthropogenic heat release; different types of built-up land; heat waves; numerical simulation; WRF model; geographical detector