

北京城市空间形态对热岛分布影响研究

刘勇洪¹, 徐永明², 张方敏³, 舒文军⁴

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学应用气象学院 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/
江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 4. 北京市气候中心, 北京 100089)

摘要: 在城市尺度上探究城市空间形态布局对城市热岛(UHI)影响研究, 对于城市规划中通风环境改善、生态宜居城市建设具有重要意义。以北京为例, 利用2009—2018年高密度自动气象站逐小时气温资料和2018年NPP/VIIRS夜光卫星资料, 分析了UHI时空分布特征; 利用2017年1:2000基础地理信息和Landsat8卫星资料, 开展了北京主城区建筑高度(BH)、建筑密度(BD)、建筑高度标准差(BSD)、容积率(FAR)、迎风截面积指数(FAI)、粗糙度长度(RL)、天空开阔度(SVF)、城市分数维(FD)等8个空间形态参数和植被覆盖度(VC)、不透水盖度(IC)、反照率(AB)等3个陆表参数的提取, 并在城市尺度上开展了这些参数与UHI之间空间相关性以及对UHI变化影响研究。结果显示: 2009—2018年北京主城区年均、四季以及夜晚02时UHI均存在一个较为固定的形态, 年均、春、夏、秋、冬、白天14时和夜晚02时UHI分别为1.81℃、1.50℃、1.43℃、2.16℃、2.17℃、0.48℃和2.77℃; 8个空间形态参数在一年中大部分时段与UHI存在明显空间相关性, 这种相关性在冬季强于其他季节, 在夜晚02时强于白天14时, 排名前三的分别为SVF、FAR和BD。空间形态参数已超越陆表参数成为UHI变化的重要驱动因子, 11种参数对UHI变化的单独贡献为13.7%~63.7%, 其中夏季、冬季和全年时段贡献最大的空间形态参数分别是BD(43.7%)、SVF(63.7%)和SVF(45.4%), 贡献最大的陆表参数分别是VC(42.6%)、AB(57.1%)和VC(45.3%); 夏季、冬季和全年时段多个参数对UHI变化的综合贡献分别为51.4%、69.1%和55.3%, 主导要素分别为BD、SVF和BD。

关键词: UHI; 容积率; 建筑密度; 天空开阔度; 植被覆盖度; 反照率

DOI: 10.11821/dlxb202107007

1 引言

当前中国城市快速膨胀中许多不尽合理的规划和空间布局引起城市微气候条件的恶化(如热岛效应、大气污染、空气交换变弱等), 成为制约城市可持续发展的主要因素之一。而城市热环境与城市空间布局或城市形态之间存在密不可分的关系已经被确立^[1-5], 城市形态不但影响着城市人居环境舒适性^[6-8], 对城市能耗也有着不可忽视影响^[9-10]。由此, 如何优化城市形态促进热环境舒适性或者减缓城市热岛效应(UHI)已成为城市建设和规划中必需考虑的重要环境因素^[11-12]。

城市空间形态作为城市化气候效应的重要驱动因子, 进入21世纪以来其与城市气候的关系研究日趋受到重视, 其中“局地气候区(Local Climate Zone, LCZ)计划”的提出被认为是该领域研究的一项重要成果^[13], 它通过一系列几何形态参数和其他参数来定

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-12-22

基金项目: 北京市自然基金项目(8192020) [Foundation: Beijing Natural Science Foundation, No.8192020]

作者简介: 刘勇洪(1974-), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事城市气象与遥感应用。

E-mail: lyh7414@163.com

义LCZ类别从而研究城市气候^[14-17], 这些形态参数主要包括建筑密度 (Building Density, BD)、建筑高度 (Building Height, BH)、天空开阔度 (Sky View Factor, SVF)、街道高宽比 (Height Width Ratio, H/W)、地表粗糙度长度 (Roughness Length, RL) 等; 而另一项广受欢迎的城市气候应用研究“城市气候图”^[18-20]则把BD、BH、建筑体积密度 (类似于容积率Floor Area Ratio, FAR)、迎风截面积指数 (Frontal area Index, FAI) 和SVF作为主要的城市形态参数。除了在城市气候中应用, 城市空间形态参数也是数值天气预报中重要的输入参数, 构建高分辨率的城市空间形态参数对数值模式具有重要意义, 例如城市建筑形态因子 (如BH、建筑高度标准差 (Building Standard Deviation, BSD)、FAI、BD和SVF等) 的参数化对城市气温和热岛的数值模拟具有重要意义^[21], 在Weather Research Forecasting (WRF) /Urban模式中冠层参数化方案中引入高分辨率的BH、BD、FAR、BSD可以有效改善城市2 m高度气温预报性能^[22], 而在WRF/Urban模式中引入另一种空间形态参数—城市分数维 (Fractal Dimension, FD) 对气温和风场预报有所改善^[23]。

许多研究指出不同的城市形态参数对热环境时空分布影响有着明显差异, 如BH和H/W对天津冬季平均气温、最低气温和夜间气温有明显影响, 而对白天气温和最高气温则影响不大^[24]; 多层建筑容积率的增加有利于改善高纬度严寒地区冬季局地热舒适性^[25], 数值模拟表明FAR很可能是高密度城市地区UHI形成的决定性因子^[26], 而在FAR不变下更高的BD有利于上海夏季平均气温和辐射温度的下降^[3]。此外, SVF是湿热地区UHI形成的重要因素, SVF越小UHI的出现几率和强度越大^[27-29], 而与之不同的是对澳大利亚阿德莱德城市研究表明SVF与UHI在夜间呈负相关而在白天呈正相关^[30]。此外, 还有研究表明陆表参数与城市形态参数在很大程度上共同决定着热环境时空分布, 如数值模拟表明城市绿化率和FAR可以解释北京日最高地表温度94.47%~98.57%的变化^[11], 且绿化率是影响北京热环境的最显著指标; 对西安而言, BD及建筑布局方向可以解释城内气温变化的80%, 而绿化率则只能解释城市UHI变化的50%^[5]; 而城市形态类型对日间温度的影响很可能大于城市地表景观结构的影响^[2]。

城市形态参数对热环境的影响不但与时间尺度有关, 还与研究的尺度密切相关, 目前城市气候研究的尺度可以划分为3个尺度: 城市 and 区域中尺度、规模建筑群邻域局地尺度和街谷微观尺度^[31], 但目前对于城市空间形态对热环境的研究主要集中在后面两个尺度, 主要方法包括数值模拟和观测试验。其中, 数值模拟以中尺度气象模拟如WRF模式^[32-34]和街谷微观尺度的Envi-met模拟^[7, 35-36]为主。WRF中尺度气象模拟结果空间分辨率一般为1~3 km, 可在城市尺度上反映建筑物总体布局、山谷地形对城市背景热场和城市热岛的影响, 但还不能很好地反映建筑物对城市内部热场的精细化影响; Envi-met则可以较好地模拟街区内部5 m左右的精细化热场, 但模拟范围较小, 且在某些情景下并不能很好地模拟由于物理空间形态差异产生的小气候差异^[37]。观测实验一般限于城市街谷或局部区域, 它能更科学地评价区域内城市空间形态对精细化热环境影响^[38], 但受到数据点位过少或者研究区域范围有限等的限制, 应用代表性和通用性不强。

当前在城市和区域尺度上开展城市空间形态与热岛的关联研究较少, 而且不同空间形态因子对UHI分布的实际影响研究也并不多见, 主要原因是高分辨率的城市内部气温精细化数据和高分辨率空间形态参数难以获取。另外, 当前大多数研究基于局地或微观尺度下夏季天气条件下气象观测结合数值模拟等个例分析^[8, 11, 39], 或者是构建理想建筑形态参数模型进行热环境微观模拟^[3, 21, 26], 难以反映实际城市建筑空间形态对局地热环境长期的“平均”态影响, 本文拟引入重要城市空间形态参数 (BH、BD、FAR、BSD、

RL、FAI、SVF、FD)来描述城市空间形态,分析其与城区UHI变化的关联,为不同空间形态参数对热岛空间变化的影响开展定量分析。此外,还引入与UHI密切相关的重要陆表参数包括植被覆盖度^[11, 24]、不透水盖度^[5]、反照率^[34, 40]等以便比较主要城市空间形态参数与陆表参数对UHI的变化贡献大小,从而为城市规划与城市设计提供参考和依据。

2 研究区域与资料

2.1 研究区域简介

北京地处中国华北大平原北端,西、北、东三面环山(图1a),总面积为16410 km²,平原面积约占38%,属暖温带半湿润半干旱季风气候区,夏季炎热多雨,以偏南风为主导风;冬季寒冷干燥,以偏北为主导风。为了突出城市内部精细化的气象要素分布特征及城市的影响,本文的研究范围主要集中在北京主城区海拔100 m以下的平原地区,包括东城、西城、海淀、朝阳、丰台和石景山等6区,面积为1236.7 km²,研究区内大部分街区或乡镇为城镇用地所覆盖(图1b)。

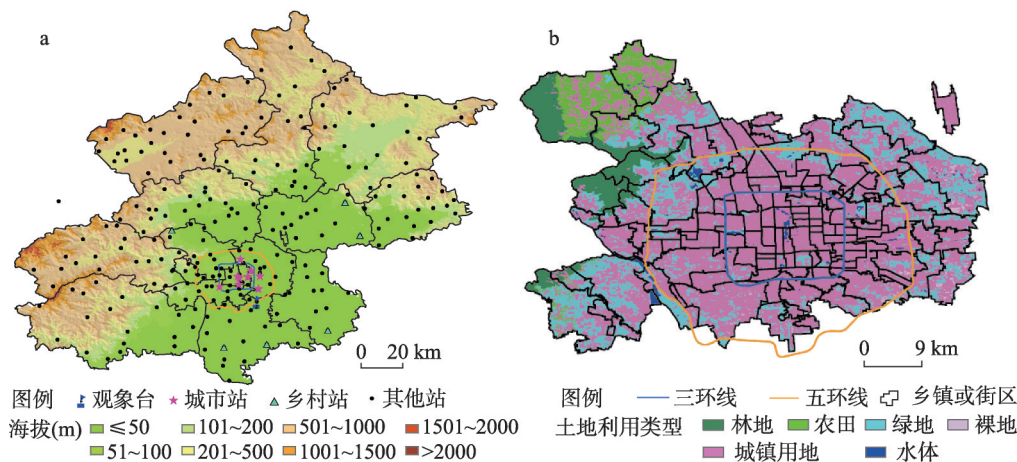


图1 研究区地形、代表性城市和乡村气象站及土地利用类型

Fig. 1 Topography, meteorological stations, and land-use types of different urban blocks in Beijing

2.2 数据

- (1) 气象资料:北京气象信息中心提供了北京地区2009—2018年293个区域气象自动站逐时气温资料,该资料已按文献中的方法^[41]经过了质量控制,在此基础上,进一步剔除了每年逐小时资料缺测率≥5%和观测年份少于6年的站点,最终得到2009—2018年北京地区256个有效气温气象观测站点;此外,北京气象信息中心中心还提供了观象台站(北京地区代表气象站,图1a)2017年逐月总太阳辐射、散射辐射和直接辐射值。
- (2) NPP/VIRRS卫星遥感资料:选用北京地区2018年500 m分辨率月合成NPP/VIRRS夜间灯光数据(<https://ngdc.noaa.gov/eog/download.html>),根据年平均夜间灯光亮度值提取几乎不受城市化影响的乡村农田背景区域。其中,在对NPP/VIRRS月合成数据进行年合成的过程中,为了消除突发性光源或者背景噪声等对NPP/VIRRS数据的影响,采用一种基于时间序列的滤波方法来消除月合成夜光序列中的突兀值^[42],将去除突兀值之后的剩余有效值进行平均得到年平均夜间灯光亮度数据。
- (3) Landsat8 OLI卫星遥感资料:北京地区2017年7月10日30 m分辨率晴空

Landsat8 OLI传感器数据, 来源于中国科学院遥感与数字地球研究所的“对地观测数据共享计划”, 主要用于不透水盖度、植被覆盖度和城市分数维估算。

(4) MCD43A3 卫星遥感资料: 北京地区2017年全年MODIS 500 m分辨率的逐日反照率产品MCD43A3 (V006版本), 提供短波波段黑空反照率和白空反照率产品, 来源于NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), 主要用于反照率估算。

(5) 基础地理信息资料: 由北京市测绘设计研究院提供的北京市2017年“居民地与建筑”数据, 主要用于城市空间形态参数提取。

(6) 其他资料: 北京地区90 m空间分辨率的数字高程影像 (DEM), 来源于美国国家航空航天局 (<http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>)。

3 研究方法

3.1 UHI计算

城市化气候效应是由代表城市和周边非城市气象站观测的长期气候趋势差来刻画, 而这个前提的一个重点要求就是“城”“乡”站点划分是合理的^[43-44]。在这里, 参考遥感观测法中的城市热岛乡村背景确定方法^[45], 依据以下3个指标来确定乡村气象站点: ① NPP/VIRRS年均夜间灯光值 $\leq 2.0 \times 10^{-9} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$; ② 土地利用类型为农田; ③ 站点海拔小于80 m且与研究区平均海拔差小于50 m, 且站点远离山区边缘1 km以上。城市气象站点则参考相关文献^[46]选择位于主城区的9个站点。经过上述处理, 可得到6个北京代表性乡村站点和9个代表性城市站点 (如图1和表1所示), 6个乡村代表站海拔高度为13~73 m, 平均海拔为37.0 m, 远离主城区边缘—五环线外20~49 km; 9个城市代表站海拔为35~52 m, 平均海拔为45.7 m, 分布于主城区中部区域。

基于大气温度观测的UHI可以称之为大气城市热岛或空气热岛^[47], 计算方法如下:

$$UHI = T_{urban} - T_{rural} \quad (1)$$

式中: UHI 为热岛强度 ($^{\circ}\text{C}$); T_{urban} 为城市站点平均气温值 ($^{\circ}\text{C}$); T_{rural} 为代表性远郊区站点平均气温值 ($^{\circ}\text{C}$)。

本文利用2009—2018年平均的UHI来反映北京主城区城市热岛状况, 未考虑期间主城区土地利用的变化导致的UHI时间变化, 主要是由于北京2008奥运会举办前, 北京主城区在2001—2007年期间开展了大规模的旧城改造, 2008年奥运会举办成功后, 主城区改造很少, 可以忽略2009—2018年北京主城区土地利用对UHI的变化影响。

为了确定UHI空间分布, 利用ARCGIS10.2软件中的“空间分析工具”模块中的“Spline”插值方法对北京256个气象自动站的气温值进行空间插值得到1 km空间分辨率的北京地区气温分布图, 然后经过裁剪和掩膜, 利用公式(1)计算得到北京主城区UHI分布图。

3.2 空间形态参数提取

3.2.1 建筑高度、密度和容积率 BH、BD、FAR、BSD是反映城市建筑空间形态的几个最重要参数。BH一般指研究区内所有建筑物的面积加权平均高度, BD指单位面积内建筑物平面投影所占面积百分比, FAR指一个小区的地上总建筑面积与用地面积的比率; 建筑高度标准差BSD指研究区建筑物高度的标准差, 反映建筑空间起伏程度。在这里利用北京地区六环区域内2017年建筑物位置及楼层信息, 按每层3 m估算建筑高度, 利用GIS空间分析技术和图像处理技术, 可估算500 m分辨率网格的BH、BD、FAR和BSD。

表 1 代表性乡村气象站点和城市气象站点信息
Tab. 1 Information of the representative rural and urban weather stations in Beijing

	站名	经度(°)	纬度(°)	海拔(m)
乡村站	凤凰岭	116.099	40.111	73
	永乐店	116.776	39.677	13
	庞各庄	116.325	39.603	25
	安定	116.511	39.616	24
	大孙各庄	116.915	40.087	35
	龙湾屯	116.851	40.231	52
城市站	天安门	116.391	39.9	52
	工人体育场	116.443	39.931	45
	奥体中心	116.397	39.982	48
	十八里店	116.475	39.853	37
	丽泽桥	116.306	39.862	48
	古观象台	116.428	39.905	48
	先农坛	116.389	39.872	49
	四惠桥	116.481	39.908	40
	南长街	116.384	39.907	49

3.2.2 地表粗糙度和迎风截面积指数 目前常用的RL计算方法分为2类：①气象观测方法，即利用通量塔或者气象台站的实测风速资料来计算RL；②形态学方法，即根据粗糙元的几何形状、分布密度等计算RL^[48-49]。文中采用城市形态学模型来估算^[50]，具体计算步骤参见文献[51]。采用该法时，主要输入参数包括建筑高度、建筑密度和迎风截面积指数（Frontal Area Index，FAI）。FAI是一个反映城市建筑风渗透性能的重要指标^[52]，计算方法参见文献[51]，输入参数包括建筑高度、建筑密度、风向方位数和风向频率等。

本文中风向方位数取值16，风向频率采用北京气象代表站观象台站最新的气候平均态30年（1981—2010年）16个方位风频值，来源于“国家气象科学数据中心”（<http://data.cma.cn/data/>）里的“中国地面累年月值数据集（1981—2010）”，可分别计算出年和四季的16个方位风频值，用于年和四季的RL和FAI估算。

3.2.3 天空开阔度 SVF是一个描述三维城市形态的数值，表达了城市空间的封闭程度。SVF的获取方法有多种，其中栅格计算模型更适宜于大范围、大数据量的城市天空开阔度的快速计算^[53]。在这里，采用基于高分辨率数字高程模型（DEM）的栅格计算模型估算SVF^[54]，具体计算步骤参见文献[51]，采用该法时，主要输入参数包括建筑物高度、方位角数目和影响半径。

本文利用估算得到的北京5 m空间分辨率的建筑物高度数据，以方位角数目 $n = 180$ （方位角间隔 2° ），影响半径 $R = 200\text{ m}$ （40栅格）计算城区5 m分辨率的SVF^[55]，结合建筑物位置信息，利用数字图像处理技术，可估算得到不同空间分辨率的中心城区行人高度SVF空间分布。

3.2.4 城市分数维 城市空间形态是由道路、建筑物、草地、树木、水面等组成的复杂几何体，具有“分形”特征，其复杂程度可以用分数维（FD）来描述，它可以有效刻画城市地表空间非均匀性度量，值越高，反映下垫面复杂性和非均匀程度越高^[23]，基于Landsat遥感影像估算FD具体计算步骤可参见文献[56]。本文选定北京2017年7月10日的Landsat8-OLI遥感影像中第5波段（近红外波段，标准差最大，影像信息最多）反射率影像，影像空间分辨率为30 m，估算得到的图像FD影像空间分辨率为500 m。

3.3 陆表参数信息提取

3.3.1 植被覆盖度与不透水盖度 在这里利用植被—不透水表面—土壤组分模型 (V-I-S 模型) [57] 进行估算, 即城市景观除了水体外, 主要由植被、不透水、土壤等 3 种典型景观组成, 城市景观像元 (不包括水体, 通常为混合像元) 反射率可以由植被、不透水、土壤等 3 种端元反射率的线性组合来表示, 利用线性光谱混合分解法即可得到逐像元植被端元面积比例 (VC) 和不透水面面积比例 (IC), 具体计算步骤可参见文献[58]。

本文利用北京 2017 年 7 月 10 日的 Landsat8-OLI 遥感影像 30 m 分辨率 1~7 波段, 利用上述方法估算 VC 与 IC, 然后利用均值重采样技术生成 500 m 分辨率 VC 与 IC 影像。

3.3.2 反照率 真实地表反照率 (Albedo, AB) 可采用下式计算[59]:

$$AB = (1 - S)AB_{bsa} + SAB_{wsa} \quad (2)$$

式中: S 为天空散射光所占总辐射比例; AB_{bsa} 和 AB_{wsa} 分别为黑空反照率与白空反照率。本文利用 2017 年北京观象台总辐射和散射辐射资料可计算得到 S , 根据 2017 年 MODIS 反照率产品 (MCD43A3) 中的短波黑空反照率与白空反照率计算得到 AB_{bsa} 和 AB_{wsa} , 最后生成 2017 年北京地区 500 m 分辨率的四个季节和年均 AB 。

3.4 分析方法

线性回归方法和皮尔逊相关系数用于分析城市空间形态参数、陆表参数与 UHI 年和季节以及白天和夜晚之间关系。季节划分为春季 (3—5 月)、夏 (6—8 月)、秋 (9—11 月)、冬 (上年 12 月—当年 2 月), 白天和夜晚分别以当地时 14 时与 02 时表征。

为了开展城市空间形态与陆表参数和 UHI 之间的关联研究, 在这里选用北京主城区 124 个街区空间单元进行空间统计分析 (图 1b), 剔除部分受地形影响的空间单元, 有 115 个空间单元参与分析, 其面积、周长、形状指数 (周长除以面积) 及平均值、最小值、最大值和标准差如表 2 所示。可以看出, 115 个空间单元样本面积为 1.18~50.10 km² (变异系数达 108%), 其中面积在 1.0~10.0 km² 之间的街区占了 77%; 周长为 4.57~46.09 km (变异系数达 60%), 形状指数为 0.85~4.88 (变异系数达 60%), 几乎涵盖了北京主城区不同空间尺度和形状大小的空间单元, 在城市尺度上开展统计分析具有代表性。

基于 115 个街区行政矢量数据和前面得到的北京市主城区 UHI 以及各参数空间分布图, 统计各街区空间单元的平均 UHI 以及 11 个参数平均值进行空间统计分析。首先分析各空间形态参数和 UHI 空间分布特征, 然后开展各空间形态参数与不同时间段的 UHI 之间关联分析, 并对各空间形态参数与夏季、冬季和全年平均的 UHI 进行单因素回归分析, 以探讨各空间形态因子对 UHI 变化的单独贡献, 同时引入陆表参数 VC、IC 和 AB 与 UHI 进行单因素回归分析, 比较空间形态参数和陆表参数单独对 UHI 变化的贡献大小, 最后对所有空间形态参数和陆表参数与 UHI 进行逐步回归分析, 得出夏季、冬季和全年平均 UHI 变化的主要影响因素及重要性大小。此外, 开展空间统计分析时, 除了考虑 UHI、RL、FAI 和 AB 存在年和季节变化外, 其他参数由于季节变化很小或者各季空间分布趋势具有一致性, 可不考虑季节变化。

表 2 研究区 115 个街区空间单元参数统计信息
Tab. 2 Statistical information of 115 block spatial units in Beijing

参数	平均值	最小值	最大值	标准差	变异系数(%)
面积(km ²)	8.98	1.18	50.10	9.68	108
周长(km)	16.37	4.57	46.09	9.90	60
形状指数(m ⁻¹)	2.47	0.85	4.88	0.88	36

4 结果与分析

4.1 城市空间形态特征及相关分析

北京主城区500 m网格分辨率的2017年空间形态参数BH、BD、FAR、BSD、RL、SVF、FAI和FD如图2所示。北京主城区BH、FAR、BSD空间分布较为一致,均呈现城中心低—三环附近高一五环附近低的环带状分布趋势,城中心内有一大片低矮($BH < 8$ m)、高密度($BD > 40\%$)的低容积率($FAR < 1.0$)建筑区,这是由于该区域为北京旧城保护区,分布着大面积的平房、四合院等低矮旧建筑;在东三环、东北三环和与西南三环附近分布着大量高容积率($FAR > 1.0$)的高层($BH > 30$ m)且高度变化大($BSD > 20$ m)的建筑区。而主城区北三环到北五环的建筑高度明显多于南三环和南五环,这种城市建筑形态势必会对北京以南北向为主导风的近地面热场产生深刻影响。

RL、FAI和BH空间分布较为一致,其中RL在0.02~7.37 m之间,FAI在0.01~0.39之间,RL > 1.0 m和FAI > 0.16 以上的地区主要分布于北京五环环区域内,这些都是建筑楼群密度大、楼层高的区域,而在城中心内存在一个RL和FAI相对低值区,大部分RL在1.0 m以下,FAI在0.15以下。一般RL ≥ 1.0 m对城市通风不利^[60],可知北京主城区存在大面积的城市通风障碍区域。

SVF一般在0.40~1.00之间,其中五环区域内存在大量SVF ≤ 0.60 的区域,尤其在东三环和西三环附近区域SVF低值区较多;而在中心区域存在一个SVF > 0.70 的相对开阔区。

FD一般在2.20~3.00之间,与BH分布相似,在二环区域内存在一个FD ≤ 2.70 的相对低值区,三环附近分布着大量的FD高值区,其中北三环到五环之间的分数维高值区明显多于南三环与南五环,反映出北三环到北五环之间下垫面非均匀性程度明显高于南三环到南五环。

主城区115个街区2017年不同空间形态参数之间皮尔逊相关系数如表3所示,可以看出,各参数之间均存在明显的空间相关关系,相关系数绝对值在0.393~0.986之间,除了BD与大部分参数相关性相对较低外,其余各形态参数之间相关性一般大于0.70,其中SVF与各形态参数呈显著负相关关系。平均来看,FAR与其他7个形态参数相关性最大,由于FAR是BH和BD的综合反映,而其他参数(除了FD)都是由BH和BD估算得到,表明在城市尺度上FAR很可能决定了RL、FAI、SVF和FD等重要形态参数的空间分布。另外,FD是唯一由遥感影像估算得到,而FD与BH、FAR、BSD、RL、SVF、FAI存在显著相关关系(相关性大于0.75),因此在缺乏城市尺度上的建筑形态信息时,可利用遥感影像提取的FD来估算BH、FAR、BSD、RL、SVF、FAI等重要空间形态信息。

4.2 北京UHI时空分布特征分析

北京主城区2009—2018年均、年均14时、年均02时、春季、春季14时、春季02时、夏季、夏季14时、夏季02时、秋季、秋季14时、秋季02时、冬季、冬季14时和冬季02时等不同时段的UHI空间分布如图3所示:年均和四季平均以及夜晚02时平均UHI均存在一个较为固定的形态,但UHI空间分布存在着季节差异,其中主城区内有4块较为固定的热岛区域(中心UHI > 1.5 °C),其中夜晚的UHI热岛中心UHI > 2.5 °C,最高可达3.8 °C;白天14时则存在一个与年均和夜晚不同的单中心或双中心弱热岛形态(中心 0.5 °C $< UHI \leq 1.5$ °C)。从UHI值大小和范围来看,夜晚02时明显大于白天14时,季节平均UHI则是冬季 $>$ 秋季 $>$ 春季 $>$ 夏季,其中冬季夜晚02时热岛最强,五环区域内大部份UHI > 2.5 °C。

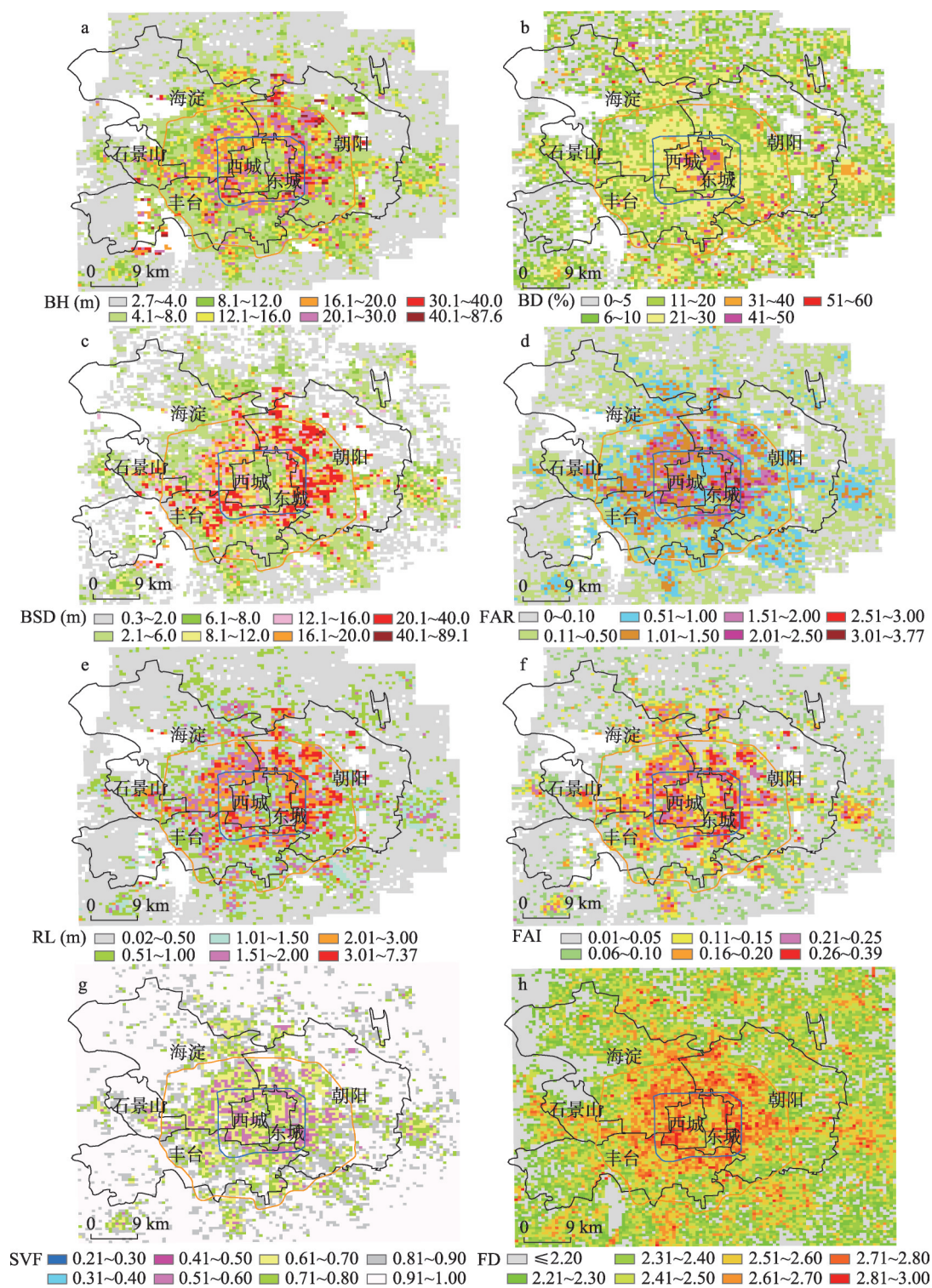


图2 2017年北京主城区不同形态参数500 m网格分辨率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of different morphological parameters with a 500 m grid resolution for Beijing main city in 2017

表3 北京主城区115个街区各空间形态参数之间皮尔逊相关系数表

Tab. 3 Pearson correlation coefficients between different spatial morphological parameters of 115 blocks for Beijing's main urban area

	BD	FAR	BSD	RL	SVF	FAI	FD
BH	0.393**	0.933**	0.946**	0.986**	-0.858**	0.914**	0.875**
BD	-	0.627**	0.257**	0.432**	-0.762**	0.641**	0.503**
FAR	-	-	0.848**	0.945**	-0.945**	0.952**	0.876**
BSD	-		-	0.951**	-0.731**	0.818**	0.822**
RL	-			-	-0.869**	0.930**	0.882**
SVF	-	-	-	-	-	-0.974**	-0.844**
FAI	-	-	-	-	-	-	0.877**

注：“表示相关性达到0.01显著水平。

对北京6个郊区站与9个城区站不同时段平均气温Ta及相应UHI分析如表4所示。可以看出，北京2009—2018年主城区年均UHI为1.81℃，年均白天14时和夜晚02时分别为0.48℃和2.77℃，春、夏、秋、冬四季平均UHI分别为1.50℃、1.43℃、2.16℃和2.17℃，UHI最强出现在冬季夜晚02时（3.20℃），其次是秋季夜晚02时（3.18℃）；最弱出现在秋季14时（0.23℃），其次是冬季14时（0.43℃）。

4.3 城市空间形态与UHI关系分析

北京主城区2009—2018年不同时段UHI与各空间形态参数皮尔逊相关系数R如表5所示：

（1）BH、BD和FAR：大部分时段里建筑形态参数BH、BD、FAR与UHI均呈明显正相关关系，最高相关性分别为0.654、0.691和0.757，且FAR与UHI的相关性又高于BH和BD。对于BH而言，随着BH的增加，一方面城市通风障碍更为明显热量不易散失，另一方面则加大了太阳辐射的多次反射与长波辐射的多次折射，减少了地表附近热量损失，使空气得到的热量也更多，从而加大UHI；对于BD而言，随着BD的增加，建筑物附近热量聚集不容易散失，造成气温升高，且BD的增加使得城市不透水面也增加，由于不透水面含水量少，蒸发量小，不能够通过蒸散降温，热量多以显热形式进入空气中，导致空气升温，而且大部分不透水面对太阳光的吸收率较自然地表高，能吸收更多的太阳辐射使空气得到的热量也更多，从而导致气温升高；而FAR是一个融合了BH和BD的综合指标，其对UHI的影响综合了BH和BD对UHI的影响，由此大部分时段里FAR与UHI的相关性高于BH和BD。此外，随着BH、BD、FAR的增加，建筑物夏季制冷和冬季供暖的人为热排放也相应增加，这也加大了UHI。

（2）RL和FAI：大部分时段里RL、FAI与UHI呈正相关关系，这种相关性主要是由于RL和BH、FAI和FAR呈显著正相关（相关性分别高达0.986和0.952）造成，即由于BH或FAR增加，使得地表粗糙度RL和迎风建筑截面积FAI增大，最终造成UHI增加。

（3）BSD和FD：大部分时段里BSD、FD与UHI呈正相关关系，与前面类似，这种相关性主要是由于BSD和BH、FD和FAR呈显著正相关（相关性分别高达0.946和0.876）造成，即由于BH或FAR增加，使得建筑物的起伏度BSD和地表非均匀性FD增加，最终造成UHI呈增加趋势。

（4）SVF：与其他形态参数不一样，大部分时段里SVF与UHI呈明显负相关关系（最高可达-0.798），即SVF越小，相应地天空遮蔽度越大，一方面加大了周边建筑对太阳辐射的多次反射与长波辐射的多次折射使得空气得到的热量也更多，另一方面聚集的热量也不易散失，从而导致UHI增加。

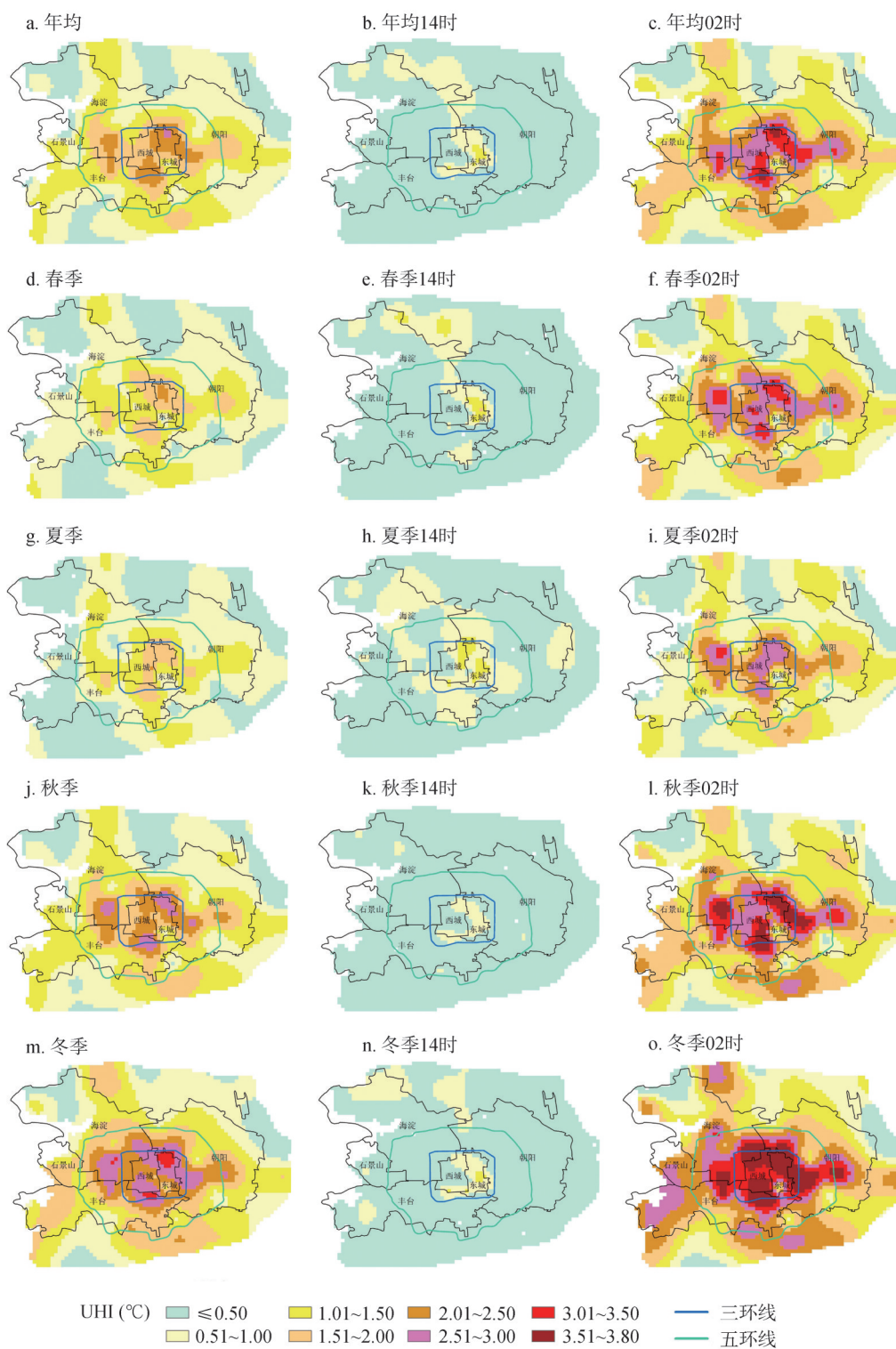


图3 2009—2018年北京主城区不同时段平均UHI空间分布

Fig. 3 UHI distribution of different periods for Beijing's main urban area in 2009–2018

表4 2009—2018年北京地区郊区站和城区站不同时段平均气温及相应UHI比较(°C)
Tab. 4 Temperature of rural and urban stations and corresponding UHI during different periods
for Beijing's main urban area in 2009–2018 (°C)

时段	城市站平均气温	郊区站平均气温	UHI
年均	14.21	12.40	1.81
年均14时	18.21	17.73	0.48
年均02时	11.71	8.94	2.77
春季	15.62	14.12	1.50
春季14时	20.19	19.69	0.51
春季02时	12.48	10.04	2.44
夏季	27.12	25.69	1.43
夏季14时	31.09	30.22	0.86
夏季02时	24.35	22.18	2.17
秋季	14.16	12.00	2.16
秋季14时	18.10	17.87	0.23
秋季02时	11.83	8.66	3.18
冬季	-0.41	-2.57	2.17
冬季14时	3.25	2.82	0.43
冬季02时	-2.21	-5.41	3.20

表5 2009—2018年北京主城区不同时段UHI与各空间形态参数皮尔逊相关系数表
Tab. 5 Pearson correlation coefficients between UHI and different spatial morphological parameters
in different time periods for Beijing's main urban area in 2009–2018

时段	BH	BD	FAR	BSD	RL	SVF	FAI	FD
年均	0.525**	0.650**	0.645**	0.461**	0.551**	-0.674**	0.635**	0.584**
年均14时	0.168	0.438**	0.270**	0.13	0.209*	-0.325**	0.278**	0.267**
年均02时	0.539**	0.607**	0.648**	0.488**	0.557**	-0.666**	0.631**	0.583**
春季	0.478**	0.673**	0.611**	0.406**	0.502**	-0.658**	0.603**	0.560**
春季14时	0.046	0.363**	0.159	0.023	0.084	-0.202*	0.152	0.118
春季02时	0.556**	0.622**	0.665**	0.484**	0.569**	-0.697**	0.658**	0.622**
夏季	0.438**	0.661**	0.578**	0.370**	0.468**	-0.621**	0.562**	0.515**
夏季14时	0.339**	0.541**	0.453**	0.275**	0.382**	-0.500**	0.456**	0.428**
夏季02时	0.393**	0.615**	0.526**	0.330**	0.417**	-0.564**	0.512**	0.466**
秋季	0.570**	0.623**	0.677**	0.500**	0.594**	-0.704**	0.670**	0.634**
秋季14时	0.09	0.341**	0.18	0.058	0.139	-0.231*	0.195	0.179
秋季02时	0.578**	0.579**	0.678**	0.515**	0.596**	-0.692**	0.662**	0.634**
冬季	0.654**	0.691**	0.757**	0.566**	0.681**	-0.798**	0.761**	0.719**
冬季14时	0.143	0.419**	0.273**	0.104	0.208*	-0.308**	0.275**	0.247**
冬季02时	0.634**	0.648**	0.740**	0.563**	0.661**	-0.766**	0.734**	0.684**

注：*和**分别表示相关性达到0.05、0.01显著水平。

从以上分析还可看出，各空间形态参数与UHI相关性在冬季里的明显高于其他季节，很重要的一个原因可能是植被覆盖影响；冬季由于植被覆盖低，各空间形态参数少了植被参数的干扰，使得各空间形态参数对热环境的影响加大，从而增大了相关性。此外，随着UHI的增加，各空间形态参数与UHI的空间相关性也有增加的趋势，而冬季时

段的UHI最强,它与植被覆盖的叠加影响使得冬季时段空间形态参数与UHI的相关性最强。另外,各空间形态参数与UHI相关性在夜晚02时明显高于白天14时,其中一个重要原因可能是白天14时地表受太阳辐射加热影响,一般大气不稳定度明显高于夜晚02时,相应大气水平输送和垂直湍流交换更高,致使热量更易散失,从而使得空间形态参数对UHI的白天影响明显小于夜晚。

就各空间形态参数来看,相关性排名前三的分别是冬季时段的SVF、FAI和FAR(R 分别为-0.798、0.761和0.757)。就相关性明显的11个时段(不考虑年均14时、春季14时、秋季14时、冬季14时等4个时段)平均相关性来看,排名前三的分别为SVF(-0.684)、FAR(0.634)和BD(0.628),表明这3个参数对UHI变化可能具有重要影响。

4.4 城市空间形态及陆表参数对UHI变化贡献分析

各空间形态参数与陆表参数与夏季、冬季和全年平均的UHI单因素回归和逐步回归分析结果如表6所示。

就8个空间形态参数来看,无论在夏季、冬季还是全年,随着BH、BD、FAR、BSD、RL、FAI、FD的增加和SVF的减小,UHI有增加的趋势(均达到0.01显著性水平),其中冬季时段线性相关性明显高于夏季和全年。从单个因子对UHI变化的贡献(R^2)来看,不同时段空间形态参数对UHI变化贡献为13.7%~63.7%,其中夏季排前三位的分别是BD(43.7%)、SVF(38.5%)和FAR(33.5%),冬季排前三位的分别是SVF(63.7%)、FAI(57.9%)和FAR(57.4%),全年平均时段排前三位的分别是SVF(45.4%)、BD(42.3%)和FAR(41.7%),该结果显示夏季、冬季和全年最重要的空间形态因子分别为BD、SVF、SVF;其中空间形态参数对冬季UHI变化的贡献明显高于夏季和全年,冬季每增加10%的BH、BD、FAR、BSD、RL、FAI、FD或减少10%的SVF,UHI分别增加0.007℃、0.57℃、0.09℃、0.006℃、0.06℃、0.90℃、0.39℃和0.47℃。

就3个陆表参数来看,无论在夏季、冬季还是全年,随着VC、AB的增加和IC的减小,UHI有减小的趋势(均达到0.01显著性水平)。VC与UHI呈明显负相关,主要是由于植被能吸收太阳辐射,而所吸收的辐射能量一部分在光合作用中转化为化学能使得增加环境温度的热量大大减少,另一部分通过蒸腾从环境中吸收热量,从而降低环境空气的温度;AB与UHI呈明显负相关,主要是由于AB的增加使得地表的太阳反射辐射增加从而降低地表净辐射,空气得到的地表显热减少从而导致空气降温;IC与UHI呈正相关,则与BD增加造成城市不透水面增加致使气温升高的原理类似。从单个陆表因子对UHI变化的贡献(R^2)来看,不同陆表参数对UHI变化贡献为32.4%~54.8%;与8个空间形态参数的单独贡献相比,夏季贡献最大的陆表参数是VC(42.6%),小于BD(43.7%);冬季贡献最大的陆表参数是AB(57.1%),小于SVF(63.7%)、FAI(57.9%)和FAR(57.4%);全年贡献最大的陆表参数是VC(45.3%),略小于SVF(45.4%),该结果显示北京城市空间形态参数对UHI变化的单独贡献已超过陆表参数。

就所有11个参数与UHI的多要素逐步线性回归及多重共线性分析表明:夏季影响UHI变化的主要因素为BD和AB,能解释UHI变化的51.4%;其中BD对UHI变化的重要性(0.420)大于AB(-0.367)。冬季影响UHI变化的主要因素为SVF、AB和BD,能解释UHI变化的69.1%,各参数重要性依次为SVF(-3.97)、AB(-3.22)、BD(0.189)。全年平均影响UHI变化的主要因素为BD、AB和BSD,能解释UHI变化的55.3%,各参数重要性依次为BD(0.403)>AB(-3.10)>BSD(0.176)。

表 6 2009—2018 年北京主城区夏季、冬季和全年平均 UHI 与各空间形态参数和陆表参数回归模型
Tab. 6 Regression models of summer, winter and annual UHI in 2009–2018 with different spatial morphological parameters and with land surface parameters for Beijing's main urban area

参数		夏季	冬季	全年
空间形态参数	BH	$UHI=0.030BH+0.692$ $R^2=0.191$ $P<0.01$	$UHI=0.068BH+1.259$ $R^2=0.428$ $P<0.01$	$UHI=0.046BH+0.960$ $R^2=0.276$ $P<0.01$
	BD	$UHI=3.656BD+0.330$ $R^2=0.437$ $P<0.01$	$UHI=5.695BD+0.953$ $R^2=0.477$ $P<0.01$	$UHI=4.562BD+0.614$ $R^2=0.423$ $P<0.01$
	FAR	$UHI=0.485FAR+0.594$ $R^2=0.335$ $P<0.01$	$UHI=0.947FAR+1.174$ $R^2=0.574$ $P<0.01$	$UHI=0.687FAR+0.863$ $R^2=0.417$ $P<0.01$
	BSD	$UHI=0.027BSD+0.779$ $R^2=0.137$ $P<0.01$	$UHI=0.062BSD+1.438$ $R^2=0.321$ $P<0.01$	$UHI=0.043BSD+1.076$ $R^2=0.213$ $P<0.01$
	RL	$UHI=0.272RL+0.663$ $R^2=0.219$ $P<0.01$	$UHI=0.594RL+1.218$ $R^2=0.464$ $P<0.01$	$UHI=0.393RL+0.935$ $R^2=0.303$ $P<0.01$
	FAI	$UHI=4.405FAI+0.536$ $R^2=0.316$ $P<0.01$	$UHI=9.043FAI+1.025$ $R^2=0.579$ $P<0.01$	$UHI=5.743FAI+0.772$ $R^2=0.403$ $P<0.01$
	SVF	$UHI=-2.440SVF+2.854$ $R^2=0.385$ $P<0.01$	$UHI=-4.677SVF+5.523$ $R^2=0.637$ $P<0.01$	$UHI=-3.363SVF+3.996$ $R^2=0.454$ $P<0.01$
	FD	$UHI=1.874FD-3.719$ $R^2=0.266$ $P<0.01$	$UHI=3.896FD-7.853$ $R^2=0.517$ $P<0.01$	$UHI=2.696FD-5.353$ $R^2=0.341$ $P<0.01$
	陆表参数	VC	$UHI=-3.365VC+1.754$ $R^2=0.426$ $P<0.01$	$UHI=-5.691VC+3.262$ $R^2=0.548$ $P<0.01$
IC		$UHI=2.828IC-0.975$ $R^2=0.327$ $P<0.01$	$UHI=4.769IC-1.344$ $R^2=0.418$ $P<0.01$	$UHI=3.575IC-1.048$ $R^2=0.324$ $P<0.01$
AB		$UHI=-20.342AB+3.50$ $R^2=0.413$ $P<0.01$	$UHI=-36.347AB+6.499$ $R^2=0.571$ $P<0.01$	$UHI=-28.546AB+4.893$ $R^2=0.443$ $P<0.01$
全部参数		$UHI=1.987+2.325BD-11.624AB$ $R^2=0.514$ $P<0.01$	$UHI=5.361-2.238SVF-15.478AB+1.558BD$ $R^2=0.691$ $P<0.01$	$UHI=-2.299+2.828BD-12.739AB+0.016BSD$ $R^2=0.553$ $P<0.01$
		$Beta_{BD}=0.420$ $Beta_{AB}=-0.367$	$Beta_{SVF}=-3.97$ $Beta_{AB}=-3.22$	$Beta_{BD}=0.403$ $Beta_{AB}=-3.10$
		$VIF_{BD}=1.753$ $VIF_{AB}=1.753$	$Beta_{BD}=0.189$ $VIF_{SVF}=4.061$ $VIF_{AB}=2.755$	$Beta_{BSD}=0.176$ $VIF_{BD}=1.808$ $VIF_{AB}=2.573$
			$VIF_{BD}=2.388$	$VIF_{BSD}=1.589$

注： R^2 为决定系数； $P<0.01$ 表示线性拟合模型达到0.01显著水平， $Beta$ 表示各自变量参数对UHI变化的重要性，值的绝对值越大，重要性越高； VIF 表示各自变量之间的共线性程度，一般 $VIF<10$ ，表明各自变量之间不存在多重共线性。

5 讨论与结论

5.1 讨论

(1) 真实城市热场的不确定性：本文构建的主城区 1 km 分辨率近地面 UHI 空间分布实际上利用了约 62 个城区气象自动站，对 1236.7 km² 的北京主城区来说，尽管平均每个站之间的距离已经缩小至 5 km 之内，但由于主城区高度、密度的非均一性特征，且自动气象站位置一般放置在较为开敞的绿地（如公园或绿化区域内），很少有放置在建筑小区尤其是高密度高层建筑小区之内，相应会影响到各气候要素对高密度高层建筑形态的响应，使得现有自动气象站位置代表性还不够“充分”，因此一方面利用现有的气象自动站观测资料来构建 1 km 分辨率近地面热场还颇为“勉强”，只能通过 GIS 空间差值技术近似模拟；另一方面现有的气象自动站资料还不能完全反映周围高层建筑小区的真实热场状况；还需发展融合高分辨率建筑形态参数的近地面风场中尺度数值模拟技术，同时开展一些重点地区尤其是高密度高层建筑区域的加密气象观测，以弥补现有城市气象站密度不足问题。

(2) 空间尺度问题：城市空间形态信息的尺度大小是城市气候研究中需要考虑的一

个重要方面^[20], 不同的研究空间尺度很可能会得出不一样的结果。已有研究指出FAI对空间尺度大小敏感^[61], 随着空间尺度增加FAI减小, 当网格分辨率超过150 m时, FAI小于1.0; 25 m到300 m之间随着分辨率的增加, FAI与陆表温度相关性呈显著降低趋势。由于空间尺度差异问题, 不同分辨率网格空间形态参数在数值上存在明显差异, 例如本文图2中500 m分辨率的BH和RL最高值分别为87.6 m和7.37 m, 而实际25 m分辨率的BH和RL最高值分别为324.0 m和10.54 m。本文由于区域气象自动站密度不足问题, 在城市尺度上开展统计分析时选择的最小街区空间单元为1.15 km², 这给城市空间形态参数对风场的影响结果带来不确定性, 例如本文得出BH、FAR和SVF与UHI的相关性有效范围分别限制在1.69~25.2 m、0.08~2.13和0.55~0.95之间(115个街区统计分析结果), 在此范围之外则很可能失去了代表性; 因此未来在开展城市空间形态参数与局地气候之间关联研究时, 需要发展不同空间尺度下的城市气候—空间形态耦合模型, 以适应不同空间尺度下的城市规划与设计。

(3) 方法的不确定性: 采用不同的热环境指标以及分析方法研究城市空间形态与城市热岛的关系可能得到不同的结果。已有研究指出VC和FAR可以解释北京夏季日最高地表温度变化的94.47%~98.57%, 且VC是影响北京热环境的最显著指标^[11]。这与本文的研究结论存在着明显差别。主要原因是: 一方面与两者所采用的热环境指标不同, 本文采用基于气温的UHI, 后者采用基于陆表温度的UHI, 即SUHI (Surface Urban Heat Island) ^[62], 而这二者形成原理有着本质上的差别^[63], 且由于SUHI由于主要是通过卫星观测城市三维地表温度所得, 因此其与空间形态参数和地表参数关系可能更为密切^[64-65]; 另一方面也是分析方法不一致, 本文采用115个不同大小城市空间单元(1.18~50.10 km²)的自动气象站观测结果进行统计分析, 后者采用11个城市样区500 m范围内的数值模拟结果进行统计分析。同时, 该结果也表明影响北京城市夏季UHI的机制非常复杂, 如可能对城市热环境有重要影响的人为热、街道走向、高宽比在本文中均没有考虑, 因此如何更加全面地考虑城市空间形态参数、陆表参数以及其他参数(如人为热)对城市热环境影响, 结合数值模拟与实际观测来模拟城市尺度上的高分辨率UHI是城市气候未来需要研究的重点内容。此外, 在评估单个因子对UHI变化贡献率和重要性时, 由于是基于数据回归统计分析, 且各要素之间存在明显相关, 单个因子分析结果有可能与多元回归分析结果并不一致, 由此相关机理解释也可能存在不确定性, 未来还需借助数值模拟手段来进行各因子对UHI变化的重要性和敏感性评估。

5.2 结论

(1) UHI存在固定形态和时空变化: 北京地区2009—2018年年均和四季平均以及夜晚02时UHI均存在一个较为固定的形态, 但UHI空间分布存在着季节差异, 其中主城区内有4块较为固定的热岛区域(中心UHI > 1.5 °C), 其中夜晚的UHI热岛中心UHI > 2.5 °C(最高可达3.8 °C); 白天14时则存在一个与年均和夜晚不同的单中心或双中心弱热岛形态(中心0.5 °C < UHI ≤ 1.5 °C); 近10年年均、年均白天14时和夜晚02时UHI分别为1.81 °C、0.48 °C和2.77 °C, 春、夏、秋、冬四季平均UHI分别为1.50 °C、1.43 °C、2.16 °C和2.17 °C, UHI最强出现在冬季夜晚02时(3.20 °C), 其次是秋季夜晚02时(3.18 °C); 最弱出现在秋季14时(0.23 °C), 其次是冬季14时(0.43 °C)。

(2) UHI与空间形态参数之间的空间相关性存在着时间变化: 北京主城区8个空间形态参数(BH、BD、BSD、FAR、RL、FAI、SVF和FD)之间均存在明显的空间相关性, FAR很可能决定了其他重要形态参数的空间分布; 各空间形态参数与UHI也存在明显空间相关性, 这种相关性随时间变化而变化, 冬季时段强于其他季节, 夜晚02时强于

白天 14 时, 大部分时段相关性排名前三的分别为 SVF (-0.684)、FAR (0.634) 和 BD (0.628)。

(3) 空间形态参数已超越陆表参数成为 UHI 形成的重要驱动因子: 不同时段不同空间形态参数、陆表参数对 UHI 变化的单独贡献为 13.7%~63.7%, 其中贡献最大的空间形态参数和陆表参数, 夏季分别是 BD (43.7%) 和 VC (42.6%), 冬季分别是 SVF (63.7%) 和 AB (57.1%), 全年平均分别是 SVF (45.4%) 和 VC (45.3%); 从多个参数对 UHI 变化的综合贡献来看, 多参数能解释夏季、冬季和全年 UHI 变化的 51.4%、69.1% 和 55.3%, 其中夏季、冬季和全年时段的主导影响因素分别为 BD、SVF 和 BD。

参考文献(References)

- [1] Golany G S. Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(3): 455-465.
- [2] Middel A, Häb K, Brazel A J, et al. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 16-28.
- [3] Wei R H, Song D X, Wong N H, et al. Impact of urban morphology parameters on microclimate. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 142-149.
- [4] Lan Y L, Zhan Q M. How do urban buildings impact summer air temperature? The effects of building configurations in space and time. *Building and Environment*, 2017, 125: 88-98.
- [5] Xu D, Zhou D, Wang Y P, et al. Field measurement study on the impacts of urban spatial indicators on urban climate in a Chinese basin and static-wind city. *Building and Environment*, 2019, 147: 482-494.
- [6] Fletcher J A, Kershaw T, Mills G. Urban form and function as building performance parameters. *Building and Environment*, 2013, 62: 112-123.
- [7] Taleghani M, Kleerekoper L, Tenpierik M, et al. Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 2015, 83: 65-78.
- [8] Achour- Yousni S, Kharrat F. Outdoor thermal comfort: Impact of the geometry of an urban street canyon in a Mediterranean subtropical climate-case study Tunis, Tunisia. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*, 2016, 216: 689-700.
- [9] Quan S J, Wu J, Wang Y, et al. Urban form and building energy performance in Shanghai neighborhoods. *Energy Procedia*, 2016, 88: 126-132.
- [10] Zhou Y, Zhuang Z, Yang F, et al. Urban morphology on heat island and building energy consumption. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 2401-2406.
- [11] Zhao C J, Fu G B, Liu X M, et al. Urban planning indicators, morphology and climate indicators: A case study for a north-south transect of Beijing, China. *Building and Environment*, 2011, 46: 1174-1183.
- [12] Alobaydi D, Bakarman M A, Obeidat B. The impact of urban form configuration on the urban heat island: The case study of Baghdad, Iraq. *Procedia Engineering*, 2016, 145: 820-827.
- [13] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [14] Verdonck M L, Demuzere M, Hooyberghs H, et al. The potential of local climate zones maps as a heat stress assessment tool, supported by simulated air temperature data. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 178: 183-197.
- [15] Yang X S, Yao L Y, Jin T, et al. Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China. *Building and Environment*, 2018, 137: 171-184.
- [16] Kotharkar R, Bagade A. Evaluating urban heat island in the critical local climate zones of an Indian city. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 169: 92-104.
- [17] Ferreira L S, Duarte D H S. Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity. *Urban Climate*, 2019, 27: 105-123.
- [18] Ren C, Ng E Y Y, Katzschner L. Urban climatic map studies: A review. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(15): 2213-2233.
- [19] Ng E Y Y, Ren C, Katzschner L. Urban climatic mapping in Hong Kong. *Journal of Heat Island Institute International*, 2012, 7(2): 55-64.
- [20] Xu Y, Ren C, Ma P F, et al. Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 212-224.

- [21] Touchaei A G, Wang Y. Characterizing urban heat island in Montreal (Canada): Effect of urban morphology. *Sustainable Cities and Society*, 2015, 19: 395-402.
- [22] He X D, Li Y H, Wang X R, et al. High-resolution dataset of urban canopy parameters for Beijing and its application to the integrated WRF_urban modelling system. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208: 373-383.
- [23] Li Y H, Miao S G, Chen F, et al. Introducing and evaluating a new building-height categorization based on the fractal dimension into the coupled WRF/urban model. *International Journal of Climatology*, 2017, 37: 3111-3122.
- [24] Tong S S, Wong N H, Jusuf S K, et al. Study on correlation between air temperature and urban morphology parameters in built environment in northern China. *Building and Environment*, 2018, 127: 239-249.
- [25] Zhu Yuemei, Li Bingxi, Liu Jing, et al. Influences of building floor area ratio on local thermal climate in high latitude severe cold area. *Building Science*, 2012, 28(6): 78-83, 91. [朱岳梅, 李炳熙, 刘京, 等. 高纬度严寒地区建筑容积率对局地热气候的影响. *建筑科学*, 2012, 28(6): 78-83, 91.]
- [26] Hu Y P, White M, Ding W W. An urban form experiment on urban heat island effect in high density area. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 166-174.
- [27] Giridharan R, Ganesan S, Lau S S Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 2004, 36(6): 525-534.
- [28] Giridharan R, Lau S S Y, Ganesan S. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. *Energy and Buildings*, 2005, 37(9): 964-971.
- [29] Giridharan R, Lau S S Y, Ganesan S, et al. Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: The vegetation influence. *Building and Environment*, 2008, 43(10): 1583-1595.
- [30] Zhang H L, Zhu S Y, Gao C, et al. The relationship between urban spatial morphology parameters and urban heat island intensity under fine weather condition. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, 27(2): 249-256.
- [31] Grimmond C S B, Roth M, Oke T R, et al. Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 1: 247-274.
- [32] 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. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(8): 1886-1900.
- [33] He X D, Shen S H, Miao S G, et al. Quantitative detection of urban climate resources and the establishment of an urban climate map (UCMap) system in Beijing. *Building and Environment*, 2015, 92: 668-678.
- [34] Morini E, de Touchaei A G, Rossi F, et al. Evaluation of albedo enhancement to mitigate impacts of urban heat island in Rome (Italy) using WRF meteorological model. *Urban Climate*, 2018, 24: 551-566.
- [35] Gusson C S, Duarte D H S. Effects of built density and urban morphology on urban microclimate: Calibration of the model ENVI-met V4 for the subtropical Sao Paulo, Brazil. *Procedia Engineering*, 2016, 169: 2-10.
- [36] Jamei E, Ossen D R, Rajagopalan, P. Investigating the effect of urban configurations on the variation of air temperature. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017, 6(2): 389-399.
- [37] Sharmin T, Steemers K, Matzarakis A. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 34: 293-308.
- [38] Niachou K, Livada I, Santamouris M. Experimental study of temperature and air flow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions (Part I): Air and surface temperatures. *Building and Environment*, 2008, 43: 1383-1392.
- [39] Tsoka S, Tsikaloudaki K, Theodosiou T. Urban space's morphology and microclimatic analysis: A study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. *Energy and Buildings*, 2017, 156: 96-108.
- [40] Jiang Xiaoyan, Zhang Chaolin, Gao Hua, et al. Impacts of urban albedo change on urban heat island in Beijing: A case study. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(2): 301-307. [江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响: 个例分析. *气象学报*, 2007, 65(2): 301-307.]
- [41] Dou Yiwen, Qu Yugui, Tao Shiwei, et al. The application of quality control procedures for real-time data from automatic weather stations. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(8): 77-81. [窦以文, 屈玉贵, 陶士伟, 等. 北京自动气象站实时数据质量控制应用. *气象*, 2008, 34(8): 77-81.]
- [42] Liang H D, Guo Z Y, Wu J P, et al. GDP spatialization in Ningbo city based on NPP/VIIRS night-time light and auxiliary data using random forest regression. *Advances in Space Research*, 2020, 65(1): 481-493.
- [43] Yan Zhongwei, Wang Jun, Li Zhen, et al. Assessing climatic effects of urbanization based on homogenized daily observations. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2014, 4(3): 41-48. [严中伟, 王君, 李珍, 等. 基于均一化观测序列评估城市化的气候效应. *气象科技进展*, 2014, 4(3): 41-48.]
- [44] Wu Zixuan, Zhang Qiang, Song Changqing, et al. Impacts of urbanization on spatio-temporal variations of temperature

- over the Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2342-2357. [吴子璇, 张强, 宋长青, 等. 珠三角城市化对气温时空差异性影响. *地理学报*, 2019, 74(11): 2342-2357.]
- [45] Liu Y H, Fang X Y, Xu Y M, et al. Assessment of surface urban heat island across China's three main urban agglomerations. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133: 473-488.
- [46] Dou Jingjing. Fine-scale characteristics of low-level meteorological elements in Beijing urban area [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2014. [窦晶晶. 北京城区近地面气象要素精细化时空分布特征[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.]
- [47] Chen Ailian, Sun Ranhao, Chen Liding. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4553-4565. [陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. *生态学报*, 2012, 32(14): 4553-4565.]
- [48] Gál T, Unger J. Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment*, 2009, 44(1): 198-206.
- [49] Yuan C, Ren C, Ng E. GIS-based surface roughness evaluation in the urban planning system to improve the wind environment: A study in Wuhan, China. *Urban Climate*, 2014, 10: 585-593.
- [50] Grimmond C S B, Oke T R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(9): 1262-1292.
- [51] Liu Yonghong, Xu Yongming, Zhang Fangmin, et al. Research and application of urban surface ventilation potential: cases of Beijing and Guangzhou. *Planners*, 2019, 35(10): 32-40. [刘勇洪, 徐永明, 张方敏, 等. 城市地表通风潜力研究技术与应用: 以北京和广州中心城为例. *规划师*, 2019, 35(10): 32-40.]
- [52] Chen L, Ng E. Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(4): 586-594.
- [53] Gál T, Lindberg F, Unger J. Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: Comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 95 (1/2): 111-123.
- [54] Zakšek K, Oštir K, Kokalj Ž. Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing*, 2011, 3: 398-415.
- [55] Chen L, Ng E, An X P, et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, 2012, 32(1): 121-136.
- [56] Liu Yonghong, He Wenbin, Xu Yongming. Measure of Beijing urban underlying surface heterogeneity characteristic. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 7(5): 444-450. [刘勇洪, 何文斌, 徐永明. 北京城市下垫面的非均匀性度量研究. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2015, 7(5): 444-450.]
- [57] Ridd M K. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [58] Xu Yongming, Liu Yonghong. Study on the thermal environment and its relationship with impervious surface in Beijing city using TM image. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 639-643. [徐永明, 刘勇洪. 基于 TM 影像的北京市热环境及其与不透水面的关系研究. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 639-643.]
- [59] Cai Erli, Dou Baocheng, Peng Shi, et al. A study of albedo product downscaling method based on image fusion. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(4): 724-730. [蔡二丽, 窦宝成, 彭实, 等. 基于图像融合的反照率产品降尺度方法研究. *遥感技术与应用*, 2016, 31(4): 724-730.]
- [60] Liu Yonghong, Fang Xiaoyi, Luan Qingzu. Estimation of roughness length of Beijing area based on satellite data and GIS technique. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(6): 1625-1638. [刘勇洪, 房小怡, 栾庆祖. 基于卫星数据与 GIS 技术的北京地区粗糙度长度估算研究. *高原气象*, 2016, 35(6): 1625-1638.]
- [61] Yang J, Wang Y C, Xiao X M, et al. Spatial differentiation of urban wind and thermal environment in different grid sizes. *Urban Climate*, 2019, 28: 100458. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100458.
- [62] Zhou D C, Xiao J F, Bonafoni S, et al. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. *Remote Sensing*, 2019, 11(48). DOI: 10.3390/rs11010048.
- [63] Oke T R, Mills G, Christen A, et al. *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017: 254-268.
- [64] Guo A D, Yang J, Xiao X M, et al. Influences of urban spatial form on urban heat island effects at the community level in China. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53, 101972. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101972.
- [65] Yang J, Su J R, Xia J H, et al. The impact of spatial form of urban architecture on the urban thermal environment: A case study of the Zhongshan District, Dalian, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(8): 2709-2716.

Influence of Beijing spatial morphology on the distribution of urban heat island

LIU Yonghong¹, XU Yongming², ZHANG Fangmin³, SHU Wenjun⁴

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 4. Beijing Municipal Climate Center, Beijing 100089, China)

Abstract: Exploring the influence of urban spatial morphology layout on the urban heat island (UHI) at the urban scale is of great significance for the improvement of ventilation environment and the ecological and livable urban planning. Taking Beijing, China as an example, this study analyzed the UHI spatial characteristics using the hourly temperature data of high-density automatic weather stations in 2009–2018 and the 2018 NPP/VIRRS night-light satellite data. Using 1:2000 basic geographic information data and Landsat8 satellite remote sensing data in 2017, based on remote sensing and GIS technology and morphological models, we extracted eight morphological parameters in the main urban area of Beijing, namely, building height (BH), building density (BD), building standard deviation (BSD), floor area ratio (FAR), frontal area index (FAI), roughness length (RL), sky view factor (SVF), fractal dimension (FD) and three land surface parameters consisting of vegetation coverage (VC), impervious cover (IC), albedo (AB). The relationship between these morphological parameters and UHI was further examined at the urban scale using the spatial statistical method. Results show that the downtown area of central Beijing has presented a relatively fixed distribution pattern of UHI at annual scale, four seasons, and 02:00 at nighttime in the past 10 years. The UHI of the annual, spring, summer, autumn, winter, 14:00, and 02:00 are 1.81°C, 1.50°C, 1.43°C, 2.16°C, 2.17°C, 0.48°C, and 2.77°C, respectively. The eight spatial morphological parameters have obvious spatial correlations with UHIs for most of the year, and the correlations are stronger in winter than in other seasons, and stronger at 02:00 am than at 14:00 pm. The top three parameters are SVF, FAR, and BD. There are spatiotemporal changes in the impact of different spatial morphological parameters and land surface parameters on UHI. Spatial morphological parameters have become important drivers of UHI change and the individual contributions of the eleven parameters to UHI changes are 13.7% to 62.2%. The spatial morphological parameters that contribute the most in summer, winter, and the whole year are BD (43.7%), SVF (62.2%), and SVF (43.0%), respectively; and the corresponding largest land surface parameters are VC (42.6%), AB (57.1%), and VC (45.4%), respectively. The comprehensive contribution of multiple parameters to UHI changes in summer, winter, and the whole year are 51.4%, 69.1%, and 55.3%, respectively; and the dominant influencing factors are BD, SVF, and BD.

Keywords: urban heat island; floor area ratio; building density; sky view factor; vegetation coverage; albedo