

文章编号: 1672-8785(2022)07-0034-07

城市内部结构和人口密度对 地表温度空间变化的影响 ——以东京新宿区为例

陈 曦 陈超民 哈斯巴干* 吉田崇紘

(上海师范大学环境与地理科学学院, 上海 200234)

摘 要: 随着城市化进程的加快和人口的快速增长, 城市空间内部格局正发生变化, 城市热岛效应不断加剧。本研究旨在根据建筑、人口与地表热环境的关系来寻求可持续发展。与其他研究相比, 本文采用了东京新宿区的机载热红外图像、机载激光雷达数据、建筑物矢量数据和人口普查数据等新颖数据, 且最大创新点在于对建筑密度、平均高度、平均地表温度(Land Surface Temperature, LST)和人口密度之间进行的定量分析。结果显示, 平均 LST 与建筑密度的相关性最大($r=0.6718$), 其次是平均 LST 与人口密度的相关性($r=0.6050$); 建筑密度与人口密度呈正相关($r=0.4949$), 平均 LST 与建筑物平均高度呈负相关($r=-0.3814$)。经研究可知, 通过合理规划城市内部结构有望为减弱城市热岛效应和实现环境可持续发展提供参考。

关键词: 城市建筑; 热环境; 机载热红外图像; 机载激光雷达; 相关分析

中图分类号: TP751 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.07.006

Influence of Urban Internal Structure and Population Density on Spatial Variation of Surface Temperature: A Case Study of Shinjuku in Tokyo

CHEN Xi, CHEN Chao-min, HASI Ba-gan*, TAKAHIRO Yoshida

(School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai
Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization and the rapid population growth, the internal pattern of urban space is changing, and the urban heat island effect is increasing. This paper aims to seek sustainable development based on the relationship between the surface thermal environment and buildings as well as the population. Compared with other studies, novel data such as airborne thermal infrared images, airborne lidar data, building vector data and census data of Shinjuku district in Tokyo are used in this paper. The biggest innova-

收稿日期: 2022-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771372); 上海市科委“科技创新行动计划”项目(18511102300)

作者简介: 陈曦(1999-), 女, 江苏淮安人, 硕士, 主要从事城市化与土地覆被变化方面的研究。

*通讯作者: E-mail: hasibagan@staff.shnu.edu.cn

tion lies in the quantitative analysis of building density, average building height, average land surface temperature (LST) and population density. The results show that the correlation between average LST and building density is the largest ($r=0.6718$), followed by the correlation between average LST and population density ($r=0.6050$). The building density is positively correlated with the population density ($r=0.4949$). The average LST is negatively correlated with the average building height ($r=-0.3814$). It is concluded that rational planning of urban internal structure can provide reference for reducing urban heat island effect and sustainable environmental development.

Key words: urban buildings; thermal environment; airborne thermal infrared image; airborne lidar; correlation analysis

0 引言

近年来,随着全球城市化进程的加快,人口流动以一定的规律变化,城市人口密度持续增加,农村人口密度逐渐减少。城市化也使城市建筑用地规模不断扩大,建筑密度随之增加,大城市空间结构正在重组^[1,19]。经过大规模的工程建设和空间结构重组,全球许多城市原底面的自然条件发生了变化,导致建筑物周围的热环境发生变化,城市地表温度随城市化而变化^[2]。LST 数据和大气温度数据是城市空间热环境研究的主要数据来源,地表温度主要通过遥感数据反演获得^[3-5,8]。随着热红外遥感技术和激光雷达技术的发展,平均 LST 数据逐渐取代平均大气温度数据成为研究城市空间热环境的主要依据,城市地表层也逐渐取代城市大气层成为目前研究的重点^[6]。

现在全球正处于向未来城市化发展转变的关键时刻^[1]。城市扩张与生态可持续之间一直无法达到平衡,成熟的中心区增长强度变缓,一些次中心区还在进行扩张。未来发展成熟的中心区将转变为复合型的大都市区,所以在一定程度上实现综合区域规划是可持续发展的关键步骤^[7]。中国的很多大城市(如上海)正在向大都市迈进。日本东京正着眼于大都市区的规划思想以及相应规划与实践,可以给中国城市很好的借鉴^[8]。东京现已形成一大批高密度建筑群,并且容纳的人口众多。环境问题(如城市热岛效应)正持续加重。城市热岛效应将导

致空气质量降低、水质恶化、生物生存环境破坏,严重威胁城市居民健康和生态环境^[9-11]。粗糙度元素高度(平均高度)以及建筑密度是城市空间形态学的基础参数^[12-13]。

由于东京和中国许多地区存在相同的问题,通过分析东京的相关数据可以给中国类似城市很好的借鉴。过去几十年,东京发展非常迅猛。已有研究表明了城市化发展与人口密度之间的关系^[14-15],但是很少有研究对人口密度、城市 LST 和城市内部结构的主体建筑物进行定量分析。定量分析城市内部空间结构变化和城市空间形态演变过程对城市发展规划与建设以及地表热环境可持续发展等具有重要意义^[16-18]。因此,本文将利用东京部分地区的遥感数据和激光雷达数据研究建筑密度、平均高度、平均 LST 和网格尺度下的人口密度之间的定量关系。

1 研究方法

1.1 研究区域、数据和预处理

本文的研究区域位于日本东京新宿区,研究范围约为 22.25 km^2 。选择新宿区的原因在于它是东京核心市区之一,有繁华的商业区、特色的居民楼、众多高等院校、大型企业总部等具有代表性的建筑群。此外,新宿站也包含在本文研究区域内。

研究中使用的数据包括机载热红外图像、机载激光雷达数据、建筑物矢量数据和人口普查数据(见表 1)。

表 1 研究中使用的数据摘要

数据类型	时间	空间分辨率
机载热红外图像	2014 年 8 月 19 日 (当地时间 12:01~12:50)	2 m
机载激光雷达数据	2001~2002	4~5 点/平方米
建筑物矢量产品 (Zmap-TOWNII 产品)	2017	不规则多边形矢量
人口普查数据	2015	网状多边形矢量

主要的数据获取与处理步骤如下:

(1) 图 1 所示为建筑物矢量数据, 通过 ZENRIN 公司的住宅地图数据库(Zmap-TOWNII 产品)获得。

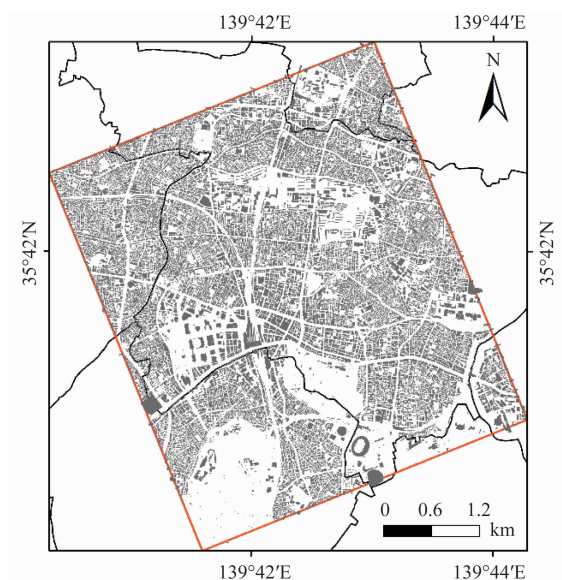


图 1 建筑物矢量数据(Zmap-TOWNII 产品)

(2) 激光雷达点云数据用于生成数字表面模型(DSM)和数字地形模型(DTM), 其空间分辨率为 0.5 m。然后通过以下方程生成图 2 所示的网格单元大小为 0.5 m 的归一化数字表面模型(nDSM):

$$nDSM = DSM - DTM \quad (1)$$

(3) 图 3 是在 2014 年 8 月 19 日(当地时间 12:01~12:50)进行的空中飞行中获得的机载热红外图像。通过正射校正从这张白天的热红外图像中得出空间分辨率为 2 m 的平均 LST。

(4) 图 4 为人口数据显示图。以栅格坐标系统(网格)形式的人口普查数据是从日本统计局获得的。2015 年东京人口普查数据的网格单元的空间分辨率约为 250 m。这些网格单元

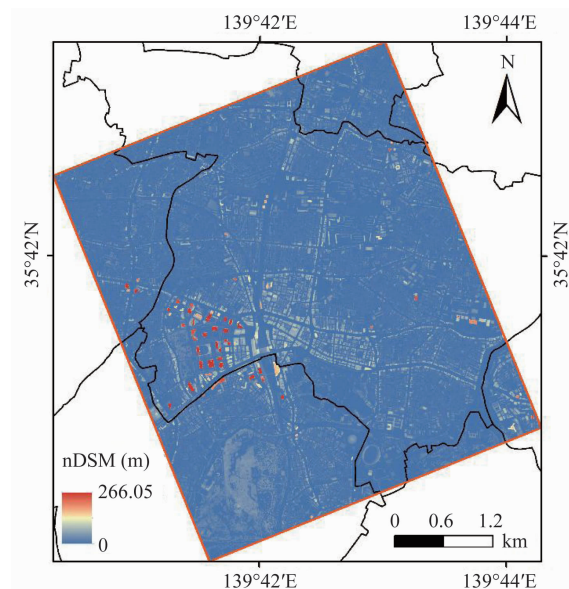


图 2 nDSM (0.5 m) 规范化数字表面模型

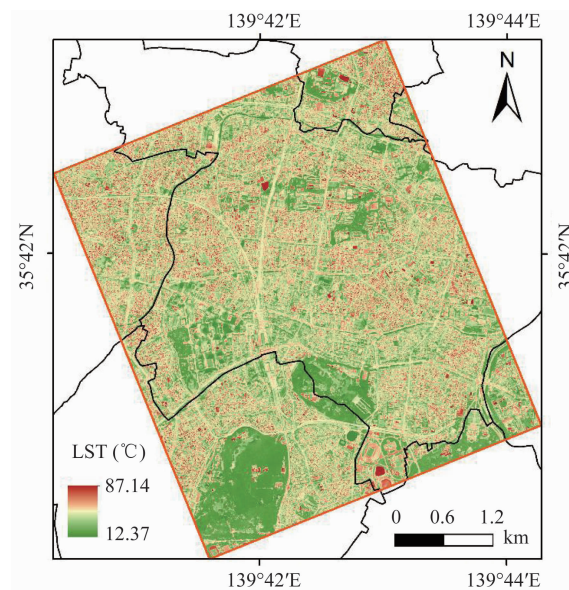


图 3 夏季白天平均 LST (2 m 空间分辨率)

是以 7.5" 的纬度间隔和 11.25" 的经度间隔进行分割的 (<http://www.stat.go.jp/english/data/mesh/05.html>)。

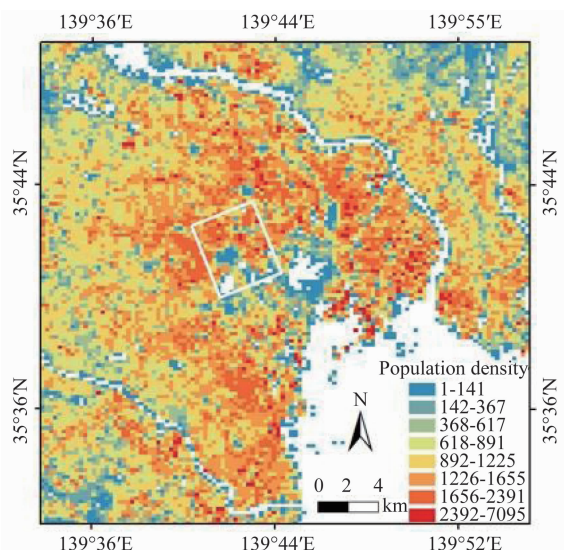


图 4 研究区(白色矩形)的位置和 2015 年东京人口密度图

1.2 网格尺度的相关分析

在这项研究中, 采用 2015 年人口普查数据中 250 m 的网格作为统计分析单位。为了计算建筑物密度, 建筑物矢量与统计网格相交。然后将统计网格内建筑物占地的面积除以统计网的面积来获得建筑密度。通过统计网格内 nDSM 栅格的像素值(0.5 m 像素大小)来获得平均高度。平均 LST 是通过在统计网格中对 LST 栅格的像素值(2 m 像素大小)求平均来获得的。为了研究建筑密度、平均高度、LST 和人口密度之间的关系, 我们使用了皮尔逊相关系数 r 。

2 结果与分析

经分析发现, 建筑密度、平均高度、平均 LST 和人口密度有显著的相关性($p < 0.001$), 如图 5 所示。

(1) 平均 LST 与建筑密度($r = 0.6718$, $p < 0.001$)和人口密度($r = 0.6050$, $p < 0.001$)密切相关。LST 与建筑密度和人口密度均呈正相关性。当人口密度越大或建筑密度越大时, 城市的 LST 越大。建筑密度和人口密度之间也有正相关关系($r = 0.4949$, $p < 0.001$)。人口密度增大是建筑物密度增大的重要因素之一。平均高度与平均 LST 呈负相关性($r =$

0.3814 , $p < 0.001$)。

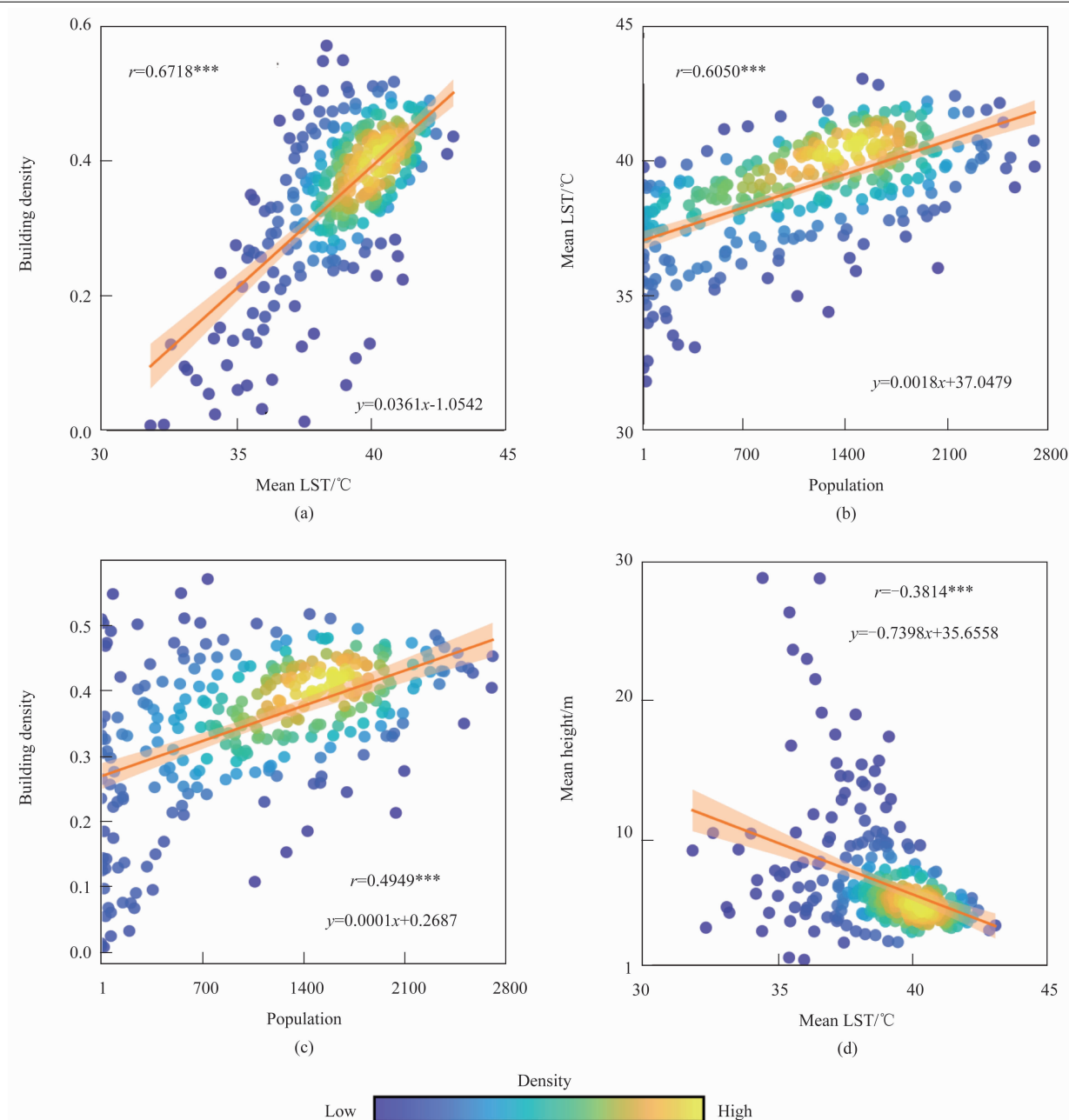
(2) 研究区的平均 LST 大多很高(约 39°C), 这也表明大城市区内的 LST 多数较高。研究区内主要以低高度为特征(约 7 m)。根据数据分析可知, 东京许多的居民楼高度不高, 同时也有较高的商业建筑物等。

(3) 图 5 为用高斯核密度估计建筑密度、平均高度、平均 LST 和人口密度之间关系的 2D 密度散点图。人口相关性是使用所有的 313 个统计网格(约 250 m)的数据计算出的($*p < 0.05$, $**p < 0.01$, $***p < 0.001$)。实线表示线性回归分析的结果, 实线周围的区域表示回归线的 95% 置信区间。

(4) 如图 5 所示, 通过定量分析建筑密度数据与平均 LST 数据, 算得皮尔逊相关系数 r 为 0.67, 则在置信区间内建筑物密度与平均 LST 呈显著正相关。结合图 5(a)所示的 2D 密度散点和回归线图得出: 平均 LST 越大, 建筑密度越大。通过定量分析平均 LST 数据与人口数据, 算得 r 为 0.61, 则在置信区间内二者呈显著正相关。结合图 5(b)所示的 2D 密度散点和回归线图得出: 人口数量越大, LST 越大, 城市热环境影响越大。通过定量分析人口数据与建筑物密度数据, 算得 r 为 0.49, 则在置信区间内它们呈显著正相关。结合图 5(c)所示的 2D 密度散点和回归线图得出: 人口数量越多, 建筑密度越大。通过定量分析平均 LST 数据与建筑高度数据, 算得 r 为 -0.38 , 则在置信区间内二者呈显著负相关。结合图 5(d)所示的 2D 密度散点和回归线图得出: 平均 LST 越大, 建筑物越低。这里与上述的显著正相关性不同, 呈现的是显著负相关性, 也与人们常规的认识不同。

3 结论和讨论

根据以上的数据处理和分析, 对结果进行总结后可得: 在建筑密度、平均高度、平均 LST 和人口密度 4 种变量中, 建筑密度与平均 LST 的相关性最大; 其次是人口密度与平均 LST 的相关性; 再次是人口密度与建筑密度的

图 5 皮尔逊相关系数 r 的结果图

相关性；最弱的是平均 LST 与建筑物平均高度之间的相关性。其中，平均 LST 与建筑物平均高度之间呈现的是显著负相关性。这不同于人们常规的认识，目前也没有很多相关研究。人们通常理解的是，建筑物越多越高，则 LST 越高，而实际上不是这样。平均高度和平均 LST 之间的负相关性可以通过阴影和空气动力学差异来解释。建筑物越高，地表面被阴影覆盖的面积就越大。相比于长期被阳光照射的低矮建筑物周围地表，高层建筑物周围地表

的温度反而更低。

随着建筑密度的增加，夏季白天的平均 LST 和人口密度趋于增加。高建筑密度可能会阻碍空气循环和吸收热量。此外，高建筑密度可能表明居住的人类更多，人口密度可能对热环境产生负面影响。人口密度的增加可能导致人为热排放的增加。影响城市地表热环境的因子较多，包括人为影响因子和自然影响因子。这两方面的因子相互交错会形成更为复杂的影响因子^[19]。研究人员会从

不同的角度考虑使用不同的方法、数据、变量和外在气候条件等因子, 导致目前关于城市空间内部结构与地表热环境之间关系的研究结果大多不相同。而这些受多种不同因素影响的研究也使人们更加担忧目前城市形态对热环境的影响^[19]。

基于上述结论和对东京的分析, 为目前国内的超大城市规划提供数据基础并给出相关建议。首先, 建筑物的增多是导致城市内部地表温度上升的重要原因之一, 通过城市统筹建设和更新规划来适当控制或降低建筑密度。此外, 由于森林、草地和水体在一定程度上起到增湿降温的作用, 在规划城市景观格局时, 可通过建设绿地景观(如公园或人造河湖等)有效解决城市热环境问题^[8]。其次, 通过更好地控制人口增长和分布可以减少人为的热排放, 也可以通过颁布相关减少排放量政策来控制人为的热排放, 进而利用遥感技术、信息技术等并结合景观生态格局理论和方法合理规划城市空间格局发展。

虽然本文具体讨论了建筑密度、平均高度、平均 LST 和人口密度 4 种变量的相互关系, 也对相关数据进行了具体的定量分析, 但研究区范围较小, 典型性不够。各个地区的差异性相对较大且不可控因素较多。未来可以在更大的空间范围上对更多典型地区进行分析, 并结合建筑物材质、类型、楼层等更多变量进行更深入、更综合的城市内部空间结构变化分析与城市地表热环境效应研究。

参考文献

- [1] 张欣炜, 宁越敏. 中国大都市区的界定和发展研究: 基于第六次人口普查数据的研究 [J]. *地理科学*, 2015, **35**(6): 665–673.
- [2] Parsaee M, Joybari M M, Mirzaei P A, et al. Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, **14**: 100341.
- [3] 历华, 曾永年, 负培东, 等. 利用多源遥感数据反演城市地表温度 [J]. *遥感学报*, 2007, **32**(6): 891–898.
- [4] 谢哲宇, 黄庭, 李亚静, 等. 南昌市土地利用与城市热环境时空关系研究 [J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(S1): 241–248.
- [5] 曾侠, 钱光明, 潘蔚娟. 珠江三角洲城市群城市热岛效应初步研究 [J]. *气象*, 2004, **55**(10): 12–16.
- [6] Gutenberg P. Bulletin of the American meteorological society [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, **94**(9): 1424–1425.
- [7] 焦利民, 龚晨, 许刚, 等. 大都市区城市扩张过程及形态对比分析——以东京、纽约和上海为例 [J]. *地理科学进展*, 2019, **38**(5): 675–685.
- [8] 孙硕, 李君, 王一旭, 等. 京津冀城市群土地利用变化对地表热环境的影响研究 [J]. *西安理工大学学报*, 2022, **38**(1): 1–17.
- [9] Tan J, Zheng Y F, Tang X, et al. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai [J]. *International journal of biometeorology*, 2010, **54**(1): 75–84.
- [10] 蔡智, 梁雪君. 城市建设强度的热环境效应 [C]. 杭州: 2018 中国城市规划年会, 2018.
- [11] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析 [J]. *地理学报*, 2005, **72**(2): 237–247.
- [12] Berger C, Rosentreter J, Voltersen M, et al. Spatio-temporal analysis of the relationship between 2D/3D urban site characteristics and land surface temperature [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **193**: 225–243.
- [13] Huang X, Wang Y. Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, **152**: 119–131.

- [14] Bagan H, Yamagata Y. Analysis of urban growth and estimating population density using satellite images of nighttime lights and land-use and population data [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2015, **52**(6): 765–780.
- [15] Bagan H, Yamagata Y. Landsat analysis of urban growth: How Tokyo became the world's largest megacity during the last 40 years [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **127**: 210–222.
- [16] 唐路, 薛德升, 许学强. 北美大都市区规划及其对珠江三角洲的启示 [J]. *人文地理*, 2004, **19**(1): 66–70.
- [17] Taubenböck H, Esch T, Felbier A, et al. Monitoring urbanization in mega cities from space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **117**: 162–176.
- [18] 冷炳荣, 王真, 钱紫华, 等. 国内外大都市区规划实践及对重庆大都市区规划的启示 [J]. *国际城市规划*, 2016, **31**(6): 112–119.
- [19] 孙喆. 高密度城区形态要素对热环境的影响作用——以北京市五环内区域为例 [J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(10): 2020–2027.