文章编号：1673-9493（2021）05-0061-08　中图分类号：TU984.11+3　文献标识码：A　DOI：10.19830/j.upi.2021.407

三维城市空间形态演进及其地表热岛效应的规划应对——以北京市为例

Analyzing the Transformation of 3D Urban Morphology and Corresponding Surface Heat Island Effect in Beijing

蔡智　唐燕　刘畅　马蒂亚斯·德米泽尔
Cai Zhi, Tang Yan, Liu Chang, Matthias Demuzere

摘要：快速城市化进程显著改变了城市地区的物质空间形态，并常常引发系列生态环境问题，其中较为显著的是城市热岛效应。本文基于 Landsat 系列、Sentinel 系列等多源卫星遥感数据和深度学习方法，采用系统化的局地气候分区城市空间形态分类方案，识别并分析了北京近 20 年三维城市空间形态的演进特征和地表热岛效应。结果表明，北京低层形态类型持续收缩，向高层类型（紧凑高层、开敞高层）发展的趋势明显，分析其驱动力可以发现城市规划和政府政策扮演了至关重要的角色。空间形态演进也影响并改变了北京城市地表热岛的分布格局，高温热岛区主要集中在紧凑低层、紧凑中层和大体量低层里。本文针对城市空间形态类型不同的地表热岛效应，提出了差异化的规划应对策略，以期为缓解城市地表热岛效应、增强城市气候适应性等提供决策支持。

Abstract: Rapid urbanization has changed the physical urban morphology, and results in various environmental problems, one is the urban heat island effect. In this paper, we use multi-source satellite remote sensing data (e.g., Landsat series and Sentinel series) and deep-learning technology to identify and analyze the three-dimensional (3D) urban morphology transformation characteristics in Beijing, as well as its corresponding surface urban heat island effect in recent 20 years, which is based on Local Climate Zone (LCZ) scheme. The results show that the morphological types of low-rise buildings continued to shrink and the trend towards high-rise types (e.g., compact high-rise, open high-rise) is obvious. The transformation of urban morphology is mainly driven by urban planning and government policies. Urban morphology transformation has also affected and changed the spatial-temporal distribution of surface urban heat island in Beijing. High surface urban heat island effect zones mainly appear in the compact low-rise, compact mid-rise and large low-rise types. Based on those analyses, corresponding planning strategies have been put forward to provide decision support for mitigate surface urban heat island and enhancing urban climate adaptability.

关键词：地表温度；地表热岛；三维空间形态；局地气候分区；演进；北京

Keywords: Land Surface Temperature; Surface Urban Heat Island; Three-dimensional Urban Morphology; Local Climate Zone; Transformation; Beijing

国家自然科学基金（51978363）、北京社会科学基金（19GLB034）、国家重点研发计划（2018YFC0704600）、首都区域空间规划研究北京市重点实验室开放课题（CLAB202009）、“清华—腾讯”2020 WeSpace 学术支持计划联合资助

作者：蔡智，清华大学建筑学院，博士研究生。czhi911@gmail.com
唐燕（通信作者），清华大学建筑学院，博士生导师。yantang@mail.tsinghua.edu.cn
刘畅，清华大学建筑学院，博士研究生。2627189484@qq.com
马蒂亚斯·德米泽尔，德国波鸿大学（Ruhr-University Bochum），研究员。matthias. demuzere @ ruhr-uni-bochum. de

快速城市化背景下，原有的自然地表逐步被人工建设用地所替代，导致城市地表对太阳辐射的吸收能力更强[1]。随着城市规模的持续扩大，人口及其活动过程中释放的热量在城市区域内集聚，进一步导致城市温度显著高于附近乡村，即城市热岛效应凸显[2-3]。热岛效应会额外增加城市内部的高温天数[4]，并因空调制冷等导致夏季产生更多的能源消耗需求[5]，加剧空气污染[6]。相关研究表明，居住在城市高温热岛区内的居民死亡率更高[4]，因此如何缓解城市热岛效应、改善城市生态环境质量逐渐成为人们关注的焦点之一。学者们就此进行了大量研究，并根据关注对象及其观测手段的差异将城市热岛进一步划分为基于空气温度的冠层热岛和边界层热岛，以及基于地表温度的地表热岛[7]。由于人群活动主要集中在地表层，因而地表的温度和热岛效应强度显著影响人体舒适感觉。

城市空间形态作为城市实体所表现出来的具体物质空间形态，其不同形态类型和布局模式显著影响了热量的集聚程度，进而导致地表温度和地表热岛的时空分异，因而优化城市空间形态被认为是缓解城市热岛效应的最有效手段[8-12]。基于此，分析城市空间形态与其热岛效应之间的互动演进特征，揭示其背后的内在机制，可以为城市规划的科学决策提供重要支撑。国内外已有大量学者就城市空间形态的演进特征开展了探讨[13-15]，然而受数据来源和技术方法的限制，先前大部分研究是从二维层面使用景观形状指数、路网结构、空间句法等来对城市进行刻度，少有三维层面上高时空分辨率的研究；此外，将空间形态演进及其热岛效应结合分析的研究也较为少见。近年来，随着卫星遥感技术的发展，基于遥感影像反演计

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

算得到的地表温度产品，因具有低成本、大范围、高精度等优势，而被广泛应用于城市地表热岛研究中。深度学习技术与卫星遥感技术的发展与结合，更使得快速识别并分类获得高时空分辨率、大尺度 3D 城市空间形态的数据产品成为可能 [16-17]。为此，本文以北京市中心城区为例，综合利用多源卫星遥感数据（Landsat 系列和 Sentinel 系列等），基于局地气候分区（LCZ: Local Climate Zone）城市空间形态分类方案，使用深度学习技术识别北京近 20 年城市三维空间形态的演进特征，分析不同 LCZ 空间形态类型（下称“LCZ 类型”）对应的地表温度和地表热岛效应，进而提出相应的规划应对策略，以期为缓解城市热岛效应、提高城市宜居程度等提供决策参照。

1 局地气候分区：架构城市空间形态和气候研究之间的桥梁

城市系统的复杂性、城市空间形态的多样性，使得在宏观尺度上精细化刻度城市形态特征较为困难。虽然不少研究尝试构建城市空间形态分类体系及模型，但大部分基于城市规划或建筑学的视角，较少涉及城市气候问题。此外，随着城市规模的不断扩大，城市与乡村之间的界限愈发模糊，同样给传统的城市热岛研究带来了挑战。为此，斯图沃特等（Stewart et al.）于 2012 年提出局地气候分区方案 [18]，将城市空间形态划分为建设类型（built-up）和自然类型（land cover）两大类，涵盖紧凑高层、开敞高层、绿地、水体等 17 个小类（图 1），实现了对复杂城市空间的精准刻度。由于 LCZ 采用了规范统一的指标体系，不仅为城市空间形态分类提供了可供参考的依据，同时也为各种气候模型提供了参数，架构起了城市空间形态和气候研究之间的桥梁。因此 LCZ 也被全球气候学者广泛接受和采用 [19-22]，用以分析空间形态与城市小气候之间的互动关系。

国际上基于 LCZ 的城市气候研究开展时间相对较短，并且已有研究大多是基于单景遥感影像，进行特定时间内的城市空间形态分类以及地表温度、地表热岛效应评估。时空序列上的演进分析研究还处于起步阶段，仅在部分城市或地区有少量研究，如中国昆明和珠三角地区 [23-25]、美国得克萨斯州 [26]、泰国曼谷 [27] 等。针对以上现状，本研究以北京为例，尝试捕捉中心城区近 20 年的空间形态变化特征，分析城市地表温度和地表热岛效应演进趋势。

2 研究数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

北京丰厚的历史文化底蕴造就了独特的城市空间格局与形态特征，但近年来因城镇化和人口剧增等原因，导致城市特色消失、城市热岛效应加剧、人居环境质量下降等问题凸显 [28]，急需探索城市形态优化和热岛缓解的有效路径。本研究使用的数据包括谷歌卫星高清影像、Landsat 系列卫星遥感影像、Sentinel 系列卫星遥感影像、ASTER 高程数据等。其中，谷歌超高分辨率的历史影像数据来源于 Google Earth，其空间分辨率为 0.5 m，使用地图软件截获至本地并进行拼接处理。由于谷歌超高分辨率影像仅在 2000 年后提供，且城市建设需要一定周期才能产生城市空间形态的变化。为此，本研究以 2000 年为起点，每五年为一个周期，分析北京的



图 1 局地气候分区的城市空间形态类型以及部分北京样本示例

资料来源：作者根据参考文献 [18] 整理绘制

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

城市空间形态变化。为尽可能获得不同季节地表的形态信息，提高形态分类的准确度，除采用目标年份研究区所有云量少于 10% 的遥感卫星影像外，每个周期还额外追加了前后半年的影像数据。Landsat、Sentinel 系列遥感卫星影像和 ASTER 高程信息等均在谷歌地球引擎（GEE: Google Earth Engine）云平台进行加载及处理，包括去云处理、波段计算、重采样、研究区裁剪等。此外，为避免冬季地面积雪对形态分类的影响，12—2 月数据不予采用，而高温天气主要出现在夏季，故选取 7—8 月的影像数据产品参与城市地表温度反演（表 1）。

2.2 研究步骤与方法

（1）北京市中心城区的 LCZ 空间形态分类。空间形态分类主要包括“数据建构—样本训练—深度学习—评估反馈”四个步骤。首先，在 GEE 云平台加载导入所有目标影像数据并执行相应的预处理，建构基础研究数据库。然后，在本地 Arcgis pro 软件平台中，基于目标年夏季无云的谷歌历史超高分辨率影像，使用人工目视判别的方法进行样本训练，本次研究总共训练了 11 793 个样本。第三步，将本地训练样本上传至 GEE 云平台中，随机选取 70% 样本进行深度学习和形态分类。最后，为减少后期计算统计量并与 LCZ 推荐的尺度（100~10 000 m）相匹配，将分类结果重采样至 100 m 空间分辨率并执行高斯滤波以去除噪点，随后使用剩余的 30% 样本进行分类后结果评估。根据分类结果，反馈调整本地训练样本，并重复分类流程。其最终分类结果表明，大部分年份的形态分类准确度达 65% 以上，对于紧凑低层、绿地、水体等形态相对简单的类型，其识别程度已超过 80%。

（2）地表温度反演和热岛强度计算。由于各遥感卫星参数不一，地表温度反演公式略有差异。为保证温度产品参数的一致性，研究统一使用辐射传输方程（RTE: Radiative Transfer Equation）方法进行地表温度反演，具体公式参见斯科提金（Sekertekin）的研究 [29]。该文同时提供了基于 Arcgis 集成化的多源卫星影像反演插件，可以较为方便地对 Landsat 系列卫星数据进行温度反演工作，大幅减少了工作量并提升了结果的可靠性。为保证历年各时期的可比性，同时降低因天气差异所造成的影响，研究使用夏季（7—8 月）平均地表温度和平均地表热岛强度进行横向对比。其中，地表热岛强度参考斯图尔特所推荐的方法进行计算 [18]，即各 LCZ 类型与浓密树林类型之间的地表温度差。为进一步降低天气差异的影响，研究使用地表热岛强度的标准差来作为对比的另一个指标，并将 1.5 个标准差以上的区域视为高温热岛区。

表 1 参与地表温度反演的卫星影像

年份	时间	卫星
2000 年	8 月 20 日	Landsat 7
2005 年	7 月 25 日	Landsat 5
	8 月 2 日	Landsat 7
	8 月 18 日	Landsat 7
2010 年	8 月 8 日	Landsat 5
	8 月 16 日	Landsat 7
2015 年	7 月 13 日	Landsat 7
	8 月 16 日	Landsat 8
2020 年	8 月 3 日	Landsat 7
	8 月 11 日	Landsat 8

3 北京城市空间形态演进特征与驱动力

3.1 城市空间形态的演进特征

以每五年为一个周期，对比 2000—2020 年北京中心城区的 LCZ 类型变化（图 2），可以发现建设类型的用地增加并不显著，但城市空间形态更替，向高建设强度发展，以及建成区与自然边界日渐清晰等趋势明显，其变化主要体现在 LCZ 类型的用地比例及其空间布局两方面。

在各 LCZ 类型占比上，建设类型和自然类型的用地总规模均维持在 50% 左右（图 3）。其中，紧凑高层、开敞高层、稀疏树林类型呈显著增加趋势，其比例分别由 2000 年的 1.8%、0.1%、13.5% 上升至 2020 年的 9.5%、8.8%、31.1%。紧凑低层、低矮植被类型显著减少，其比例分别由 2000 年的 32.6%、15% 下降至 2020 年的 6.5%、1.7%。大体量低层类型呈现出先增后减的趋势，其比例由 2.0%（2000 年）上升至 9.5%（2015 年），随后下降至 4.8%（2020 年）。其他 LCZ 类型变化趋势不明显。

在空间布局上，LCZ 类型由散乱杂糅分布转向紧凑组团式发展，城市建成区与绿地空间的边界日趋明晰，逐步

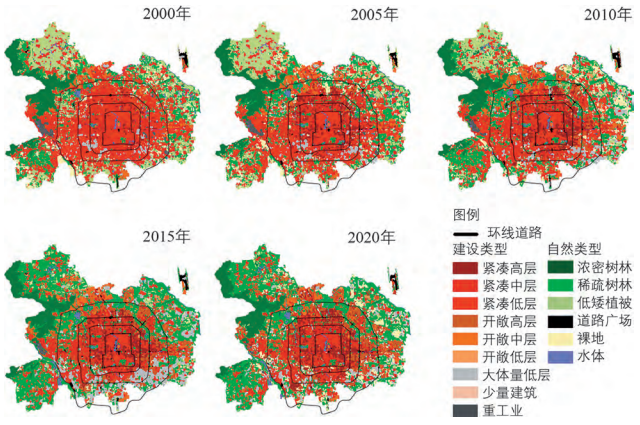


图 2 北京 2000—2020 年各 LCZ 类型空间分布

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

形成相融共生的空间格局。2010 年以前，各 LCZ 类型布局较为杂乱，且以紧凑中层、紧凑低层和低矮植被类型为主；2010 年后，LCZ 类型布局日渐规整，紧凑高层、开敞高层、稀疏树林类型比例不断上升，并且稀疏树林类型逐渐占据主导。从各 LCZ 类型的具体空间分布演进特征来看（图 4），紧凑高层类型自二环向三环和四环方向持续扩张；紧凑低层类型则呈现出全局收缩的趋势。到 2020 年，仅二环内、五环外和四环与五环之间的局部区域留有紧凑低层。开敞高层类型则在 2010 年呈现急增趋势，并由四环外逐步蔓延至三环以内。总体上，四环以内的城市空间形态以紧凑高层、紧凑中层和紧凑低层等建设类型为主导，并且紧凑高层类型的面积不断扩大，持续吞噬紧凑中层和紧凑低层类型（图 5）。五环附近成为建设类型和自然类型的过渡地带。五环以外，空间形态以浓密树林、稀疏树林和低矮植被等自然类型为主，并且低矮植被类型在 2010 年后迅速被稀疏树林类型所取代。

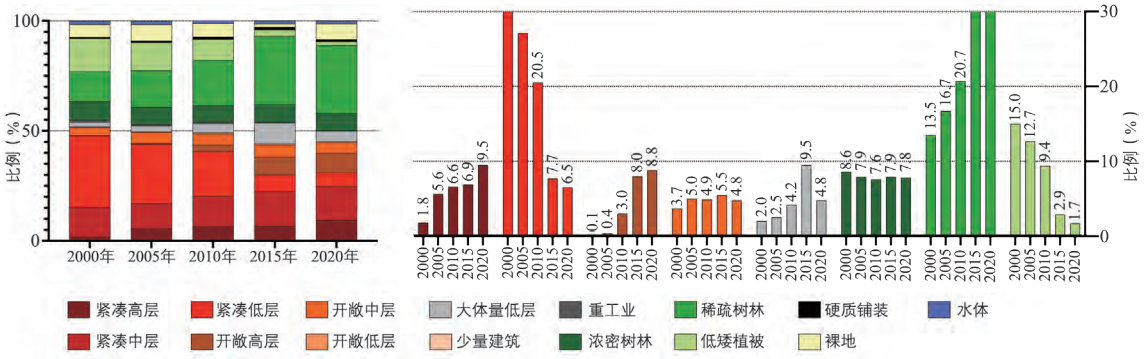


图 3 2000—2020 年北京中心城区各 LCZ 类型的用地比例构成和部分类型变化趋势

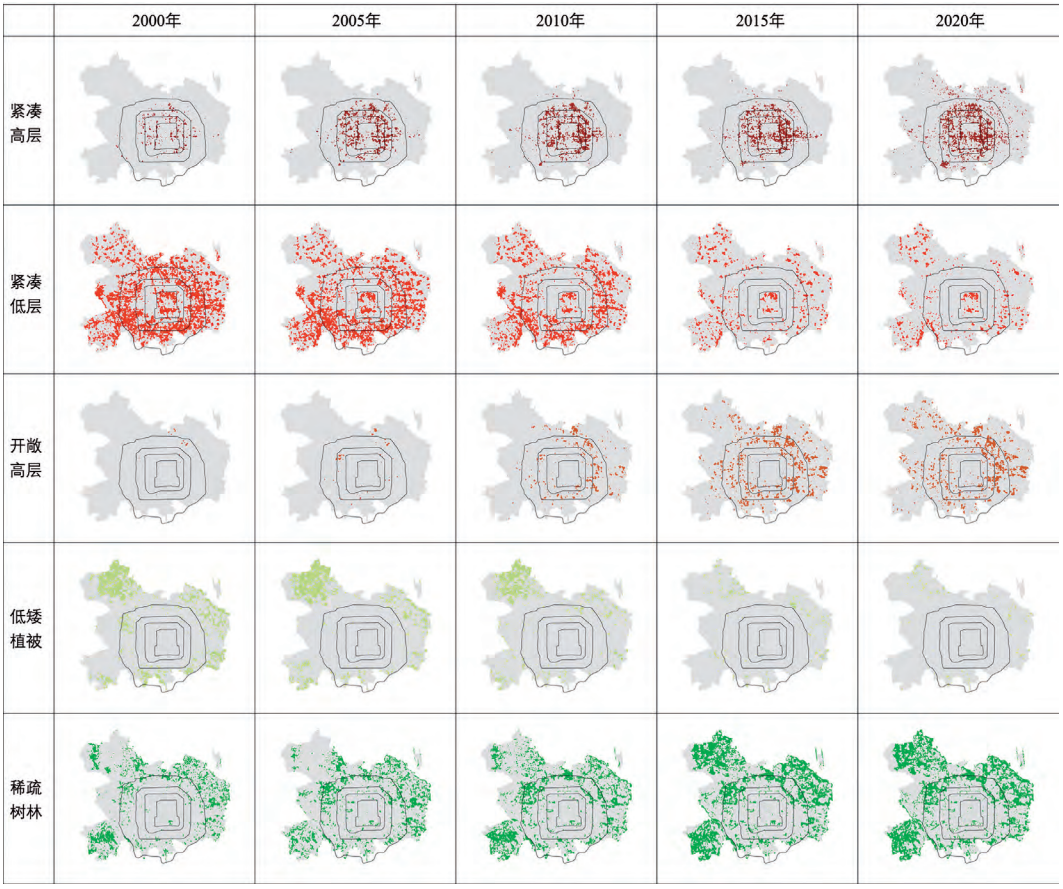


图 4 北京 2000—2020 年部分占比较大的 LCZ 类型空间演进特征

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 城市空间形态演进的政府驱动力

张庭伟指出，城市空间形态演进受市场力、政府力和社会力三者因素综合驱动[30]。耿慧志则指出，在中国的语境下，政府政策因素占据主导作用[31]。本文也发现尽管北京空间形态的演进变换遵循城市发展的自然逻辑，但在相当程度上也受到政策制度的影响，特别是受城市总体规划确定的城市发展战略影响（图 6）。

《北京城市总体规划（1991—2010 年）》实行增量发展战略，指出城市布局要由市区向市郊转移，并逐步开发边缘集团等思路①，这直接导致了 2000 年前后五环及其外围杂糅无序的空间形态扩张。城市历史风貌保护与分圈层高度控制的策略，则使得二环以内旧城中的空间形态以紧凑低层为主，高层类型转向二环以外的地区进行开发建设。对城郊农村居民点实行统一规划、集中建设原则的提出，推动郊区居民点逐步呈现出点状的紧凑低层类型布局特征。

《北京市城市总体规划（2004—2020 年）》明确了北京市域“两轴—两带—多中心”的城市空间结构，这使得紧凑高层沿长安街东西轴发展的趋势明显。以新城疏解中心城人口和部分职能，改造城中村，优化调整用地布局等策略目标的提出②，则直接导致了城市内部紧凑低层类型的快速消失，以及大体量低层类型的空间迁徙，城市外围组团式空间形态逐渐成型。

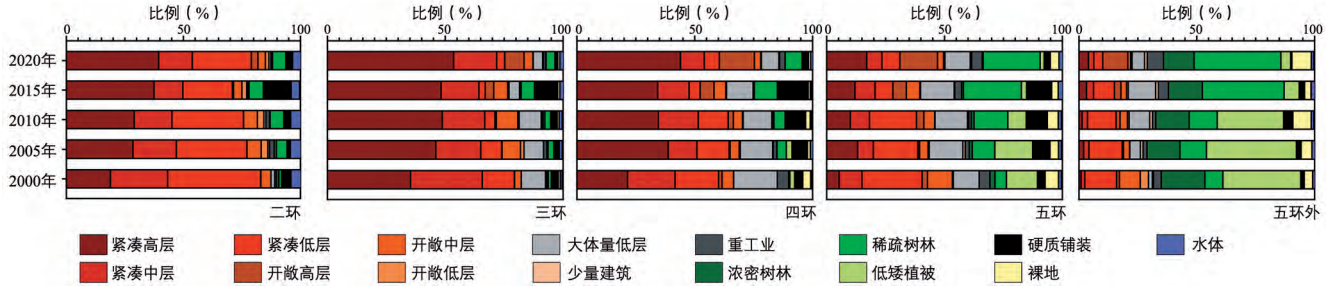


图 5 北京 2000—2020 年 LCZ 类型在各区域内的比例分布

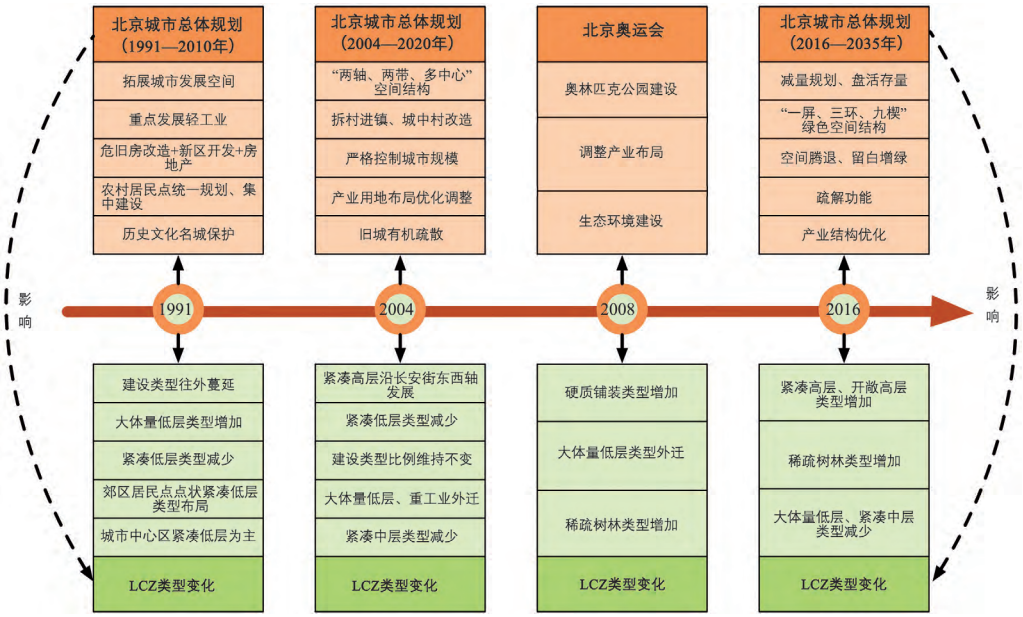


图 6 部分规划政策和大事件对 LCZ 类型变化的影响

① 《北京城市总体规划（1991—2010 年）》指出“边缘集团是市区的组成部分，要分别不同情况逐步进行综合开发，安排一定的住宅和配套设施以及部分产业，分散中心地区建设的压力”。

② 《北京城市总体规划（2004—2020 年）》指出要调整工业用地比例，搬迁改造传统工业；调整改造与城市整体发展不协调的地区，整治“城中村”；调整仓储物流设施布局，搬迁整治中心地区的小商品批发市场。加强仓储物流设施的布局调整，在四环路和五环路附近安排为中心城服务的综合物流园及专业物流园，在丰台五里店建设综合物流园，在海淀四道口、丰台玉泉营等地区建设专业物流园。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

《北京城市总体规划（2016—2035年）》进一步提出要严控中心城区建设用地总量，实行减量规划，高效利用存量产业用地，疏解腾退区域性商品交易市场和区域性物流基地，引发了城市空间形态向紧凑高层、开敞高层等类型发展，大体量低层类型（如批发市场等）迅速下降的趋势。而留白增绿、生态城市、森林城市等发展理念在一定程度上催生了更多城市公园、街头绿地的建设，使得稀疏树林类型得到迅猛发展。

此外，文化大事件也对城市空间形态演进起到了有力的推动作用。2008 年北京奥运会的举办不仅推动了城市文化品位的再造与提升，促进了社会融合和经济转型，而且激发了城市空间形态的品质化发展。奥林匹克公园、鸟巢、水立方等一系列公共设施的建设，激发了居民住区、商业、文化、科技等功能空间在其周边的集聚。原有的城中村、老旧小区等紧凑低层类型空间最终被开敞高层、稀疏树林、紧凑高层等类型空间所取代。

总体上，北京中心城区的紧凑高层类型多位于商业办公区和部分居住区。这是因为随着社会经济的发展、人口城镇化进程的不断推进，城市对就业空间和居住空间的需求不断上升，引发了“向天空要空间”的建设趋势。城市中心区紧缺的土地资源，迫使其空间形态向紧凑高层类型发展，并由城内往城外逐渐扩张。紧凑中层类型多位于教育设施、单位小区、行政机关等用地中，因用地权属、经济成本等原因使得教育设施、行政机关用地内的空间形态更替缓慢，而单位小区内的中层住宅直接被更高强度的商业开发所蚕食的现象时有发生。

4 城市空间形态对应的地表温度、地表热岛及其产生机制

4.1 城市空间形态对应的地表温度和地表热岛强度

尽管各 LCZ 类型的空间分布和占比在城市发展过程中遵循不同的演进模式，但统计结果表明，各 LCZ 类型所对应的地表温度和地表热岛强度在不同时空条件下表现出较高的一致性（图 7）。在地表温度上，建设类型比自然类型更高，并呈现出由大体量低层、重工业、紧凑中层、紧凑低层、紧凑高层向绿地、水体等类型依次下降的趋势。各空间形态类型的地表热岛效应也与地表温度之间表现出一致性，即大体量低层、重工业、紧凑低层等类型的地表热岛效应最强，稀疏树林、低矮植被等类型的地表热岛效应较弱。

以地表热岛强度在 1.5 个标准差以上区域视为高温热岛区。可以发现高温热岛区在 2000—2010 年间持续减少，其比例由 19.77%（2000 年）下降至 11.36%（2010 年）。其空间分布则由五环内逐渐向中心城南部片区收缩（图 8），这与城市空间形态的变化演进具有较高的一致性，尤其是紧凑低层类型的收缩减少。通过进一步分析发现，高温热岛区主要集中在紧凑中层、紧凑低层和大体量低层，在研究区内的比例分别为 2000 年的 5.1%、11.5%、1.3%，2005 年的 3.3%、8.5%、1.9%，以及 2010 年的 1.9%、6.1%、2.6%。2010 年后，随着紧凑低层类型的快速减少，地表热岛呈现出空间再分布的趋势，但高温热岛区仍然集中在紧凑中层、紧凑低层和大体量低层。此外，大体量低层中更容易出现高温热岛区，其比例超过 50%，而紧凑低层出现高温热岛区的比例也超过 30%。

4.2 城市空间形态不同地表温度和热岛效应产生机制

地表覆盖类型、人口活动强度、城市三维空间形态是影响区域内地表温度分布和地表热岛效应的主要因素。总体上，北京各主要 LCZ 类型对应的地表温度由低到高依次为：浓密树林、水体、稀疏树林、低矮植被、开敞高层、开敞中层、紧凑高层、紧凑低层、紧凑中层、重工业和大体量低层（图 7）。造成这种结果的原因，可从不同城市空间形态类型与地表温度之间的作用机制中反映出来。绿地、水体等自然类型比紧凑、开敞等建设类型地表温度更低，是因为少量的人口活动和热量集聚，地表对太阳的辐射吸收程度也较低，使得绿地水体等通常成为城市中的“冷岛”。

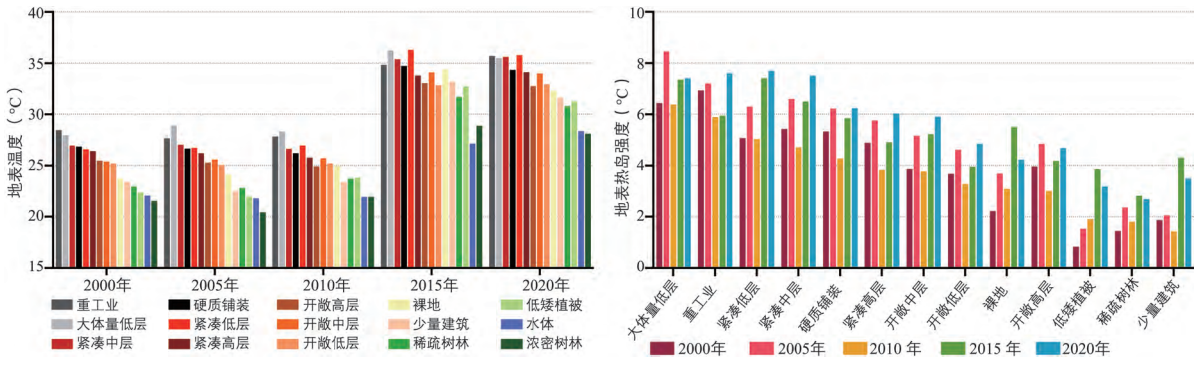


图 7 2000—2020 年各 LCZ 类型对应的平均地表温度和平均地表热岛效应强度

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

尽管高层形态类型比低层形态类型具有更高的开发强度和更稠密的人口，但值得注意的是，高层建筑所提供的建筑阴影可以大幅减少到达地表的太阳辐射能量，而高层建筑因消防需求所规定设计的开敞空间和建筑间距更为空气的流通提供了便利，从而导致高层空间形态类型比低层空间形态类型具有更低的地表温度和热岛效应强度。紧凑低层形态类型由于其高密度的建筑、稀少的绿化、狭窄的街巷空间，很容易导致热量累积，进而成为城市中高温热岛区域。此外，开敞空间形态类型比紧凑空间形态类型具有更低的开发强度和更多的绿地空间，从而使得开敞空间形态类型比紧凑空间形态类型具有更低的地表温度和热岛效应强度。大体量低层和重工业类型因其大体量的建筑形态、深色金属屋顶材料的较多采用，以及能源消耗高等原因，通常成为城市中热量集聚的区域，其地表温度普遍偏高，容易成为城市中高温热岛区。

5 优化空间形态，缓解城市热岛效应的规划策略应对

优化城市空间形态是城乡规划的核心工作之一。尽管通过拆除重建等方式直接改变空间形态类型是缓解城市热岛效应的有效途径和方式，如把紧凑低层老旧住区重建为开敞高层住区。但这种做法常常破坏了地方特色空间和形态，引发“千城一面”的问题，如北京近年来大量消失的胡同住区。并且，拆除重建还会因拆迁和建设成本高昂、产权协调困难等，使得经济要素成为主要的建设考量，而环境、文化、生态等诉求变成附属，导致发生一些不可持续的城市再开发行为。因此，现阶段基于存量建设进行的空间形态微改造亦十分必要。

城市空间形态优化首先需要进行系统评估，涉及社会历史价值、经济成本、工程改造难度等不同要素；其次针对不同的空间形态类型提出适应性的改造策略，包括物质环境的改善、能源系统的更新、公共服务设施和开敞空间的配套等。针对城市热岛效应缓解的空间形态改进行动往往需要在不同尺度上开展工作。一方面，在宏观层面上对城市结构和用地布局进行优化。例如：基于城市道路网络，建设连接城市内外蓝绿空间的通畅风廊系统；优化城市用地布局，避免高密度形态类型连绵成片，尤其是地表热岛强度较高的重工业和大体量低层类型；对于部分能耗高、热量排放大的产业，可以考虑将其从城市中心区搬迁出去，以减弱城区内的热岛效应强度。另一方面，逐步推进中微观尺度的局部空间形态优化。例如：以商业办公为主的紧凑高层类型，考虑将其转变为更适宜步行的街区，减少深色硬质铺装，合理增加景观绿地和水体比例；紧凑低层住区由于开敞用地稀少，可以考虑通过增加垂直绿化或屋顶绿化的方式来降低地表温度，缓解地表热岛效应。此外，还可以通过推广可再生能源（如太阳能和风能等）的使用，减少区域内人为热量的排放。

6 结语

综上所述，本研究基于城市局地气候区的空间形态分类体系，综合多源影像数据，探讨分析了北京 2000 年后城市空间形态及其对应的地表温度、地表热岛分布变化情况。研

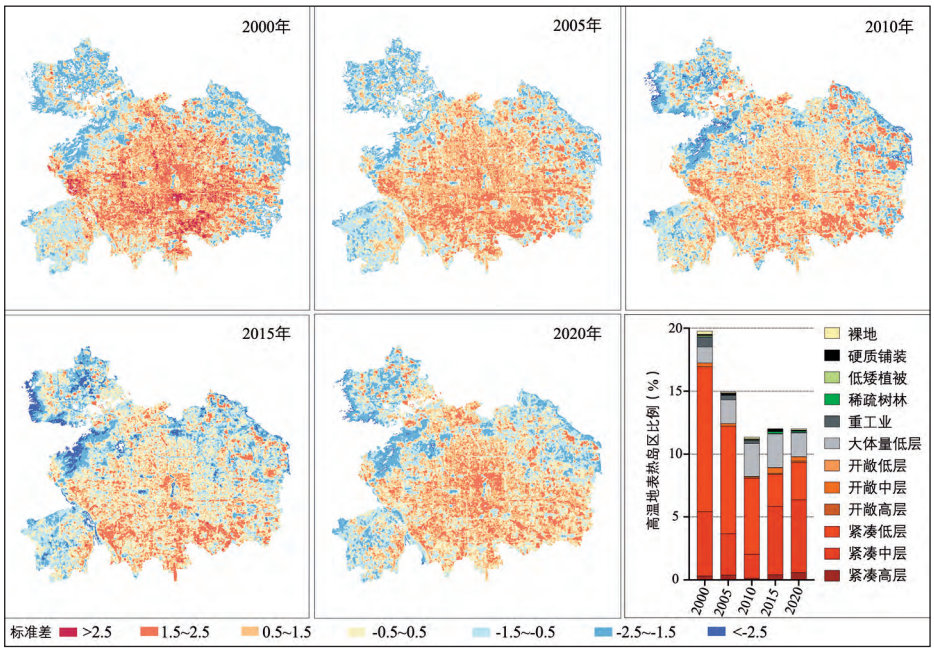


图 8 北京 2000—2020 年地表热岛分布和高温热岛区类型

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究表明，受经济成本和政府政策等要素的制约，不同城市空间形态类型遵循各自的发展脉络，而空间形态演进强烈影响了城市地表热岛变化。对高精度、系统性的城市空间形态分类及其演进特征进行分析，不仅可以进一步揭示城市空间的发展规律，也为差异化、针对性的城市热岛效应优化改善策略提供了参考。同时，本研究亦存在不足之处：如深度学习分类准确度还有待进一步提升，仅研究分析了各形态类型的地表温度和地表热岛效应情况，没有考虑人群分布及其健康状况等。为更好地给规划决策提供支持，未来有必要探索建立集成多指标（温度和湿度等）、空间形态、人群特征、规划模拟等多要素一体化的热环境影响评估体系。UPI

注：文中未注明资料来源的图表均为作者绘制。

参考文献

[1] OKE T R, MILLS G, CHRISTEN A, et al. Urban climates[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017: 3-10.

[2] 韩贵锋，蔡智，谢雨丝，等．城市建设强度与热岛的相关性——以重庆市开州区为例 [J]. 土木建筑与环境工程，2016, 38(5): 138-147.

[3] MANOLI G, FATICHI S, BOU-ZEID E, et.al. Seasonal hysteresis of surface urban heat islands[J]. Proceedings of the national academy of sciences. 2020, 117(13): 7082-7089.

[4] TAN J, ZHENG Y, 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.

[5] ROXON J, ULM F J, PELLENQ R M. Urban heat island impact on state residential energy cost and CO_2 emissions in the United States[J]. Urban climate, 2020, 31: 100546.

[6] SARRAT C, LEMONSU A, MASSON V, et al. Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. [J]. Atmospheric environment, 2006, 40(10): 1743-1758.

[7] 埃维特·埃雷尔，戴维·珀尔穆特，特里·威廉森．城市小气候 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2014: 67-70.

[8] LAI D, LIU W, GAN T, et al. A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces[J]. Science of the total environment, 2019, 661: 337-353.

[9] SANTAMOURIS M. Cooling the cities–a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments[J]. Solar energy, 2014, 103: 682-703.

[10] GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity[J]. Science of the total environment, 2017(584/585): 1040-1055.

[11] ZHAO Q, SAILOR D J, WENTZ E A. Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment[J]. Urban forestry & urban greening, 2018, 32: 81-91.

[12] BARTON H, GRANT M. Urban planning for healthy cities[J]. Journal of urban health, 2013, 90(1): 129-141.

[13] CHEN X L, ZHAO H M, LI P X, YIN Z Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes[J]. Remote sensing of environment, 2005, 104(2): 133-146.

[14] YANG R, ZHANG J, XU Q, et al. Urban-rural spatial transformation process and influences from the perspective of land use: a case study of the Pearl River Delta Region[J]. Habitat International, 2020, 104: 102234.

[15] LI G, SUN S, FANG C. The varying driving forces of urban expansion in China: insights from a spatial-temporal analysis[J]. Landscape and urban planning, 2018, 174: 63-77.

[16] ROSENTRETER J, HAGENSIEKER R, WASKE B. Towards large-scale mapping of local climate zones using multitemporal Sentinel 2 data and convolutional neural networks[J]. Remote sensing of environment, 2020, 237(C): 111472.

[17] DEMUZERE M, HANKEY S, MILLS G, et al. Combining expert and crowd-sourced training data to map urban form and functions for the continental US[J]. Scientific data, 2020, 7(1): 1-13.

[18] STEWART I D, OKE T R. Local climate zones for urban temperature studies[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(12): 1879-1900.

[19] PEIRÓ M N, SÁNCHEZ C S, GONZÁLEZ F N. Source area definition for local climate zones studies. a systematic review[J]. Building and environment, 2019, 148: 258-285.

[20] CAI Z, TANG Y, CHEN K, et al. Assessing the heat vulnerability of different local climate zones in the old areas of a Chinese megacity[J]. Sustainability, 2019, 11(7): 2032.

[21] CAI Z, TANG Y, ZHAN Q. A cooled city? comparing human activity changes on the impact of urban thermal environment before and after city-wide lockdown[J]. Building and environment, 2021, 195: 107729.

[22] 蔡智，韩贵锋．山地城市空间形态的地表热环境效应——基于 LCZ 的视角 [J]. 山地学报，2018, 36(4): 617-627.

[23] VANDAMME S, DEMUZERE M, VERDONCK M L, et al. Revealing Kunming's (China) historical urban planning policies through local climate zones[J]. Remote sensing, 2019, 11(14): 1731.

[24] WANG R, CAI M, REN C, et al. Detecting multi-temporal land cover change and land surface temperature in Pearl River Delta by adopting local climate zone[J]. Urban climate, 2019, 28: 100455.

[25] Chen G, Xie J, Li W, et al. Future "local climate zone" spatial change simulation in Greater Bay Area under the shared socioeconomic pathways and ecological control line[J]. Building and environment, 2021, 203: 108077.

[26] Zhao C, Weng Q, Hersperger A M. Characterizing the 3-D urban morphology transformation to understand urban-form dynamics: a case study of Austin, Texas, USA[J]. Landscape and urban planning, 2020, 203: 103881.

[27] KHAMCHIANGTA D, DHAKAL S. Future urban expansion and local climate zone changes in relation to land surface temperature: case of Bangkok Metropolitan Administration, Thailand[J]. Urban climate, 2021, 37: 100835.

[28] HE X, WANG J, FENG J, et al. Observational and modeling study of interactions between urban heat island and heatwave in Beijing[J]. Journal of cleaner production, 2020, 247(C): 119169.

[29] SEKERTEKIN A, BONAFONI S. Land surface temperature retrieval from landsat 5, 7, and 8 over rural areas: assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation[J]. Remote sensing, 2020, 12(2): 294.

[30] 张庭伟．1990 年代中国城市空间结构的变化及其动力机制 [J]. 城市规划，2001(7): 7-14.

[31] 耿慧志，陶松龄．政策影响城市空间形态的综述分析和研究对策——基于提升城市生活质量的思考 [J]. 国际城市规划，2013, 28(1): 11-14.

（本文编辑：高淑敏）

本文更多增强内容扫码进入

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net