空间形态分区视角下的城市更新热环境影响分析

刘畅　唐燕（通讯作者）　蔡智

引言

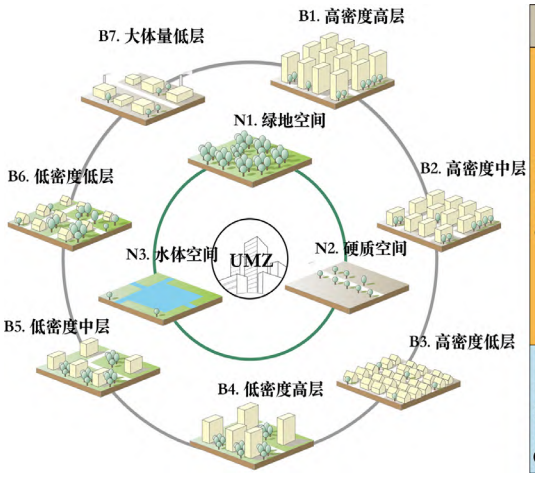
全球气候变暖和快速城市化使得城市高温热浪灾害频繁出现[1]，对城市可持续发展提出巨大挑战，也对城市居民健康、建筑环境舒适、能源可持续等造成严重威胁。由于长期暴露于高温热浪之中，居民的身体和心理健康受到显著危害，高风险人群的疾病发病率和死亡率也不断增加[2]，尤其是儿童、老年人和其他社会弱势群体[3]。城市热岛效应也会加快光化学烟雾形成，以及水体藻类的繁殖，加剧城市空气污染和水体质量的恶化[4]，城市基础设施、建筑的质量和耐久性也会因高温受到破坏。为抵御高温天气，城市能源消耗需求加大，使得碳排放和人为热排放水平上升，也会反过来进一步恶化城市热环境[5]。因此，如何缓解城市热岛效应，成为气候变化、自然灾害、规划设计等领域的重要研究课题。

减缓热岛效应的方法和措施主要包括改善建筑及其材料的热性能、增加蓝绿空间、城市的合理规划等[6]。大量研究表明，建成区的不透水地面及房屋建筑对城市热环境的影响显著，通过合理规划优化城市空间形态是改善城市热环境的主要且有效手段[7]，可以从根本上帮助缓解和改善城市热岛效应。因此，在“存量提质”的城市高质量发展背景下，城市更新作为现阶段特大城市发展的主要路径，是实现城市空间形态演变、提高地表覆盖和建筑热性能、打通城市通风廊道、优化城市生产布局的主要途径，也是改善城市热岛效应的重要抓手。

目前，城市热环境研究多聚焦在热岛现象的特征、成因及其主要影响因素等方面[8]，而针对城市空间形态与热环境交互关系的相关研究，主要围绕建设用地演变格局[9]、景观斑块格局[10]、空间形态三维特征[11]等内容展开分析，较少从成因机制视角探讨城市更新行动对热环境的影响，对于不同的城市空间形态更新模式，更是缺乏系统的热环境影响评估研究。基于此，本文以2010—2020年多源卫星遥感数据为主要数据源，从城市三维空间形态视角切入，测度近十年北京市中心城区的城市更新模式和地表温度变化关系，系统评估高密度低层区在不同更新模式下的热环境影响机制，从而为城市更新行动中的热环境改善方案提供决策支撑和依据。

研究方法

本研究选取人口密度较高、建成密度较高的北京市中心城区为研究对象，区域内分布多个大型公园和少量河流、湖泊等。近十年间，北京市中心城区建设用地规模依据减量发展的目标要求，转向以存量更新为主的城市发展模式。研究利用2010—2020年多源卫星遥感数据



城市空间形态类型		常见的城市用地及功能解释
建成区(B)	B1. 高密度高层	CBD、高强度开发住宅及办公
	B2. 高密度中层	老旧城市中心、商业街
	B3. 高密度低层	城中村、老旧小区
	B4. 低密度高层	典型的高层住房开发模式
	B5. 低密度中层	高质量小区、学校
	B6. 低密度低层	别墅区、部分农村居民点
	B7. 大体量低层	工业厂房、物流中心、批发城
自然地表(N)	N1. 绿地空间	公园、绿地、森林
	N2. 硬质空间	道路广场、拆迁中用地、停车场
	N3. 水体空间	河流、湖泊

图1“二级十类”的城市空间形态分区框架（作者自绘）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

（Landsat系列、Sentinel系列等），建构了“二级十类（二级为建成区和自然地表，十类细分为高密度高层、低密度低层等）”的城市空间形态分区方案（图1）[12]，并使用机器学习技术识别不同城市空间形态类型的具体分布和变化情况[13]，得到分析城市更新影响热环境变化规律的基本数据支撑。

城市热岛的产生及其变化是人工环境和自然条件交互作用的结果，快速城市化导致的高强度、大规模的人居环境建设和生产生活活动的集聚，是城市热岛效应增强的重要原因[14]。从形成机理上看，一方面，随着城市建成区面积的增加，自然透水地表减少，原始下垫面的自然条件发生改变，城市热岛效应随之加剧[15]；而土地覆盖模式、城市空间形态和建筑材料等也对城市热环境产生显著影响[16]。另一方面，生产生活行为引发的能源利用以及人为热，与城市热岛效应也存在显著正相关关系[17]。学者们根据关注对象和观测手段的差异，将城市热岛细致划分为基于从屋顶到大气高度测量的边界层热岛、基于从地面到屋顶空气温度测量的冠层热岛，以及基于地球表面测量温度的地表热岛[18]。地表热岛是通过计算建成区与非城市地区（如水体、植被等）之间的地表温度差来衡量的，由于人类的室外活动主要集中在地球表层，其对人体热舒适度影响显著，因此本文选取地表温度来测度地表城市热岛效应强度。

为减少传感器误差和天气差异造成的温度对比误差，研究采用2010年8月8日、2010年8月16日、2020年8月3日、2020年8月11日的Landsat系列遥感影像进行地表温度反演，将温度数据进行归一化处理，并使用多个时期内的平均值作为表征值。研究发现表明，由于短波辐射的减少和蒸散作用，植被覆盖和城市地表温度之间呈现出显著的负相关[19]，因此本文使用归一化植被覆盖指数NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）来监测不同城市更新模式下的绿地覆盖及变化情况。

城市更新模式及地表温度变化

城市空间形态的更新模式及其空间分布

2010—2020年的近十年来，北京城市空间形态类型逐步从“高密度低层”向“高密度高层”“低密度高层”等发展，城市生态格局和通风廊道逐渐明晰。造成北京中心城区里形态改变的城市更新方式涉及危旧楼房更新、老旧厂房改造、首都功能核心区平房（院落）更新等，主要通过“拆除重建”和“局部拆改”的功能转变等，重构城区整体形态和街区建筑组合模式。这个过程不同程度优化了地表和建筑的热性能，通过预留城市通风廊道、改善生产生活方式等，推进城市热环境优化。

从城市空间形态类型的分布来看（图2），2010年北京市中心城区建成区内以高密度低层形态类型为主导，约占总用地规模的20%，主要分布在二环以内的老城胡同区，以及四、五环外开发程度较低的区域；高密度中层和高密

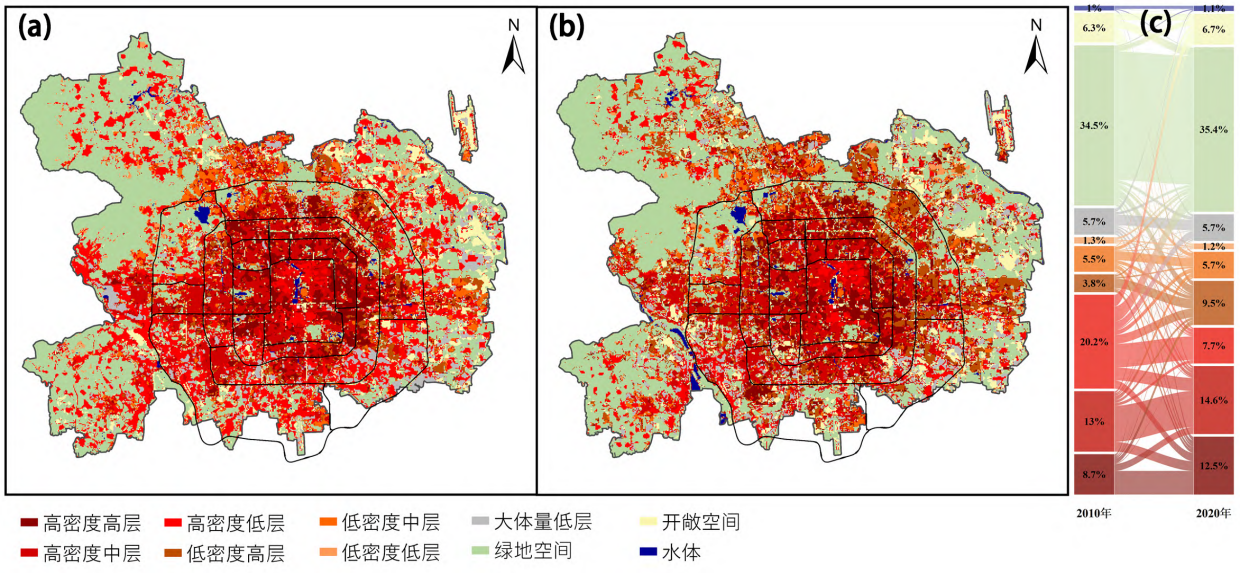


图2 北京2010年（a）及2020年（b）城市空间形态类型分布；北京2010-2020年城市空间形态类型构成及转化（c）（作者自绘）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度高层稍次之，均占总用地规模的10%左右，主要分布在二环至五环之间的高密度建成区；低密度形态类型（低密度高层、低密度中层等）和大体量低层占比较低，均低于6%，主要分布在四环以外的建成区。城市的非建设区占总用地规模的41%，以绿地空间为主导，主要为颐和园片区、奥林匹克森林公园片区、天坛公园和南四环外郊野公园等面状绿隔空间和公园绿地区域；水体占7%，以公园绿地中的河湖水系为主。

2020年后，城市建成区内的空间形态类型以中、高层为主导，高密度高层和中层均占到总用地规模的12%—14%，主要分布在五环内的高密度建成区，并逐渐呈现出组团式态势；低密度高层迅速上升，约占总用地规模的9%，主要分布在三环外区域，是十年间城市更新所引发的主要的形态增长类型；高密度低层下降了13%，是十年间城市更新带来的主要形态减少类型，其空间分布集聚在长安街以北的历史文化保护区和和四环外的老旧小区片区，长安街以南区域也有少量分布；低密度中层、低层和大体量低层占比较低，均低于6%，主要分布在四环以外的建成区。总体上，北京中心城区的建成空间呈现出“单核心、多中心”的放射式分布，即以首都功能核心区为中心，沿城市道路和生态廊道两侧向外围发展，连接各区级中心。城市的非建设区，规模变化不显著，但从空间分布上看，相较于2010年，2020年的城市通风廊道和生态格局逐渐明晰。

从城市空间形态演变来看，2010—2020年间，“高密度高层”和“低密度高层”成为北京市中心城区主要的更新目标类型，均呈现出由外围向核心地区逐步增长、持续吞噬的态势。近十年，北京中心城区内城市更新的实施对象以高密度低层形态类型为主，更新方式主要为“拆除重建”，更新后的空间形态类型包括高密度中层、高密度高层、低密度高层和绿地空间等。值得注意的是，五环以内原有的城中村、老旧小区基本上被更高建设强度的商业办公、居住区所取代，而五环以外的城中村地区则通过“拆退还绿”被更新为绿地空间。这种拆除重建式的更新方式导致高密度低层形态类型呈现出全局收缩的趋势，到2020年，仅分布在二环内和四环外的局部区域。随着城镇化发展不断推进，中心城区土地资源紧缺、空间供给需求不断提升，迫使城市建设向更高强度发展，使得高密度中层更新为高密度高层、低密度高层等类型，部分教育用地、单位小区、行政机关等亦被更高建设强度的商业办公所取代。

城市“微更新”涉及老旧小区改造、老旧楼宇改造、首都功能核心区平房（院落）改造等，其空间形态类型基本维持不变，具体更新手段包括环境整治、织补局地蓝绿功能、优化建筑外墙材料等。从空间分布上看，北京市中心城区内实施微更新的空间形态类型以高密度低层、高密度中层和高密度高层等为主，主要聚集在四环以内区域。这些形态

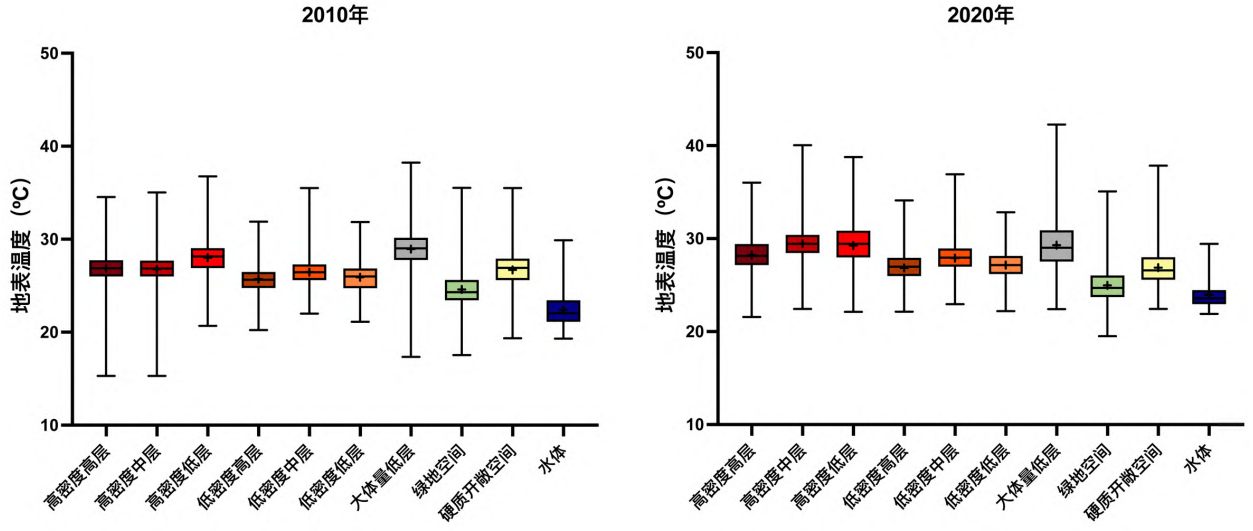


图3 北京市中心城区2010年、2020年各空间形态类型的地表温度
（作者自绘）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

类型因拆迁成本、历史文化保护等原因，均在原地被较好地保留下来。具体来看，高密度高层、高密度中层等形态类型维持原样的比例均超过90%，而四环外的低密度低层形态类型虽有少量被拆除重建为其他类型，但80%以上的规模仍维持不变。此外，五环外的绿地空间也少有变化，其总体用地比例均维持在34%左右。

城市空间形态类型的地表温度及变化

不同城市空间形态类型的平均地表温度存在较大差异，并表现出由大体量低层、高密度低层、高密度中层、高密度高层、低密度中层、绿地空间、水体等依次下降的趋势（图3）。其原因主要是受地表覆盖类型、城市三维空间要素、人口活动强度等要素的影响。具体来看，不透水地表比自然地表类型会更加剧城市热岛效应，因为少量的人口活动和热量集聚以及自然地表对太阳辐射的较低吸收，使得蓝绿空间具备“冷岛效应”[19]，其地表平均温度最低。建筑密度的增加导致地表温度上升，低密度空间相较于高密度，具有较少的人口活动、热量集聚及更多的绿地和开敞通风机会，因此低密度形态具有更低的地表温度。而建筑高度的提升会在一定程度上降低地表温度，这是因为高层建筑所提供的建筑阴影遮挡了一部分太阳辐射能量，并且可利用因消防需求所规定的开敞空间和建筑间距来规划设计布局合理的通风廊道，使得热量可更便捷地交换出去。此外，大体量低层形态多为工业、大宗商品批发等场地，因大体量、低层和高密度布局，高能源消耗、低蓝绿空间，以及建筑材料多采用深色金属屋顶等原因，往往成为城市的高温热岛区域。

从地表温度的空间分布来看，受到近年来高温热浪的气候变化严重影响，2010–2020年间北京市中心城区地表温度持续上升。高温区域由五环外高密度低层导致的散点式分布，逐渐向四环内连片式集聚（图4），在海淀和朝阳北部也有“飞地式”高地表温度区域，与高密度低层、中层和大体量低层的空间分布保持较高的一致性。在海淀和丰台西部，由于大面积高密度低层的城中村更新改造，以及部分工业向外迁徙，使得中心城区西部出现局部地表温度下降态势。此外，从温度范围的变化上来看，经过十年更新行动，高密度高、低层，低密度高层，大体量低层等同形态类型区域的地表温度，呈现出愈加显著的空间分异特征（图3），表明城市更新行动在热环境改善中产生了差异性影响：一方面，不同空间形态类型的城市更新，在缓解城市热岛方面的做法和效用不尽相

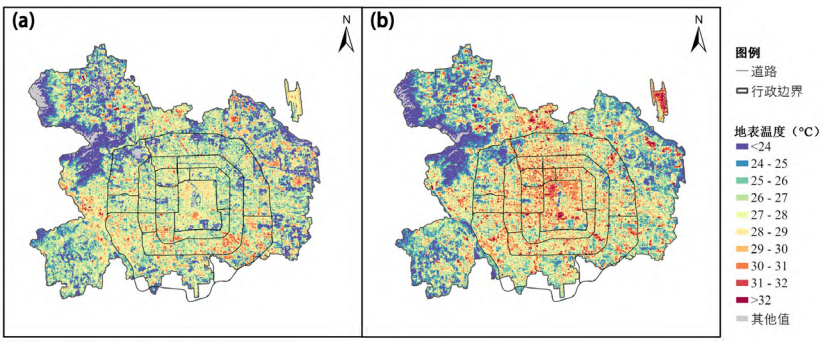


图4 北京市中心城区2010年(a)、2020年(b)地表温度分布
（作者自绘）

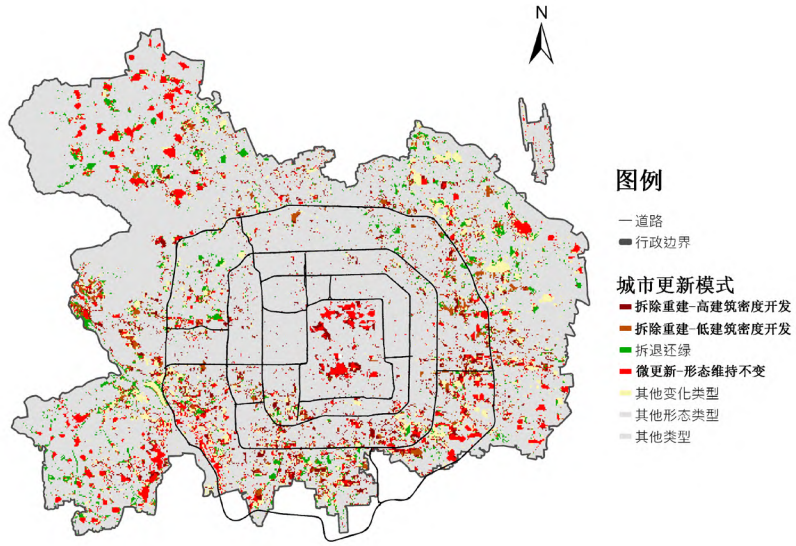


图5 北京高密度低层形态类型的更新模式（2010-2020年）
（作者自绘）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

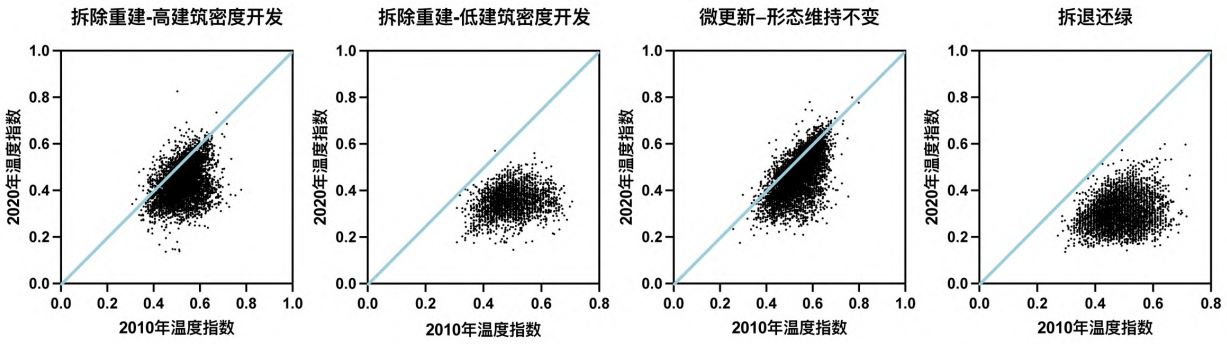


图6 高密度低层形态类型不同更新模式下2010年及2020年温度指数散点图（浅蓝线上方说明热环境变恶劣，反之则代表改善）（作者自绘）

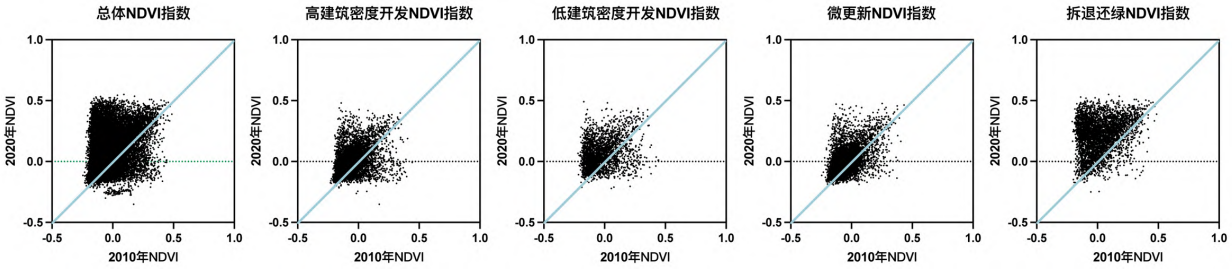


图7 高密度低层形态类型不同更新模式下2010年及2020年NDVI指数散点图（浅蓝线上方说明植被覆盖增加，反之则代表减少）（作者自绘）

同；另一方面，城市热岛的产生及其变化是多种因素共同作用的结果。

不同更新模式下高密度低层住区的地表温度评估

“高密度低层”形态类型是2010–2020年北京市的核心更新实施对象，也是中心城区的地表高温集聚区。高密度低层形态类型主要为城中村、老旧小区和首都功能核心区平房（院落）等居住空间，2010年占据建成区规模的三分之一，在中心城区内呈现为连片式分布。2010–2020年北京市针对高密度低层住区展开了一系列城市更新行动，可以归结为三类（图5）。

一是微更新类，即空间形态类型基本维持不变，主要针对首都功能核心区内传统胡同保存程度较好的地区、历史文化保护区内的平房（院落）等。这些空间在符合《北京历史文化名城保护条例》有关规定及相关技术标准的前提下，通过申请式腾退来开展保护性修缮和恢复性修建，优先保障中央政务功能和完善地区公共服务设施。受经济成本、工程改造难度、居民意愿、物质环境因素等不同要素的影响，一些条件成熟的老旧小区、城中村也开展了微更新改造，此类项目在五环外呈组团式分布，在中心城区呈散点式分布。

二是拆除重建类，通常是拆除原建筑并替换为更高建设强度的空间形态类型（包括高建筑密度和低建筑密度），主要针对首都功能核心区内的部分危旧楼房。这些危旧楼房基于核心区内土地资源紧缺的现实条件，通过改建、扩建、拆建的方式进行更新，改造后建设为高密度中层和高密度高层等形态类型。而三环外的城中村和老旧小区，则主要通过拆旧建新来开发建设为低密度高层、低密度中层等形态类型。

三是拆退还绿类，主要是部分城中村、老旧小区中的拆旧还绿行为，以四环外城中村为主，通过织补城市蓝绿空间、融入城市生态格局，为城市提供“冷岛”效应。

从地表温度的变化趋势来看，微更新类空间变化最小，拆除重建类空间地表温度有所降低，而拆退还绿类空间的地表温度下降最为明显（图6）。这其中，地表覆盖类型的变化，尤其是绿地覆盖的变化发挥着至关重要的角色。北京近几年大力推行绿色、生态城市理念，进行了大量的绿化建设。相比于2010年，北京2020年总体的NDVI指数上升趋势明显，植被覆盖大幅提升，高密度低层形态类型内的热岛效应有所缓解（图7）。同时，在不同更新模式下，绿地的增加程度也存在较大差异，这进一步导致地表温度的差异性变化：首先，微更新类型因空间形态基本维持不变，植被覆盖水平变化不显著，地表温度变化也不明显；部分区域因植被覆盖表现有所上升，地表温度也出现了一定程度的降低；其次，拆除重建类尽管被开发建设为更高强度的形态类型，如低密度高

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

层、高密度高层等，但其NDVI指数表现出明显的上升趋势，说明重建后建设了更多的绿地空间。但考虑到高强度开发所带来的人为热量排放提升，其对热环境的负面作用平衡了新增绿地的积极影响，从而导致地表温度的下降程度并不显著。而低建筑密度的更新方式相对于高建筑密度而言，NDVI指数上升趋势更为明显，使得高强度开发下的低密度模式带来的地表温度下降更显著；最后，拆退还绿型区域更新后，NDVI指数上升最为明显，植被覆盖程度显著增强，植被通过蒸散作用和减少短波辐射等减少热量的再排放，从而对周围的城市热环境优化产生显著影响。原有的植被覆盖水平越低、温度越高，拆退还绿型更新的地表温度下降越明显。

思考与总结

在气候变化加剧、城市热环境持续恶化的当前，政府决策者和规划人员需要更多关注和考虑城市热环境优化问题——结合城市更新发展趋势，深入研究城市更新对城市热环境的影响和作用机制，探寻城市更新背景下的热环境改善政策体系、规划策略和行动安排等。本研究表明，不同城市更新模式的热缓解作用存在差异性。为降低热岛效应，需要针对不同城市空间形态类型及更新模式，采用差异化、针对性的优化更新策略。

在北京中心城区，对于高密度低层住区的热岛效应缓解而言，微更新所产生的效用并不高；拆除重建模式影响较为明显，尤其是高建设强度下的低建筑密度开发；拆退还绿能显著改善城市热环境、缓解热岛效应。但从城市更新的“成本—收益”角度来看，同时兼顾城市风貌、历史文化、特点特色保护等诉求，北京中心城区依然需要重点推进城市微更新，基于微型绿地建设、优化地表和建筑材料等手段来推进环境整治，改善人居环境和缓解局地热环境问题。对于拆除重建式的更新，应进一步关注植被覆盖提升不足等问题，其优化策略还应包括增加透水铺装、增加垂直绿化、优化建筑布局等。拆退还绿型更新是目前高密度低层住区热缓解十分有效的途径，在当前北京城市土地资源紧缺和减量发展背景下，如何组织绿地斑块的形状、规模和布局，使有限的绿地能够发挥更大的降温效果，是拆退还绿更新的重点。

致谢：本文受国家自然科学基金项目“多源数据融合的城市高温脆弱性空间识别与城市设计策略应对”（编号51978363）、十四五国家重点研发计划“城市更新设计理论与方法”（编号2022YFC3800301）资助。

参考文献

1 Perkins S E, Alexander L V, Nairn J R. Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells[J]. Geophys. Res. Lett. 2012, 39 (20), L20714.

2 Zhao Q, Guo Y, Ye T, Gasparrini A, Tong S, Overcenco A, Urban A, Schneider A, Entezari A, Vicedo-Cabrera AM, Zanobetti A. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study[J]. The Lancet Planetary Health. 2021, 5(7):415-425.

3 Peng R D, Bobb J F, Tebaldi C, McDaniel L, Bell M L, Dominici F. Towards aquantitative estimate of future heatwave mortality under global climate change[J]. Environ. Health Perspect. 2011, 119, 701e706.

4 Lai L W, Cheng W L. urban heat Island and air pollution-An emerging role for hospital respiratory admissions in an urban area[J]. Journal of Environmental Health, 2010,72(06):32.

5 Shen T, Chow D H C, Darkwa J. Simulating the influence of micro-climatic design on mitigating the Urban Heat Island effect in the Hangzhou Metropolitan Area of China[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2016, 11(1), 130-139.

6 Leal Filho W, Echevarria Icaza L, Neht A, et al. Coping with the impacts of urban heat islands: A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 1140-1149.

7 杨朝斌,何兴元,张树文等.基于Landsat 8的城市热岛效应与地表因子关系研究——以长春市为例[J].干旱区资源与环境, 2016, 30(12): 110-115.

8 邱国玉,张晓楠.21世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战[J].地球科学进展,2019,34(06):640-649.

9 冯晓刚,石辉.西安城市热环境格局的动态演变[J].生态学杂志, 2012, 31(11): 2921-2925.

10 YUE W Z, LIU X, ZHOU Y Y, et al. Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities [J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 1036-1046.

11 岳文泽,刘学.基于城市控制性详细规划的热岛效应评价[J].应用生态学报.2016,27(11):3631-3640.

12 Cai Z, Demuzere M, Tang Y, Wan Y. The characteristic and transformation of 3D urban morphology in three Chinese mega-cities[J]. Cities. 2022:103988.

13 蔡智,唐燕,刘畅,马蒂亚斯·德米泽尔.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[J].国际城市规划,2021,36(05):61-68.DOI:10.19830/J.upi.2021.407.

14 徐伟,杨涵淏,张仕鹏等. 上海城市热岛的变化特征[J]. 热带气象学报, 2018, 34(2):228-238.

15 肖荣波,欧阳志云,李伟峰等.城市热岛的生态环境效应[J].生态学报, 2005, 25(8): 2055-2060.

16 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.

17 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.

18 Kaveh Deilami, Md. Kamruzzaman, Yan Liu. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures[J]. ITC Journal,2018,67: 30-42.

19 杜红玉.特大型城市“蓝绿空间”冷岛效应及其影响因素研究[D].华东师范大学,2018.

作者单位：清华大学建筑学院

责任编辑：文爱平

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net