城市空间形态及其构成对地表热岛效应的影响

The Impact of Urban Morphology and Its Composition on Surface Urban Heat Island Effects

唐　燕[1]　蔡　智[2*]
TANG Yan[1]　CAI Zhi[2*]

（1.清华大学建筑学院，北京 100084；2.浙江工商大学旅游与城乡规划学院，杭州 310018）
（1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing, China, 100084; 2. School of Tourism and Urban-Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou, Zhejiang, China, 310018）

文章编号：1000-0283(2025)09-0012-06
DOI: 10.12193/j.laing.2025.09.0012.002
中图分类号：TU986
文献标志码：A
收稿日期：2025-04-30
修回日期：2025-07-22

摘　要

快速城镇化导致城市空间形态发生巨大变化，进而影响热环境。基于Landsat 5/7/8卫星遥感影像，使用调整的局地气候分区方案，以北京和上海两个超大城市为案例，分析两地2000–2020年城市空间形态构成及其地表热岛效应的变化。研究发现，北京和上海在空间形态类型构成、热环境演变方面均存在较大差异。北京建设用地扩张有限，建成区内空间形态以紧凑类型为主，其用地比例从2000年的32.46%下降至2020年的26.1%；上海建设用地扩张明显，建成区内空间形态以开敞类型为主，其用地比例从23.4%上升至44.4%。与此对应，北京地表热岛强度由2000年的3.94℃上升至2020年的4.9℃，而热岛范围比例由72.8%下降至56.9%；上海地表热岛强度由4.21℃下降至2.18℃，热岛范围比例则由64.0%上升至69.9%。基于以上发现，从结构优化和布局调整两方面提出了热环境改善策略，以期为城市规划和建设提供经验参考，同时提高城市应对气候风险的能力。

关键词

城市空间形态；热环境；局地气候分区；城市热岛；演变

Abstract

Rapid urbanization has resulted in substantial alterations to urban morphology, subsequently influencing the thermal environment. Utilizing Landsat 5/7/8 satellite remote sensing imagery and an adjusted Local Climate Zone (LCZ) scheme, this research examines Beijing and Shanghai, two megacities, as case studies. The analysis examines the transformations in urban morphology composition and surface urban heat island (SUHI) effect from 2000 to 2020. The study discloses notable disparities between Beijing and Shanghai regarding LCZ classifications and the progression of the thermal environment. In Beijing, the expansion of built-up area was restricted, with compact LCZ classes predominantly characterizing the built-up areas. Their land proportion decreased from 32.46% in 2000 to 26.1% in 2020. In contrast, Shanghai experienced a significant expansion of its built-up area, with open LCZ classes predominating within these built-up areas. Their land proportion increased from 23.4% to 44.4%. Accordingly, Beijing's SUHI intensity rose from 3.94°C in 2000 to 4.9°C in 2020, while the proportion of its heat island area declined from 72.8% to 56.9%. Meanwhile, Shanghai's SHUI intensity diminished from 4.21°C to 2.18°C, with the proportion of its heat island area increasing from 64.0% to 69.9%. Based on these observations, this paper proposes strategies to enhance the thermal environment, focusing on structural optimization and layout adjustment. The objective is to offer valuable insights for urban planning and development, thereby augmenting cities' ability to adapt to climate risks.

Keywords

urban morphology; thermal environment; local climate zones; urban heat island; transformation

中国在近几十年经历了一个快速城镇化的进程，城市空间形态和景观风貌发生了巨大改变。城市建成区面积显著增大，绿地面积快速减少，与此对应的是城市热岛效应不断加强[1]。城市热环境的恶化也导致了一系列问题，如夏季电力消耗上升、空气污染加剧、建筑寿命下降[2-3]。城市高温环境还会对人群健康产生诸多负面影响，如增加心血管疾病

唐　燕
1977年生／女／湖南永州人／博士／教授、博士生导师／研究方向为城市更新、城市热环境

蔡　智
1988年生／男／湖南永州人／博士／讲师／研究方向为城市空间形态、城市热环境

*通信作者（Author for correspondence）
E-mail: caizl9@tsinghua.org.cn

基金项目：
国家自然科学基金面上项目“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）

发生的概率、导致窒息症状的风险上升[4]。更为严重的是，高温环境还会导致人群死亡率上升[5]。柳叶刀健康与气候报告曾指出，中国2022年因城市高温热浪导致的死亡人数达到了5.09万人[6]。随着城市化的持续推进，逐渐恶化的热环境未来将出现在更多城市并覆盖更多人口。如何改善热环境，提高城市生态环境质量，成为当下迫切需要解决的问题。

城市空间形态是热环境的关键影响要素之一。为深入揭示两者之间的关系，学者已从用地布局、街巷空间形态、建筑外部肌理等角度进行了大量探索[7-8]。也有学者借鉴形态学的做法，将城市整体分解成不同的形态类型单元，进而探讨不同形态类型的热环境效应，较为典型的是斯蒂沃特（Stewart）于2012年所提出的局地气候分区体系（Local Climate Zones，LCZ）[9]。局地气候分区体系在经历了10余年的发展后，目前已被国内外气候学界普遍接受，并逐步拓展至城市形态、城市经济等其他领域[10-11]。北京和上海也有较多从LCZ角度开展的热环境研究，如宋加颖等[12]分析发现，北京空间形态以紧凑中层和紧凑低层为主，城市高温热岛主要出现在紧凑类型里；蔡智等[8]指出，不同LCZ形态类型的时空演变直接导致北京热环境的再分布；孙艺菲等[13]发现北京由内往外主要的LCZ形态类型依次为紧凑类型、开敞类型，其地表热岛强度也是由内往外逐步降低；高颖等[14]以上海为案例，发现紧凑高层和大体量低层的热岛强度最高；Xu等[15]同样以上海为案例，发现LCZ各指标对地表温度的影响在不同形态类型里存在较大差异。

除以上单个城市的研究外，目前也有不少多个城市间对比的研究。如Lee等[16]以韩国两个新城为例，发现不同的规划政策会对新城LCZ形态类型构成和热环境产生巨大影响，高密度人口导向会增加建成区类型的用地比例，进而导致城市局部区域的地表热岛强度上升。Bechtel等[17]以全球50个城市为案例，发现大部分城市在白天均表现出较强的热岛效应，且高温热岛主要出现在紧凑低层、大体量低层和重工业类型里，极少量的城市仅在夜晚表现出较强的热岛效应，如西班牙的马德里和中国青岛。近年来，随着卫星遥感和人工智能技术的结合，基于局地气候分区的城市热环境研究尺度不断扩大，时空精度也在不断上升，部分学者甚至建构了全球尺度上的城市空间形态数据库[18-19]。这些新方法、新数据有力助推了当前学术研究，也为深入探讨应对城市热环境问题提供了新的视野。

综上，可以发现先前基于LCZ的研究主要聚焦在不同形态类型和热环境之间的关系上，少有研究从城市整体的空间形态构成及演变上探讨它们对热环境的影响，尤其是对地表热岛效应的影响。城市作为一个动态变化的巨系统，其内部空间构成处于不断的演变过程当中，局部上的变化如何影响城市整体热环境？是否可以通过城市空间形态构成的优化调整来改善热环境？这些问题还有较多可探讨的空间。为此，本文以北京和上海为案例，分析它们在近20年空间形态构成和热环境的演变，揭示两者之间的关系，进而提出相应的热环境优化改善策略，从而为城市宜居环境建设提供支撑。

1 数据与方法

1.1 研究对象

本文的研究对象为北京和上海，两者都是中国具有代表的超大城市。相关数据表明，北京2020年的人口为1 916.6万人，对应的城市建成区面积为1 469 km^2，人口密度达1.3万人/km^2。上海2020年的人口为2 220.94万人，对应的城市建成区面积为1 237.85 km^2，人口密度达1.79万人/km^2。虽然北京和上海都属于高密度人口城市，但在城市空间发展方面却存在较大区别。北京在近20年时间里对城市用地发展实行较为严格的管控政策，近年来更是推行减量发展策略。而上海之前受西方规划建设思想的影响较大，实行的是低密度扩张政策。另外，北京地处于燕山脚下，气候干燥少雨，境内河流湖泊较少。而上海地处长江三角洲，气候温和湿润，境内水体众多。这均导致北京和上海在城市空间形态构成上存在较大差异，成为可对比的典型样本。为确保不同城市间的可对比性，同时参考相关研究成果[11]，将研究区域限定在距市中心半径30 km的范围内（图1）。

1.2 数据来源及方法

研究所使用到的数据主要包括地表温度和城市空间形态信息。其中，地表温度数据基于Landsat 5/7/8卫星遥感影像中的热红外波段，在谷歌云平台（Google Earth Engine，GEE）上用辐射传输方程方法反演获得。研究的时间区间为2000–2020年，以10年为间隔，即2000、2010、2020年。由于上海2010–2011年夏季均没有高质量的影像数据，故将2009年作为目标年份的替代。为减少天气干扰的影响，所有目标年份且研究区上空云层遮蔽小于20%的夏季数据均被采用。最后使用这些数据的平均值来反映该年份地表温度，该数据的空间分辨率为30 m，为与城市空间形态信息的空间分辨率相匹配，在此统一将其重采样至100 m。

城市空间形态主要使用LCZ来进行区分。由于本文的主要研究区域为城市，且部分LCZ类型在北京和上海比较少见，故参考Cai等[11]的研究，将原17个LCZ类型缩减至10类。其

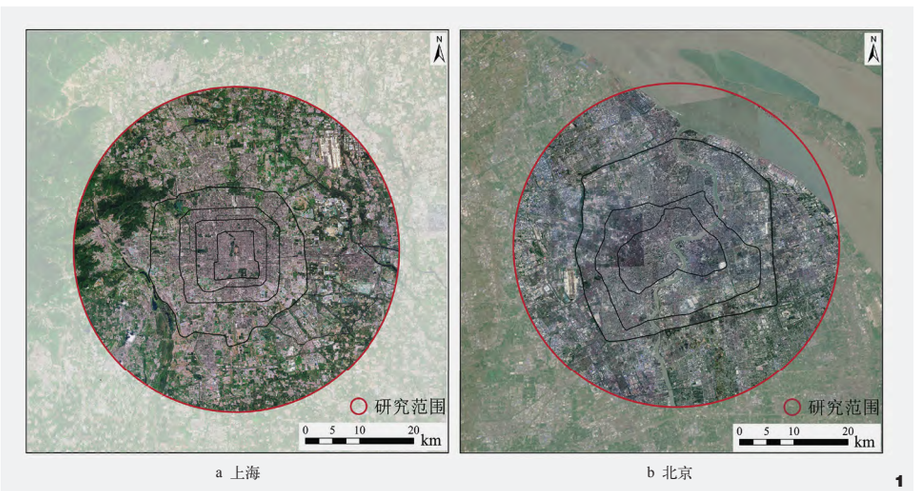


图1 北京和上海的研究范围
Fig. 1 The study area of Beijing and Shanghai

中，建成区包括7类：紧凑高层、紧凑中层、紧凑低层、开敞高层、开敞中层、开敞低层、大体量低层，自然地表包括三类：硬质空间、绿地空间、水体。具体的形态分类流程分为样本标注、机器学习、评估反馈三个部分。样本标注主要基于超高分辨率的谷歌影像（空间分辨率为0.5 m），使用人工目视判别方式进行。然后，随机抽取70%样本作为机器学习的参照。机器学习主要基于Landsat 5/7/8等高分辨率遥感影像数据，使用改进的LCZ生成器（https://lcz-generator.rub.de/）进行。在生成初步的LCZ图后，使用剩余30%样本进行准确度评估，若准确度过低则增加样本数量并再次执行机器学习流程。最后两个城市大部分年份的总体准确度达到65%以上，已能满足研究需求。

1.3 地表热岛效应强度计算

地表热岛强度是反映城乡温度差异的重要指标。参考LCZ的做法，使用建成区和自然地表之间的温度差来计算地表热岛，具体计算见公式（1）。

$$S = T_b - L_g \quad (1)$$

式中，S为地表热岛强度，T_b为建成区类型的平均地表温度，L_g为绿地类型的平均地表温度。

为进一步对比两个城市不同年份之间的热环境变化情况，同时减少天气的影响，本文还对地表温度进行了归一化处理。根据温度标准差的大小将地表热岛强度划分为6个等级，其中热岛区4类，分别为强热岛区（＞2.5个标准差）、次热岛区（1.5 ~ 2.5个标准差）、中热岛区（0.5 ~ 1.5个标准差）、弱热岛区（-0.5 ~ 0.5个标准差）；冷岛区2类，分别为弱冷岛区（-1.5 ~ -0.5个标准差）、强冷岛区（＜-1.5个标准差）。

2 形态演变及热环境分析

2.1 北京和上海城市空间形态的演变

对比北京和上海2000–2020年建成区内LCZ类型的分布及构成，可以发现两地之间存在较大差异（图2，图3）。北京在近20年建成区的用地扩张不明显，建成区主要分布在五环以内，其用地比例在2000年、2020年分别为41.6%、48.5%，20年间仅上升了6.9%。受总体规划中城市发展方向的影响，新增的城市建设用地主要分布在东南大兴片区和东部通州片区，这些片区新增的形态类型以开敞高层为主。从城市整体的空间形态上看，北京遵循紧凑发展路线，LCZ类型构成一直以紧凑高层、紧凑中层和紧凑低层等紧凑类型为主。2000年，其在城市建成区内的用地比例高达77.6%，并且紧凑低层占据着绝对的主导地位。2010年后，随着城市更新的快速推进，北京四环外大量的农村居民点被拆退还绿或者进行开发建设，而四环内的高密度低层住区以及先前“插改建”严重的区域均被更新为其他形态类型，这导致紧凑低层的用地比例由2010年的20.1%迅速下降至2020年的7.95%。开敞类型，尤其是开敞高层类型，在2010年后才有所发展，其用地比例从2010年的3.56%上升至2020年的9.02%。从空间分布上看，四环以内以紧凑类型为主，并且呈现出“内低外高”的分布特征，即二环以内以紧凑低层为主，二环和四环之间则以紧凑中层和紧凑高层为主。四环以外则以开敞类型和大体量低层类型为主。

区别于北京紧凑的发展路线，上海城市空间形态在近20年则以开敞类型快速往外扩张，建成区的用地比例由2000年的38.4%上升至2020年的66.1%。从空间分布上看，上海2000年时建成区基本分布在黄浦江西侧和外环之间，内环内LCZ类型以紧凑低层和紧凑中层为主，内环和外环之间LCZ类型则以开敞中层和大体量低层为主。至2020年，上海城市空间形态已发生了较大变化。建设用地范围已往西扩张至外环以外，往东跨过黄浦江发展。尽管LCZ类型仍然以开敞类型为主导，但开敞高层的比例已大幅上升，由2000年的2.87%上升至2020年17.34%。内环紧凑低层逐

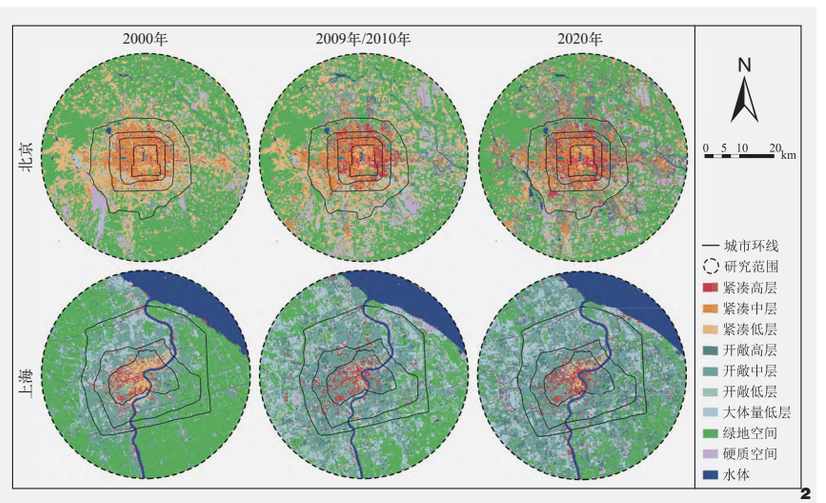
渐被更新建设为紧凑高层和大体量低层，这导致紧凑低层的用地比例不断缩小，由2000年的1.9%下降至2020年的1.2%。内环和外环之间的开敞低层和大体量低层则逐渐被开敞中层所取代，导致开敞中层的用地比例由2000年的18.2%上升至2020年的25.6%。

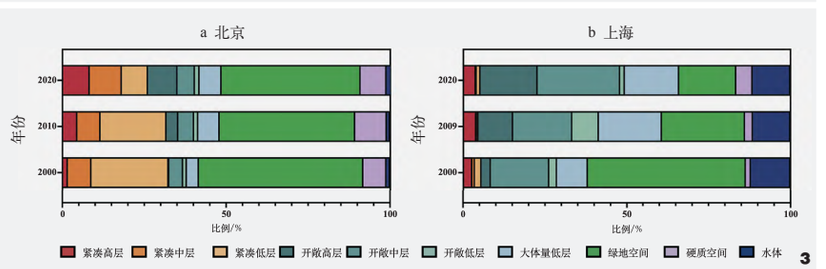
除以上差异外，北京和上海的城市空间形态还存在一些共性的发展特征，具体表现在LCZ类型的空间分布和更新演变上。首先，在空间分布上，由市中心往外依次为紧凑类型—开敞类型—大体量类型。其次，在更新演变上，低建设强度的LCZ类型通常会被更高建设强度的LCZ类型所取代，从而表现出更高开发建设强度的逻辑，这与市场开发建设行为基本一致。

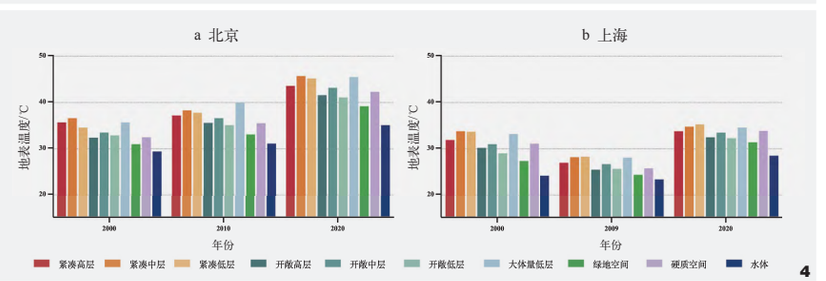
2.2 北京和上海热环境及其演变

统计分析北京和上海各LCZ类型所对应的地表温度，可以发现它们在不同年份上具有较高的一致性（图4）。即城市建成区类型的地表温度高于自然地表类型，并且紧凑类型高于开敞类型，水体的表面温度最低。大体量低层主要分布在工业、物流仓储等用地上，建筑屋顶表面积较大且绿化稀少，导致大体量低层也具有较高的地表温度。另外，受建筑阴影和下垫面覆盖的影响，高层类型比中低层类型具有更高的地表温度。这主要是因为随着建筑高度的上升，建筑所能提供的阴影面积也更大。此外，高层建筑为满足消防、日照等规范要求，建筑间距更大，不仅使得高层建筑之间有更多空间用做绿地或水体，而且通风条件更好。

进一步对比分析北京和上海2000–2020年的地表热岛范围，可以发现北京的热岛区呈现出收缩趋势，其热岛区总用地面积比例由2000年的72.8%下降







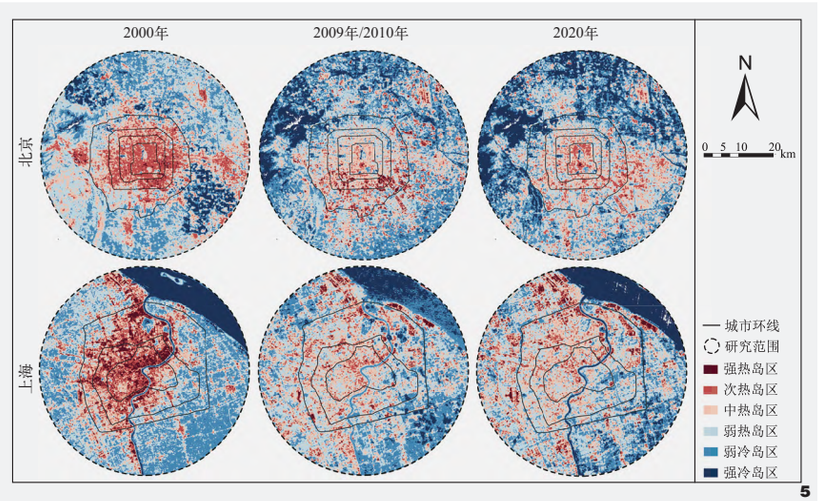


图2 北京和上海2000–2020年LCZ类型的分布
Fig. 2 Spatial distribution of LCZ classes in Beijing and Shanghai from 2000 to 2020

图3 北京和上海2000–2020年LCZ类型的构成
Fig. 3 The composition of LCZ classes in Beijing and Shanghai from 2000 to 2020

图4 北京和上海2000–2020年各LCZ类型的平均地表温度
Fig. 4 The mean LST of various LCZ classes in Beijing and Shanghai from 2000 to 2020

图5 北京和上海2000–2020年冷热岛分布情况
Fig. 5 Spatial distribution of heat and cold island in Beijing and Shanghai from 2000 to 2020

至2020年的56.9%（图5）。2000年时，强热岛的用地比例为0.7%，次热岛、中热岛、弱热岛的比例分别高达13%、21.7%、37.4%。强热岛区主要分布在东南二环和四环之间，以及西部首钢片区，其形态类型以大体量低层为主。次热岛和中热岛区主要分布在四环以内，其空间形态以紧凑类型为主。2010年时，北京热岛区总用地面积比例已减少至58.6%，相比于2000年缩减了14.2%，次热岛、中热岛和弱热岛区的比例分别下降了6.9%、2.7%和5.5%。其热岛缩减区域主要集中在四环以内。而强热岛区有所扩张，其用地比例上升至1.54%。增加的高热岛区主要出现在东南十里河和西南丰台片区。2010年后，北京热岛区总用地面积比例进一步下降了1.7%。其中，强热岛、次热岛、弱热岛的用地比例分别下降了0.55%、0.35%和1.46%，仅中热岛表现出略微增加的趋势，其面积比例由2010年的19.1%上升至2020年的19.8%。各热岛区的空间分布基本维持不变，仅在东部通州片区有所扩张。

区别于北京持续收缩的热岛区，上海热岛区面积则在近20年呈现出增加的趋势。热岛区总用地面积比例由2000年的64.0%上升至2020年的69.9%，增加的热岛类型主要为中热岛（8.1%）和弱热岛（5.4%），其用地比例分别由2000年的17.3%、28.0%上升至2020年的25.4%、33.5%。强热岛和次热岛则有所收缩，其用地比例分别由2000年的5.3%、13.3%下降至2020年的2.3%、8.7%。从空间分布上看，上海的热岛区由集中转向分散的趋势明显。2000年时，上海热岛主要分布在黄浦江西岸及外环之间，与当时的城市建设用地分布高度一致，并且这一区域的热岛类型以强热岛和次热岛为主。2010年后，随着城市建设用地的扩张，上海热岛也分别跨过外环和黄浦江东岸发展。市中心周边的强热岛和次热岛已大幅收缩，这两种热岛类型逐渐转移至北部宝钢片区和东北长江沿岸（图5）。

2.3 北京和上海热环境差异的成因解释

对比北京和上海热环境，可以发现北京地表温度和热岛强度均高于同期的上海（表1）。北京夏季城市建成区内的平均地表温度和平均地表热岛强度分别为38.5℃、4.49℃，而上海对应的地表温度和热岛强度分别仅为30.9℃、2.92℃。

除气候、地形等条件的影响外，城市空间形态的构成也是导致两地热环境差异的主要成因之一。从建成区形态构成上看，北京以紧凑类型（紧凑高层、紧凑中层、紧凑低层）为主导，而上海以开敞类型（开敞高层、开敞中层、开敞低层）为主导。紧凑类型由于建筑密度高、绿地稀少、人口稠密，相对于低开发建设强度的开敞类型而言，其地表温度更高，也更容易产生高温热岛区，这直接导致两地热环境的差异。

此外，用地布局结构也会导致两地热环境的差异。北京用地布局较为紧凑，境内水体稀少，绿地主要分布在西面和北面。加之四环以内大量的高密度建筑，绿地和水体所产生的降温冷却效应难以到达市中心区域。而上海用地布局较为分散，绿地与城市建成区互相镶嵌，且濒临长江，黄浦江穿越整个城市。大面积绿地和水体产生的冷风很容易通过风廊到达城市内部，从而降低地表温度、缓解城市热岛效应。

3 城市热环境优化缓解策略

目前关于城市热环境的优化缓解策略众多，具体可以从不同尺度及领域开展。针对本文所聚焦的城市层面热环境，其优化缓解可以通过空间形态的结构优化、用地布局两个方面调整进行。

首先，在形态结构方面，需要重点关注容易产生高温热岛的形态类型，并针对不同城市、不同形态类型采取差异化的改善方案。北京需要重点关注紧凑类型，在城市更新和建设时，综合考虑社会及经济效益，对于部分价值较低且拆除成本较低的区域，可以适当考虑将这些紧凑类型进行拆除并重建为其他热环境较好的形态类型，从而减少它们在城市中的比例构成，进而降低城市热岛强度。其他较难拆除的区域，可以通过增加屋顶绿化、垂直绿化，以及减少硬质铺装的方式改善热环境。上海需要重点关注大体量低层类型，尤其是黄浦江两岸部分产值较低的工业，以及部分利用程度较低的物流仓储用地，可以适当减少它们的用地比例。

其次，在用地布局方面，需要重点优化各形态类型的空间布局。避免紧凑低层和大

表1 北京和上海2000–2020年平均地表温度和地表热岛强度
Tab. 1 Mean LST and SUHI intensity in Beijing and Shanghai from 2000 to 2020

城市 City	年份 Year	平均地表温度/℃ Mean LST	地表热岛强度/℃ SUHI
北京	2000	32.73	3.94
	2010	35.54	4.64
	2020	41.78	4.90
上海	2000	28.68	4.21
	2009	25.90	2.36
	2020	32.45	2.18

体量低层连片发展，减少热量的集聚。对于市中心的大体量低层，除拆除重建为其他类型外，可以考虑通过功能置换的方式，将其生产功能更改为其他属性，从而满足更新改造的条件，进而增加绿地的覆盖比例。原有大体量低层所承载的工业生产需求可以在郊区进行解决，以缓解它们对市中心的热压力。绿地和水体是城市中有效的降温要素，在整体的布局优化时可以将它们和城市道路、高层住区之间的大面积绿地等连接起来，以形成通畅的风廊结构。另外，还需要重点考虑将绿地引入至城市内部，加强绿地空间和城市建设用地之间的联系。也可以参考伦敦、纽约等城市的做法，适当在城市外围修建一些大规模的绿环，或者在城市内部建设更多的公园绿地，这可以有效改善城市热环境。目前，北京和上海正在大力推进城市绿环和绿地建设，颇具成效。

4 结语与思考

本文基于调整的局地气候分区方案，对比分析了北京和上海2000–2020年的空间形态及热环境演变情况。其结果表明，两地不仅在空间形态构成和发展上存在较大差异，它们在热环境的分布及演变上也呈现出不同的特征。具体表现为，北京城市空间形态以紧凑类型为主导，近20年用地紧凑发展。上海城市空间形态以开敞类型为主导，近20年用地扩张明显。受此影响，北京相对于上海而言，其热岛效应更强。基于以上发现，研究提出了部分热环境优化改善建议，从而为推动高质量城镇空间建设提供参考。除形态分析和热环境研究外，本文所建构的方法体系也可以为其他研究提供参考和借鉴。如可以在形态类型的基础上叠加POI、用地性质等信息，以实现对城市公共空间的识别和分析。

本文也存在一些不足。（1）案例研究的城市仅局限于北京和上海，时间范围仅为2000–2020年，未来可以增加样本城市数量并拓展时间范围，同时结合部分城市发展及气候模型进行长期预测，以拓展研究的深度和广度；（2）LCZ形态类型识别的准确度还不够高，未来可以结合多源影像融合技术以及改进的机器学习/深度学习算法进一步提升其准确度；（3）热环境差异的成因解释仅从定性层面展开，未来可以结合各类回归模型深入揭示城市空间形态与热环境之间的关系；（4）由于本文主要聚焦在城市尺度上，相关的热环境优化改善策略也从城市尺度展开，未来可以以单个城市为案例，从城市—街区—场地等多个尺度实施系统化的改善策略。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] ZHAO C Y, ZHU H K, ZHANG S Y, et al. Long-term Trends in Surface Thermal Environment and Its Potential Drivers Along the Urban Development Gradients in Rapidly Urbanizing Regions of China[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 105: 105324.

[2] ROXON J, ULM F J, PELLENQ R J M. Urban Heat Island Impact on State Residential Energy Cost and CO_2 Emissions in the United States[J]. Urban Climate, 2020, 31: 100546.

[3] HONG C P, ZHANG Q, ZHANG Y, et al. Impacts of Climate Change on Future Air Quality and Human Health in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(35): 17193-17200.

[4] PATZ J A, CAMPBELL-LENDRUM D, HOLLOWAY T, et al. Impact of Regional Climate Change on Human Health[J]. Nature, 2005, 438(7066): 310-317.

[5] MALLEN E, STONE B, LANZA K. A Methodological Assessment of Extreme Heat Mortality Modeling and Heat Vulnerability Mapping in Dallas, Texas[J]. Urban Climate, 2019, 30: 100528.

[6] ZHANG S H, ZHANG C, CAI W J, et al. The 2023 China Report of the Lancet Countdown on Health and Climate Change: Taking Stock for a Thriving Future[J]. The Lancet Public Health, 2023, 8(12): e978-e995.

[7] FERREIRA L S, DUARTE D H S. Exploring the Relationship Between Urban Form, Land Surface Temperature and Vegetation Indices in a Subtropical Megacity[J]. Urban Climate, 2019, 27: 105-123.

[8] 蔡智, 唐燕, 刘畅, 等. 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.

[9] 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.

[10] HUANG F, JIANG S D, ZHAN W F, et al. Mapping Local Climate Zones for Cities: A Large Review[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 292: 113573.

[11] CAI Z, DEMUZERE M, TANG Y, et al. The Characteristic and Transformation of 3D Urban Morphology in Three Chinese Mega-cities[J]. Cities, 2022, 131: 103988.

[12] 宋加颖, 胡非凡, 孟丹, 等. 基于LCZ的城市热环境及其驱动机制研究——以北京城区为例[J]. 环境生态学, 2025, 7(02): 49-59.

[13] 孙艺菲, 孟丹, 宋加颖, 等. 局地气候分区视角下北京市五环内城市热环境及人口热暴露风险日动态变化研究[J]. 生态环境学报, 2025, 34(02): 279-292.

[14] 高颖, 陈燕, 张宁, 等. 上海地区高温过程中局地气候区尺度城市热岛特征分析[J]. 气象科学, 2024, 44(02): 391-400.

[15] XU H C, SUN F Y, ZENG P, et al. Impact of Diurnal Variation in 3D Urban Landscape Metrics on Land Surface Temperature in Shanghai: A Local Climate Zone Perspective[J]. Energy and Buildings, 2025, 336: 115624.

[16] LEE K, YOO C, PARK S. Differences in LCZ Composition According to Urban Planning and Impacts on Urban Thermal Environment[J]. Energy and Buildings, 2024, 314: 114272.

[17] BECHTEL B, DEMUZERE M, MILLS G, et al. SUHI Analysis Using Local Climate Zones - A Comparison of 50 Cities[J]. Urban Climate, 2019, 28: 100451.

[18] WANG R F, WANG M M, REN C, et al. Mapping Local Climate Zones and Its Applications at the Global Scale: A Systematic Review of the Last Decade of Progress and Trend[J]. Urban Climate, 2024, 57: 102129.

[19] DEMUZERE M, KITTNER J, MARTILLI A, et al. A Global Map of Local Climate Zones to Support Earth System Modelling and Urban-scale Environmental Science[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(8): 3835-3873.