张舸，孙赫敏，夏芸洁，等，2026. 基于局地气候分区的北京城区气温特征分析[J]. 气象，52(11)：1408-1416. Zhang G，Sun H M，Xia Y J，et al，2026. Analysis of temperature characteristics within the urban area of Beijing based on local climate zone[J]. Meteor Mon，52(11)：1408-1416(in Chinese).

基于局地气候分区的北京城区气温特征分析*

张 舸[1] 孙赫敏[1] 夏芸洁[1] 张治国[1] 李 林[1,2]

1 北京市气象综合保障中心，北京 100176

2 北京城市气象研究院，北京 100089

提 要： 利用 2010—2021 年北京五环内 37 个地面气象观测站的逐小时观测资料，在局地气候分区的基础上结合实景照片和卫星影像，将站点划分成 5 种局地气候类型，分析了不同下垫面的气温差异特征及其对不同气象条件的响应机制。结果表明：主城区气温分布主要受建筑物密度的影响，密集高层建筑区气温较高，明显高于植被覆盖区；不同局地气候类型间的气温差异呈现秋冬季大、春夏季小的季节变化特征，冬季夜间的差异最为明显；降水过程缩小了局地气候之间的气温差，但并未改变原有的温度梯度；弱风环境有利于维持局地气候的气温差异，而强风会使各类型的气温趋于均一。

关键词： 局地气候分区，气温特征，城市热环境

中图分类号： P466 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.073102

Analysis of Temperature Characteristics Within the Urban Area of Beijing Based on Local Climate Zone

ZHANG Ge[1] SUN Hemin[1] XIA Yunjie[1] ZHANG Zhiguo[1] LI Lin[1,2]

1 Beijing Meteorological Comprehensive Support Center, Beijing 100176

2 Beijing Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: By adopting hourly observation data from 37 weather stations within Beijing's 5th Ring Road from 2010 to 2021 and the local climate zone (LCZ) method, and realistic photos and satellite imagery, this paper classifies the 37 stations into five local climate types and analyzes the characteristics of temperature difference across different underlying surface types. The response mechanisms of the temperature differences to various meteorological conditions are further explored. The results reveal that temperature distribution in the central urban area of Beijing is primarily influenced by building density. The areas with dense and high-rise buildings serve as heat centers, where average temperatures are significantly higher than those in vegetation-covered areas. The temperature differences among different local climate types exhibit seasonal variations, with larger differences in autumn and winter but smaller differences in spring and summer. The temperature differences are the most pronounced over winter nights. Precipitation events can reduce the temperature differences among the local climates but fail to alter the original thermal gradients. Light wind conditions help maintain temperature differences among the local climates, but strong winds can cause temperatures across all types to become more uniform.

Key words: local climate zone, temperature characteristic, urban thermal environment

---

* 国家重点研发计划(2024YFC3013002)和北京市科技计划项目(Z241100009124014)共同资助

2025 年 12 月 25 日收稿； 2026 年 9 月 16 日收修定稿

第一作者：张舸，主要从事综合气象观测研究. E-mail：zhangge@bj.cma.gov.cn

通讯作者：李林，主要从事综合气象观测研究. E-mail：lilin@bj.cma.gov.cn

引　言

随着城市化进程加快,城市下垫面类型逐渐多样化,局地热环境差异日益显著。相关研究已从传统的城乡对比逐步转向城市内部复杂下垫面对气温的影响(杨元建等,2024)。局地气候分区(LCZ)整合了建筑类型、地表特征和人类活动等气候参数(Stewart and Oke,2012;Zhao,2018),为城市内部热环境的精细化分析提供了有效框架。

近年来,LCZ 方法在国内外城市气候研究中得到广泛应用。Roth et al(2022)研究发现,新加坡密集高层建筑区在理想天气下的夜间热岛强度达 4.3℃,是开阔低层建筑区的 2 倍以上。Geletič et al(2016;2017)发现捷克的高温区域主要分布在重工业区和密集中层建筑区。近 90%的局地气候类型间存在明显温差,且以人工表面为主的下垫面对热环境的影响更强(Středová et al,2021)。国内研究表明,高层建筑虽有一定遮荫效果,但同时也阻碍通风,可能加剧局地升温(Cao et al,2021;刘火胜等,2023)。针对北京地区,杨萍等(2013)发现热岛效应具有明显的季节变化和日变化特征,冬季夜间的温差最大;建筑密度、天空视角系数等因子对局地热环境均有调节作用(刘勇洪等,2021)。此外,LCZ 方法的有效性已在武汉、长三角等地的多项研究中得到验证(赵恩灵等,2023;王杉,2023;初步天,2023;陈舟和李胜,2024)。

尽管相关研究已取得了一定进展,但现有成果多依赖卫星反演地表温度(刘欣扬等,2025;郭凡等,2026),在结合长时序、高密度气象站观测研究方面仍显不足。同时,不同气象条件对局地热环境的影响机制研究也相对缺乏。为此,本文利用北京五环内气象观测站逐小时观测数据,结合实景照片与卫星影像划分局地气候类型,分析不同局地气候类型下城区气温的时空差异特征,并讨论其对气象条件的响应机制。

1　数据与方法

1.1　研究区域及其分类

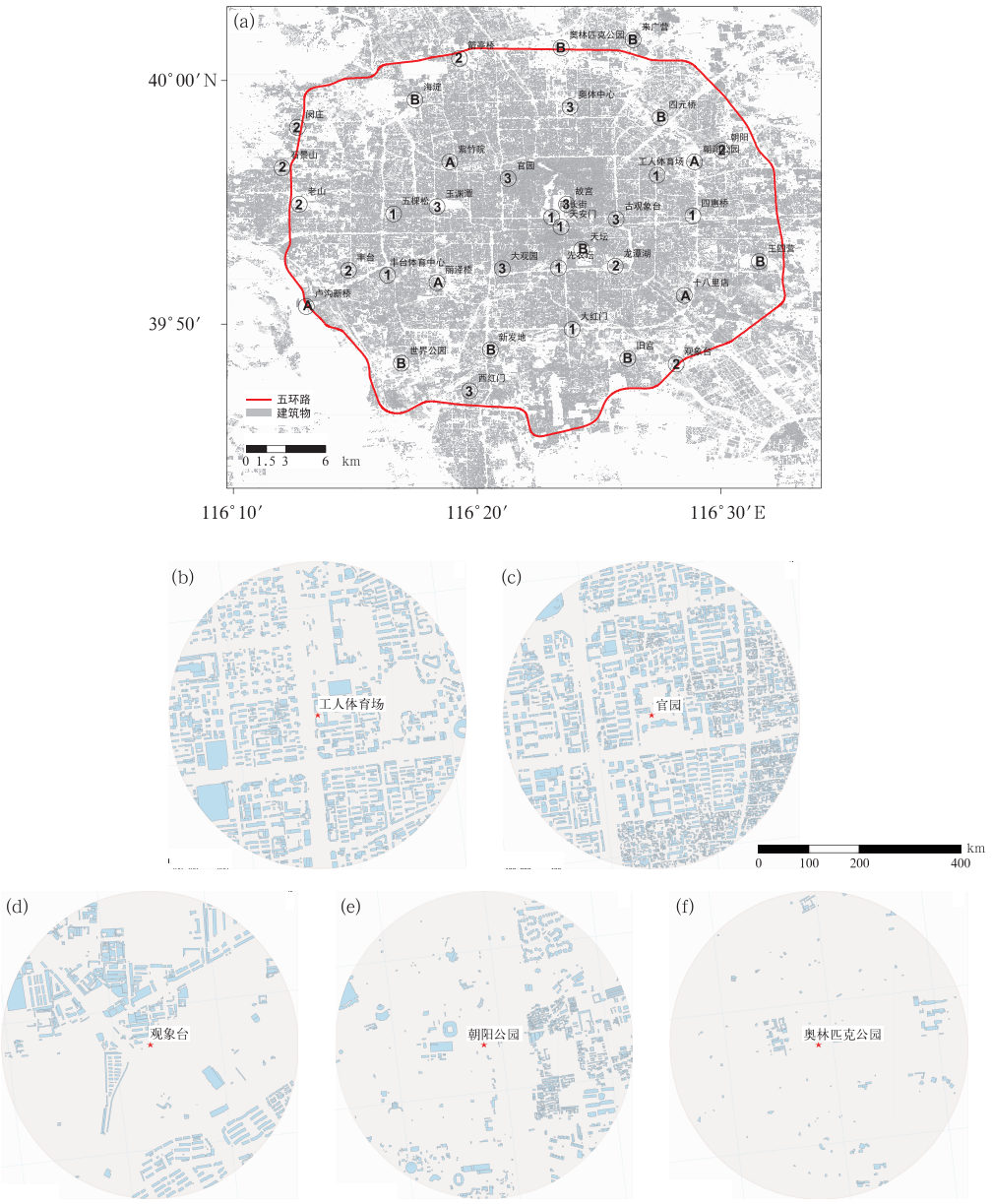
以北京五环路以内的中心城区(39.75°～40.02°N、116.20°～116.53°E)作为研究区域(图 1a),该区域总面积约 667 km^2。五环路是北京城市空间结构的重要分界线,环路内的人口高度密集,城镇化水平高,也是首都核心功能的主要承载区。同时,研究区域内城市形态在二维和三维空间上均表现出显著的多样性,既包含了以国贸 CBD 为代表的商业中心和居住社区等建筑物密集的建成区,也包括以奥林匹克森林公园、天坛公园等大面积城市绿地为代表的植被区。这种在建筑高度、建筑密度及植被覆盖度等物理属性上的显著差异,可作为基于 LCZ 方法探讨气温时空差异特征的代表性研究样本。

以《中国主要城市及区域的土地利用精细分类数据集》作为局地气候分类的依据。该数据集由北京城市气象研究院制作,涵盖全国 63 个城市,平均分类准确率为 81%(Li et al,2021;马倩等,2022)。在此基础上结合卫星和站点实景照片进行逐一订正,最终分为 5 种类型。站点分布及分类结果如图 1 所示。

图 1a 为所有站点的局地气候(LC)分类及地理位置;图 1b～1f 展示了典型站点周边 1 km 范围内的下垫面形态。其中,建成区包括 3 种类型:密集高层建筑区,建筑高度及密度高,地表以硬化路面为主,植被稀少,简称 LC1,共 8 个站;密集低层建筑区,建筑高度低但密度高,地表以硬化路面为主,植被稀少,简称 LC3,共 7 个站;开阔中层建筑区,建筑高度在 3～9 层,建筑密度较低,地表以可渗透地面或植被为主,简称 LC5,共 8 个站。植被区包括 2 种类型:稠密树木区,为高密度林地,简称 LCA,共 5 个站;稀疏树木区,为低密度林地,简称 LCB,共 9 个站。

1.2　气象观测站数据

气象要素数据为 2010—2021 年北京五环内 37 个地面气象观测站的逐小时气温、风速、降水数据。站点分布具有良好的空间代表性,能够有效反映研究时段内北京中心城区复杂下垫面环境中的气温时空差异。为保证研究结果的可靠性,对原始观测资料进行了质量控制。首先,根据历年站点运行情况,对数据进行筛选以剔除由于设备故障或外界原因造成的离群值;其次,对于高温热浪等极端事件中的极值数据,通过查验对比历史极端天气记录和邻近国家级观测站资料进行检验,保证数据真实有效。



注：图 a 中红色环形线为五环路，图 b～f 中五角星为观测站。

图 1 北京五环内(a)观测站(圆圈)空间分布及局地气候分类(数字和字母)，(b～f)典型局地气候下垫面特征

Fig. 1 (a) Spatial distribution of observation stations (circle) and local climate classification (number and letter), (b－f) underlying surface characteristics for typical local climate within the 5th ring road of Beijing

在气温月、日变化特征的分析中使用了相对气温距平，计算方法为：以研究区域内 37 个站的月平均气温均值作为区域背景参考基准，计算各局地气候类型气温相对于该基准的偏离程度。该方法可有效滤除大尺度季节背景信号，从而突出不同下垫面对局地气温的影响。

分析不同局地气候的气温日变化，计算了气温逐小时变化率，具体计算方法如下：

$$\Delta T_t = T_t - T_{t-1}$$

式中：ΔT_t 为第 t 个时次的气温变化率，T_t 和 T_{t-1} 分别为当前时次和前 1 h 的气温观测值。先提取各站点在研究时段内每个时次的 ΔT_t 的平均值，之后将属于同一局地气候类型的多站点数据进行平均，从而得到该类型在各时刻的平均气温变化率。

2　气温时空差异特征

2.1　不同局地气候的气温总体特征

图 2 给出了 2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型的气温特征对比结果,图中可以清晰看出不同下垫面类型的系统差异。建成区站点的平均气温普遍高于植被区,其中,LC1 的年平均气温最高,达 14.5℃;LCB 的年平均气温最低,为 13.2℃;LC5 因空间更开阔,年平均气温(13.5℃)与 LCB 相对接近,说明建筑密度等城市化特征是导致近地层气温升高的关键因素。在日最高气温平均值上,各类型表现差异较小,最大温差仅 0.9℃。日最低气温平均值各类型差异显著增大,LC1(10.2℃)比 LCB(7.5℃)高 2.7℃,体现了密集建筑物区下垫面的夜间保温作用。

图 3 显示,2010—2021 年北京五环内各局地气候类型的年平均气温呈现出相同的年际变化特征,研究区域内所有站点受到一致的大尺度气候背景影响。LC1 的年平均气温在所有年份中均保持最高,LCB 始终处于最低位,两者的温差波动较为稳定,在 1.1～1.4℃小幅波动,说明城市下垫面的热力效应在年际尺度上具有较高的稳定性,大尺度气候波动只能引起气温的整体升降,而不会改变不同下垫面之间的相对热力差异(Stewart and Oke,2012)。

2.2　气温时序演变特征

2.2.1　月变化

由图 4 可知,2010—2021 年北京五环内 LC1 和 LC3 全年表现为正距平,LC1 相对更高,秋冬季节最高可达 0.87℃。这可能与建筑供暖或建筑群对近地层热量的截留有关。LC3 的变化趋势与 LC1 相似,但整体变化相对较小,多数月份距平为 0.3～0.5℃。LCA 的气温距平在 0℃线附近波动,多数月份距平绝对值小于 0.1℃,气温最接近区域平均气温。LC5 均为负距平,在－0.3℃上下略有浮动。LCB 全年为负距平且普遍低于－0.5℃,秋冬季节可达－0.8℃左右。综合来看,LC1 和 LCB 月平均气温距平波动幅度最大,二者距平差普遍在 1.0℃左右,秋冬季节可达 1.3～1.5℃。这表明建筑密度和高度的共同作用会导致局地升温,与 Giridharan et al(2007)对香港城市形态热效应的研究结论一致。

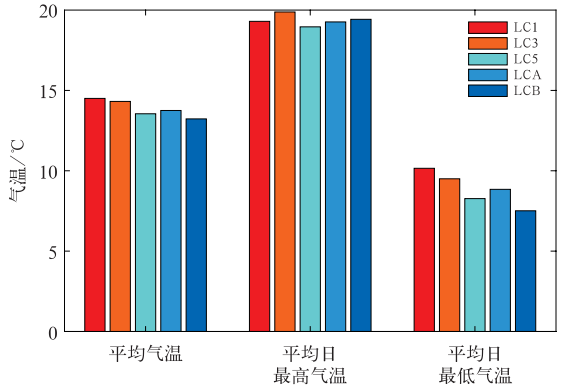


图 2　2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型的气温特征对比

Fig. 2　Comparison of temperature characteristics among different local climate types within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

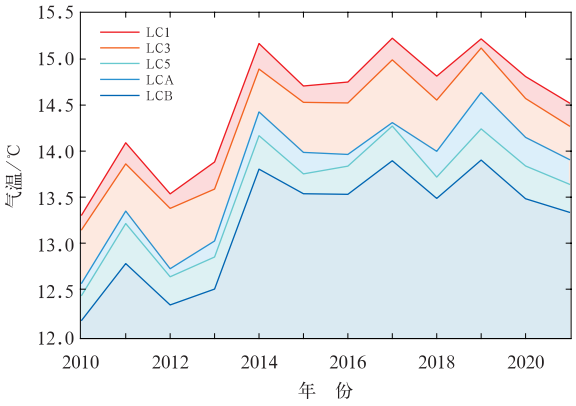


图 3　2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型年平均气温的年际变化

Fig. 3　Interannual variation of annual average temperature among different local climate types within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

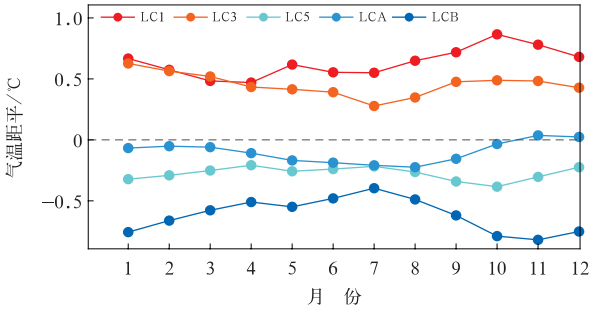


图 4　2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型的月平均气温距平

Fig. 4　Monthly average temperature anomalies among different local climate types within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

2.2.2 日变化

由图 5a 可以看出，2010—2021 年北京五环内各类局地气候平均气温日变化均呈单峰型，但变化幅度和极值存在明显差异。日最低气温出现在 06:00(北京时，下同)前后，此时局地气候类型间的温差最大，LC1 日最低气温最高，达到 10.9℃，较 LCB 高 2.2℃。日最高气温出现在 15:00 左右，LC3 和 LCB 相对较高，分别为 18.8℃和 18.4℃，此时各类型间的温差在 1℃以内，且没有明显的温度梯度，说明较强的太阳辐射在一定程度上削弱了局地下垫面对局地气温的影响。整体上夜间差异大、白天差异小的日变化特征说明：高密度建成区由于热容量较大，夜间降温缓慢，气温维持在相对较高水平；而开敞的植被区热容量较小，且通风条件较好，夜间散热更快。

图 5b 是 2010—2021 年北京五环内 37 个站及不同局地气候类型站点的气温日较差，由图可见，LC1 的日较差最小，平均日较差仅为 9.1℃，显著低于其他类型。LC3、LC5 与 LCA 相对接近，平均值为 10.4～10.7℃。而开放度最高的 LCB 气温日较差最大，平均值达到 11.9℃且单站极值高达 13.1℃。这种梯级分布规律说明高密度建成区通过建筑物蓄热和人为热排放等减少了昼夜温差，而稀疏树木区保留了更接近自然下垫面的强烈日变化特征，与 Fenner et al(2017)的研究结果一致。

图 6 给出了 2010—2021 年北京五环内 37 个站的气温距平月-时分布，由图可以看出，LC1 全年绝大多数时段均为正距平，仅在夏季约 10:00—15:00 出现弱负距平，增温效应在秋冬夜间(20:00 至次日 08:00)最为明显，距平普遍超过 0.8℃；LC3 的正距平主要集中在夏季夜间，约为 0.3～0.6℃，冬季在 10:00 和 15:00 前后表现出弱负距平；LCB 以负距平为主，在夏季白天和冬季夜间普遍低于－1.0℃，说明白天植被蒸腾相对抑制了高温峰值，夜间凭借开敞下垫面迅速降温。LC5 与 LCA 虽然下垫面性质截然不同，但气温距平均在±0.3℃附近小幅波动，且 LC5 表现为以负距平为主，说明 LC5 虽为建筑区，但其开阔的空间形态缓解了热量积聚。另外，LCA 与 LCB 虽均为植被区，而 LCB 的负距平绝对值更大，说明 LCA 因树木相对密集导致其夜间辐射冷却弱于 LCB。

整体来看，在月平均气温距平(图 4)变化基础上，月-时分布(图 6)更精细地展示了不同局地气候类型间气温差异的时间变化特征。比较典型的是 LC1 与 LCB，两者在夏季白天气温几乎没有差异，但在冬季夜间却增大至近 2.0℃，说明在辐射冷却过程中城市下垫面属性对气温的调节作用更为显著。

图 7 为 2010—2021 年北京五环内各局地气候类型的逐小时气温变化率。整体气温变化过程大致可分为 3 个阶段：00:00—07:00 为缓慢降温期，各类型气温变化率普遍维持在－0.5～0 ℃·h^{-1}；06:00 前后气温变化率趋近于 0 ℃·h^{-1}，随后转为升温。07:00—15:00 为快速升温期，其中 09:00—10:00 升温速率最大，LCB 最高达到 2 ℃·h^{-1}。16:00—23:00 为快速降温期，其中 18:00—20:00 变化速率最大，LCB 最高达到－1.4 ℃·h^{-1}，而 LC1

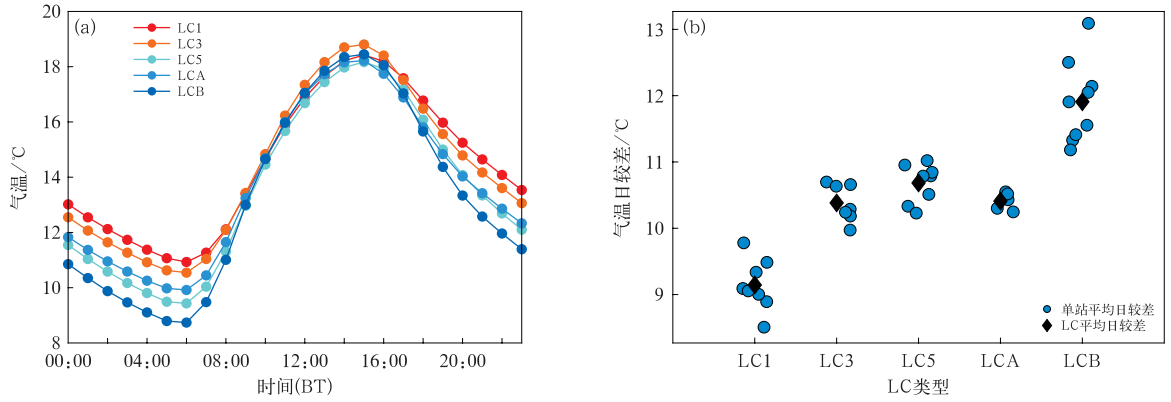


图 5 2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型的(a)平均气温日变化与(b)气温日较差

Fig. 5 (a) Average diurnal temperature variation and (b) average diurnal temperature range for different local climate types within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

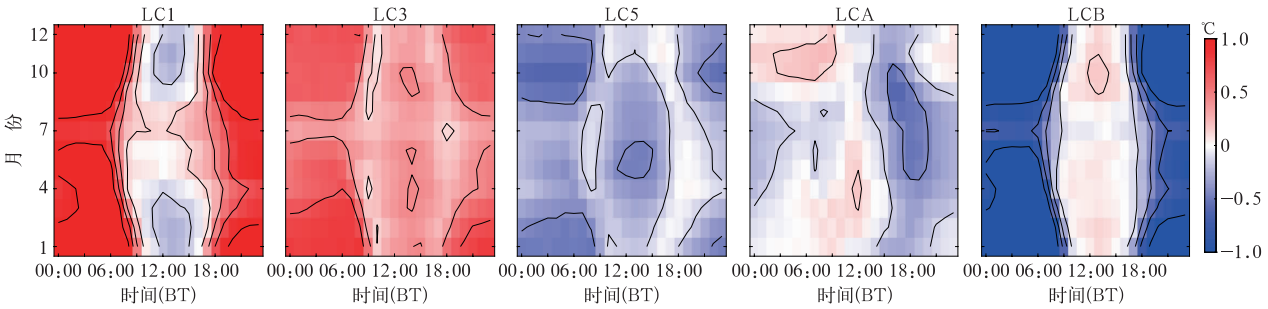


图 6　2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型相对 37 个站平均的气温距平月-时分布

Fig. 6　Distribution of monthly-hourly temperature anomalies for different local climate types relative to the average temperature at 37 stations within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

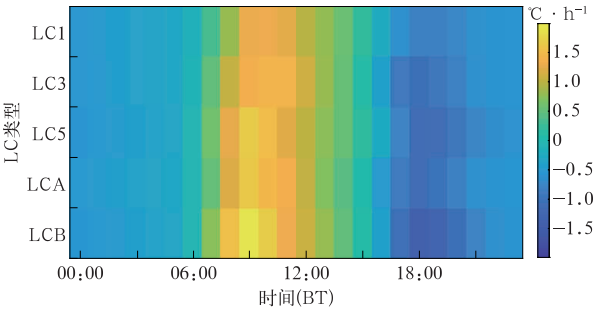


图 7　2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型气温逐小时变化率

Fig. 7　Hourly variation rates of temperature among different local climate types within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

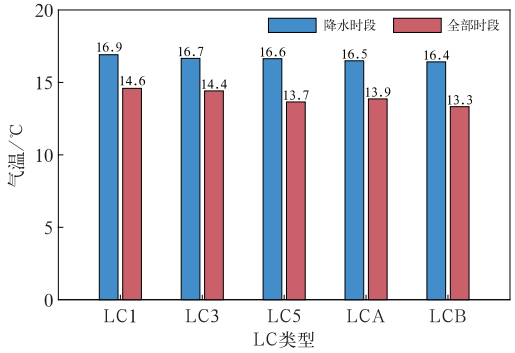


图 8　2010—2021 年北京五环内不同局地气候类型降水时段与全部时段的平均气温对比

Fig. 8　Comparison of average temperatures during precipitation periods and the entire period among different local climate types within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

仅为−0.7 ℃ · h^{-1};21:00 以后变化速率逐渐减小至−0.7～−0.5 ℃ · h^{-1}。

3　不同气象背景条件下的各局地气候类型的气温特征

3.1　降水条件的影响

由图 8 可知,2010—2021 年全部时段北京五环内 LC1 与 LCB 的平均气温差为 1.3℃,降水时段的气温差缩小至 0.5℃,表明降水过程明显削弱了不同局地气候类型间的热力差异。降水伴随的云量增加阻挡了到达地表的太阳辐射,且地表湿润后增强了蒸发冷却效应,从而缩小了不同下垫面的热力差异。无论是全部时段还是降水时段,建筑物密集的建成区平均气温始终高于植被区,说明降水条件不会改变基本的局地气候热力梯度。需要指出的是,本节主要关注降水发生与否对局地热环境的改变,不同降水强度下的精细化影响机制仍有待后续进一步研究。

3.2　风速条件的影响

地表风速是影响近地层热力结构的关键因素(Oke,1987),可调节不同下垫面的局地气温。本文将风速≤5 m · s^{-1} 定义为小风速时段,>5 m · s^{-1} 则为大风速时段,不同风速条件下的气温差异特征如图 9 所示。从图中可以看出,小风速时段气温分布与全部时段高度吻合,但整体偏高 0.1℃。受下垫面属性的影响,密集建筑区气温偏高,LC1 与 LCB 的平均气温差达到 1.3℃,且建成区内部因形态差异分化明显,开阔的 LC5 因通风散热较好,平均气温较密集区(LC1、LC3)偏低 0.7～0.9℃。在大风速条件下,强烈的平流冷却与湍流作用改变了气温分布,各局地气候的平均气温降至 11.1～11.5℃,最大气温差缩小至 0.4℃。随着风速增大,

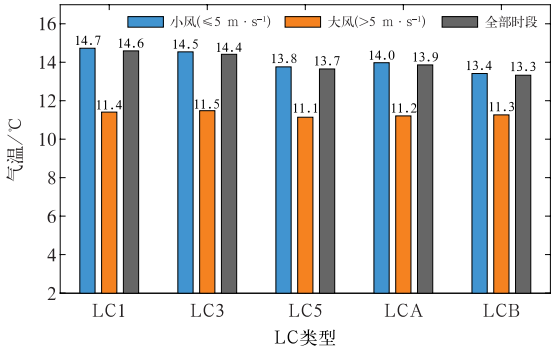


图 9 2010—2021 年北京五环内不同风速条件下各局地气候类型平均气温对比

Fig. 9 Comparison of the impact of wind speed conditions on temperature among different local climate types within the 5th ring road of Beijing from 2010 to 2021

极大地减小了原本由建筑密度和地表覆盖差异造成的局地温差。因此,风速大小影响了局地微环境的调节能力,弱风环境有利于下垫面属性主导气温分布,维持清晰的局地气温差结构(Stewart and Oke, 2012);而强风环境有效削弱了局地热量积累,促使气温趋于均匀分布(Morris et al,2001)。

4 结论与讨论

本文基于局地气候分区体系,利用北京市城区(五环内)37 个地面气象观测站的观测资料,分析了 5 种局地气候在不同时间尺度上的气温变化及其在特定气象条件下的差异,主要结论如下:

(1)密集高层建筑区是持续的高温中心,年平均气温显著高于植被区,且不同局地气候间的气温在年际尺度上较为稳定。城市形态通过增加下垫面热储存、抑制长波辐射散失等作用延缓夜间降温,是造成局地气温升高的重要原因;而较高的空间开放度有助于缓解建成区的热量积聚。

(2)局地气候间的气温差异在秋冬季节更为显著,春夏季节则相对较弱。夜间不同下垫面热容量和降温速率的差异表现更为突出;白天太阳辐射和湍流交换增强,在一定程度上缩小了局地气候间的气温差异。

(3)虽然降水过程缩小了局地气候间的气温差异,但并未改变原有的气温差异。风速对局地热环境也有明显调节作用:风速较小时,下垫面对局地气温的影响相对更强;风速较大时,空气流动和混合作用增强,有利于热量交换,使气温分布趋于均匀。

与我国其他城市的研究相比,本文结果既有相似之处,也有一定差异。一方面,局地气候类型的气温特征在不同城市间具有一定相似性。城市的高密度建成区均为热岛中心(杨梅焕等,2023;巢清尘等,2025;史辰等,2025),植被区则普遍为冷岛(陈舟和李胜,2024)。建筑体量大、夜间降温缓慢是造成该现象的因素之一。此外,动力强迫较弱的天气有利于维持下垫面的热力差异(初步天,2023;赵恩灵等,2023)。另一方面,城市形态和气候背景不同使得热环境具有一定地域特殊性。北京主城区局地气候类型以高密度建成区(LC1、LC3)和植被区(LCA、LCB)为主,而武汉、苏州等城市则以开阔中层建筑区(LC5)和重工业区为主(季群,2021;高宇辰,2024;管骁等,2025;郭舒静和章莉,2025)。北京的高温分布在密集建筑区且范围较大,其他城市的高温集中在工业区,呈局部热点分布。气候背景方面,苏州等城市属于亚热带季风气候,水汽条件较好,植被覆盖率超过 30%后,其降温作用明显增强(初步天,2023);北京地处温带季风气候(张英娟等,2023),水汽条件相对有限,植被区的降温效果可能弱于南方城市。

本文分析了北京城区不同局地气候类型的气温差异,采用的 12 年观测资料能反映近期城市化背景下的气温分布特征,但难以揭示更长周期的气候变化规律。此外,研究期间五环内下垫面整体变化较小,但局部仍有可能存在变化,本文未定量评估其对气温的影响。未来可结合更长时间序列的多源资料,进一步探讨城市化过程中下垫面变化对热环境的影响。

参考文献

巢清尘,邱宗旭,冯爱青,等,2025. 基于深圳视角的超大城市气候风险与早期预警应对展望[J]. 气象,51(3):257-268. Chao Q C, Qiu Z X, Feng A Q, et al, 2025. Climate change risks and the early warning in megacities: a Shenzhen perspective[J]. Meteor Mon, 51(3): 257-268(in Chinese).

陈舟,李胜,2024. 局地气候分区下的杭州中心城区城市热环境研究[J]. 绿色科技,26(9):67-74,142. Chen Z, Li S, 2024. Research on urban thermal environment in central urban area of Hangzhou under local climate zoning[J]. J Green Sci Technol, 26(9): 67-74, 142(in Chinese).

初步天,2023.基于局地气候分区的苏州市主城区热环境及多维影响因子研究[D].苏州:苏州大学.Chu B T,2023.Research on thermal environment and multidimensional impact factors based on local climate zone in Suzhou City main urban area[D].Suzhou:Soochow University(in Chinese).

高宇辰,2024.基于局地气候分区(LCZ)的三维城市形态对热污耦合影响研究——以武汉市主城区为例[D].武汉:华中科技大学.Gao Y C,2024.Study on the effect of three-dimensional urban form on thermal pollution coupling based on LCZ zones—take the main urban area of Wuhan as an example[D].Wuhan:Huazhong University of Science and Technology(in Chinese).

管骁,江斯达,田家,等,2025.基于局地气候分区的南京夏季地表热环境研究[J].遥感学报,29(7):2457-2468.Guan X,Jiang S D,Tian J,et al,2025.Study on the summer surface thermal environment of Nanjing urban area based on local climate zone[J].Nat Remote Sens Bull,29(7):2457-2468(in Chinese).

郭凡,张丽丽,余涛,等,2026.基于卫星遥感的地表温度估算研究进展[J].大气与环境光学学报,21(2):203-224.Guo F,Zhang L L,Yu T,et al,2026.Research progress on land surface temperature estimation based on satellite remote sensing[J].J Atmos Environ Opt,21(2):203-224(in Chinese).

郭舒静,章莉,2025.基于局地气候分区的武汉市高温灾害风险特征及影响因素研究[J].风景园林,32(1):105-113.Guo S J,Zhang L,2025.Research on characteristics and influencing factors of high temperature disaster risk in Wuhan based on local climate zone[J].Landsc Archit,32(1):105-113(in Chinese).

季群,2021.基于局地气候分区方法的苏州市城市热环境研究[D].南京:南京信息工程大学.Ji Q,2021.A local climate zone-based study of the urban thermal environment in Suzhou City[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).

刘火胜,李思韬,宛浩凯,等,2023.基于局地气候分区的武汉市城市热岛时空分异特征[J].华中农业大学学报,42(4):98-106.Liu H S,Li S T,Wan H K,et al,2023.Spatial-temporal differentiation characteristics of urban heat island in Wuhan City based on local climate zone[J].J Huazhong Agric Univ,42(4):98-106(in Chinese).

刘欣扬,王丹丹,鲍志超,等,2025.基于遥感方向观测的城市全表面温度估算方法对比研究[J].遥感技术与应用,40(6):1526-1541.Liu X Y,Wang D D,Bao Z C,et al,2025.Comparison of different methods for estimating complete urban surface temperature based on directional remote sensing observations[J].Remote Sens Technol Appl,40(6):1526-1541(in Chinese).

刘勇洪,徐永明,张方敏,等,2021.北京城市空间形态对热岛分布影响研究[J].地理学报,76(7):1662-1679.Liu Y H,Xu Y M,Zhang F M,et al,2021.Influence of Beijing spatial morphology on the distribution of urban heat island[J].Acta Geogr Sin,76(7):1662-1679(in Chinese).

马倩,王咏薇,苗世光,等,2022.中国大城市具有建筑物分类的土地利用分类数据集构建研究[J].大气科学学报,45(1):135-147.Ma Q,Wang Y W,Miao S G,et al,2022.Study on construction of land use classification datasets with building type in large cities of China[J].Trans Atmos Sci,45(1):135-147(in Chinese).

史辰,杜吴鹏,王佳琳,等,2025.基于局地气候分区的超大城市不同下垫面风热环境特征分析[J].气象科技,53(1):35-46.Shi C,Du W P,Wang J L,et al,2025.Characterization of wind-heat environments in megacities with different subsurface based on local climate zoning[J].Meteorol Sci Technol,53(1):35-46(in Chinese).

王杉,2023.基于 LCZ 的长三角城市群热岛的时空特征及规划对策研究[D].杭州:浙江大学.Wang S,2023.Research on the spatial and temporal characteristics and planning countermeasures of UHI in the Yangtze River Delta urban agglomeration based on LCZ[D].Hangzhou:Zhejiang University(in Chinese).

杨梅焕,姚明昊,王涛,等,2023.基于局地气候区的西安市城市热环境变化及其影响因素分析[J].生态环境学报,32(9):1644-1653.Yang M H,Yao M H,Wang T,et al,2023.Analysis of urban thermal environment change and its influencing factors in Xi'an based on local climate zone[J].Ecol Environ Sci,32(9):1644-1653(in Chinese).

杨萍,肖子牛,刘伟东,2013.北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析[J].大气科学,37(1):101-112.Yang P,Xiao Z N,Liu W D,2013.Comparison of diurnal temperature variation in urban and rural areas in Beijing and its seasonal change[J].Chin J Atmos Sci,37(1):101-112(in Chinese).

杨元建,罗芙,薛捷升,等,2024.城市热浪与冠层热岛协同作用研究进展与展望[J].地球科学进展,39(4):331-346.Yang Y J,Luo F,Xue J S,et al,2024.Research progress and perspective on synergy between urban heat waves and canopy urban heat island[J].Adv Earth Sci,39(4):331-346(in Chinese).

张英娟,高辉,丁婷,等,2023.基于小时资料的北京高温精细化特征分析[J].气象,49(9):1131-1141.Zhang Y J,Gao H,Ding T,et al,2023.Refined spatio-temporal features of high temperature frequency in Beijing based on hourly temperature data[J].Meteor Mon,49(9):1131-1141(in Chinese).

赵恩灵,邓帆,李志远,等,2023.基于局地气候区的武汉市地表热环境研究[J].长江流域资源与环境,32(5):1030-1041.Zhao E L,Deng F,Li Z Y,et al,2023.Study on the thermal environment of Wuhan City based on local climate zones[J].Resour Environ Yangtze Basin,32(5):1030-1041(in Chinese).

Cao Q,Luan Q Z,Liu Y P,et al,2021.The effects of 2D and 3D building morphology on urban environments:a multi-scale analysis in the Beijing metropolitan region[J].Build Environ,192:107635.

Fenner D,Meier F,Bechtel B,et al,2017.Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin,Germany[J].Meteor Z,26(5):525-547.

Geletič J,Dobrovolný P,Lehnert M,2017. Statistical analyses of land surface temperature in local climate zones:case study of Brno and Prague (Czech Republic)[C]// 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). Dubai:IEEE:1-4.

Geletič J,Lehnert M,Dobrovolný P,2016. Land surface temperature differences within local climate zones, based on two central European cities[J]. Remote Sens,8(10):788.

Giridharan R,Lau S S Y,Ganesan S,et al,2007. Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong[J]. Build Environ,42(10):3669-3684.

Li N N,Yang J,Qiao Z,et al,2021. Urban thermal characteristics of local climate zones and their mitigation measures across cities in different climate zones of China[J]. Remote Sens,13(8):1468.

Morris C J G,Simmonds I,Plummer N,2001. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city[J]. J Appl Meteor,40(2):169-182.

Oke T R,1987. Boundary Layer Climates[M]. 2nd ed. London:Routledge.

Roth M,Sanchez B,Li R,et al,2022. Spatial and temporal characteristics of near-surface air temperature across local climate zones in a tropical city[J]. Int J Climatol,42(16):9730-9752.

Stewart I D,Oke T R,2012. Local climate zones for urban temperature studies[J]. Bull Am Meteor Soc,93(12):1879-1900.

Středová H, Chuchma F, Rožnovský J, et al, 2021. Local climate zones, land surface temperature and air temperature interactions:case study of Hradec Králové, the Czech Republic[J]. ISPRS Int J Geo-Inf,10(10):704.

Zhao C H,2018. Linking the local climate zones and land surface temperature to investigate the surface urban heat island,a case study of San antonio,texas,U. S.[C]// ISPRS Annals of Photogrammetry,Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing:Copernicus Publications:277-283.

(本文责编:张芳)