

基于局地气候分区的南京夏季地表热环境研究

管晓¹, 江斯达¹, 田家², 田庆久¹

1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要: 在全球气候变暖和城市化快速发展的背景下, 城市热环境广受关注。本研究基于局地气候分区 LCZ (Local Climate Zone) 体系, 利用 Landsat 影像反演地表温度, 从类间、类内 2 个视角研究了南京市主城区夏季热环境动态变化特征。结果表明: (1) LCZ 类间热环境表现出较大差异, 较高的建筑密度表现出较高的平均地表温度, 随着建筑高度的下降平均地表温度逐渐升高。并且, 大型低层建筑 (LCZ 8) 在夏季一直呈现出较高的平均地表温度; (2) 各建筑类型平均地表温度高于研究区整体平均地表温度, 各自然地表覆盖类型除裸土或沙地 (LCZ F) 外, 平均地表温度表现低于研究区整体平均地表温度; (3) LCZ 类内热环境分析结果表明, 密集型中层建筑 (LCZ 2)、密集型低层建筑 (LCZ 3)、重工业区 (LCZ 10) 和裸土或沙地 (LCZ F) 对温度变化表现出较大的敏感性。本研究可为缓解城市地表热环境压力提供科学支撑。

关键词: 城市热环境, 局地气候分区, 南京市, 地表温度, 类间差异, 类内差异

中图分类号: P237/P2

引用格式: 管晓, 江斯达, 田家, 田庆久. 2025. 基于局地气候分区的南京夏季地表热环境研究. 遥感学报, 29(7): 2457-2468

Guan X, Jiang S D, Tian J and Tian Q J. 2025. Study on the summer surface thermal environment of Nanjing urban area based on local climate zone. National Remote Sensing Bulletin, 29(7): 2457-2468 [DOI: 10.11834/jrs.20244318]

1 引言

随着世界经济的快速发展和人类活动的范围不断扩大, 自然环境不断恶化, 气候变暖已经成为目前全球范围内最受关注的环境问题之一。根据政府间气候变化专门委员会 IPCC 所公布第六次评估报告, 全球变暖问题依旧严峻, 并且提出在全球范围内观测到的极端气候事件增加 (IPCC, 2022)。城市化快速发展, 人类建设活动加快, 大量自然地表被不透水面代替, 改变了城市局地气候, 增加了极端高温天气下的城市人口热暴露风险 (Zhang 等, 2021)。在气候恶化和城市化快速发展的背景下, 充分了解城市热环境格局特征, 对构建高气候适应性城市和实现可持续发展具有重要意义。

城市热环境与城市热岛密切相关, 二者均由地表温度和大气温度进行衡量, 城市热岛更注重城郊之间的温度差异, 城市热环境则综合了更多

的因素如地表覆盖差异、城市空间形态差异等 (Qiao 等, 2023; Liu 等, 2023)。相较于传统的遥感地物分类方案, 局地气候分区 LCZ (Local Climate Zone) 分类体系考虑了城市三维空间结构与地面覆盖材料等多方面的差异 (Huang 等, 2023; 江斯达 等, 2020), 将城市分为 10 种建筑类型 (LCZ 1—LCZ 10) 和 7 种自然类型 (LCZ A—LCZ G), 充分体现城市内部空间的多样性和异质性 (Ren 等, 2019; Demuzere 等, 2021; Aslam 和 Rana, 2022)。

城市热环境的评估及特征主要依靠气象站点定点观测或基于卫星影像的地表温度反演 (任侠等, 2017; Xie 和 Sun, 2021)。传统气象站点具有可获取高时间分辨率、长时序观测数据的优势, 但受到站点空间分布不均匀和架设观测仪器数量的限制, 对于城市尺度的热环境特征分析会受到一定制约。利用遥感手段进行城市热环境的研究具有空间上连续、覆盖范围广, 易获取等优点,

收稿日期: 2024-07-29; 预印本: 2024-09-11

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2023YFF1303903); 城市与区域生态国家重点实验室 2023 年开放课题 (编号: SKLURE2023-2-6)

第一作者简介: 管晓, 研究方向为城市遥感。E-mail: 502022270112@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 田庆久, 研究方向为高光谱遥感。E-mail: tianqj@nju.edu.cn

可以克服传统气象站点数据不连续, 空间分布不均匀的问题, 广泛应用于中、大尺度的城市热环境研究, 但由于天气及云覆盖的影像, 获取高时间分辨率的卫星数据存在困难(段四波等, 2021; 陈云浩等, 2024)。

Bechtel 和 Daneke (2012) 首先提出了利用遥感影像进行整体城市局地气候分区的绘制, 而 Ren 等 (2019) 利用 WUDAPT 方法对中国 20 多个的城市的局地气候分区结果进行了评估并提出了改进方向, 建筑高度数据的缺失是产生分类误差的主要原因。Stewart 和 Oke (2012) 首先将局地气候分区应用到城市温度研究中。目前, 许多将局地气候分区应用到城市热环境中的研究表明, 一天内不同时相的热环境特征有所不同。比如, Yuan 等 (2022) 对比分析了局地气候分区的类间特征, 认为密集型建筑在一整天内都表现为热岛, 而开阔型和零散建筑不确定性较大, 密集型中层建筑 (LCZ 2) 和密集型低层建筑 (LCZ 3) 的热暴露风险高。Chang 等 (2021) 利用 ECOSTRESS 数据分析了西安局地气候分区昼夜及类内热环境特征, 认为紧凑型建筑拥有更高的升温潜力, 较低建筑高度类型拥有较高的地表温度, 在夜间建筑高度对温度差异的影响减弱。此外, 在不同季节条件下, 各局地气候分区类间热环境特征存在明显异质性。Wang 等 (2022) 认为在夏季城市热岛比冬季更剧烈, 开阔型高层建筑在各个季节都对缓解城市热环境做出了明显的积极贡献。同样的, 在不同城市中, 各局地气候分区类型对热环境的贡献存在差异。例如, Li 等 (2022) 对比了中国 5 个不同宏观气候的城市后认为在不同城市不同局地气候类型对热环境的贡献存在差异, 在夏季局地气候分区的类间热环境差异较冬季更为明显。然而, 大部分利用遥感手段基于局地气候分区的城市热环境研究集中于不同季节的对比研究, 在这些研究中大部分仅使用单一影像来分析其季节特征, 缺乏变态变化过程。对于局地气候分区的类内热环境差异研究, 大部分使用气象站点数据或架设自动观测仪器采集数据, 遥感手段缺乏有效方法进行类内热环境差异的分析。因此, 为探究极端高温天气下南京市地表热环境特征, 本研究拟采用南京夏季 6—9 月共 5 景影像数据, 基于局地气候分区, 动态分析南京市夏季不同 LCZ 类间热环境差异, 并提出基于地表温度的相对变化率

来表征 LCZ 类内热环境差异, 以期城市规划和建设提供科学依据。

2 研究区域

南京市位于中国长江三角洲西部, 地理位置处于 $31^{\circ}14'N$ — $31^{\circ}27'N$, $118^{\circ}22'E$ — $119^{\circ}14'E$ 。南京市属于北亚热带湿润气候, 四季分明, 夏热冬温, 春秋季节时间短, 冬夏季节时间长, 每年 4 月初进入春季, 6 月进入夏季, 9 月中旬进入秋季, 11 月中上旬进入冬季。平均每年降雨 117 d, 平均降雨量 1106.5 mm (毛宇清等, 2012), 6 月下旬—7 月上旬为梅雨季节 (姚飞等, 2023)。本研究区为南京市下辖的玄武区、秦淮区、建邺区、鼓楼区、栖霞区及雨花台区, 包含南京市区及部分郊区, 详见图 1。

3 研究数据与方法

3.1 数据来源及预处理

3.1.1 局地气候分区数据

本研究涉及局地气候分区分类的数据包括 Landsat 9 Operational Land Imager 2 (OLI-2) 和 Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2) 图像 (<http://earthexplorer.usgs.gov> [2024-07-29]); 可见光至短波红外谱段图像空间分辨率为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$, 热红外谱段图像空间分辨率为 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 。上述数据均经过辐射定标和大气校正。此外, 为了与地表温度数据保持空间尺度上的一致性, 对可见光波段进行重采样处理, 空间分辨率与热红外图像一致为 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 。同时, 选择一景 Sentinel-2 影像数据 (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/> [2024-07-29]), 用于截取局部类别作为参考辅助结果分析, 选择 6 月中旬—9 月间云覆盖 $<10\%$ 的所有覆盖研究区域影像, 最后筛选得到 6 月 15 日一景影像, 下载数据级别为 L2 级, 是经过大气校正的地表反射率产品, 利用可见光波段进行真彩色合成, 空间分辨率为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 。

3.1.2 地表温度反演数据

本研究涉及的地表温度反演数据包括 Landsat 8 OLI/TIRS 图像、Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 图像、高级星载热辐射和反射辐射计全球发射率数据库 ASTER-GED (The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Emissivity

Database) 和美国气象环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 提供的再分析

大气数据 NCEP-TPW。上述数据在 GEE (Google Earth Engine) 上获取及预处理。

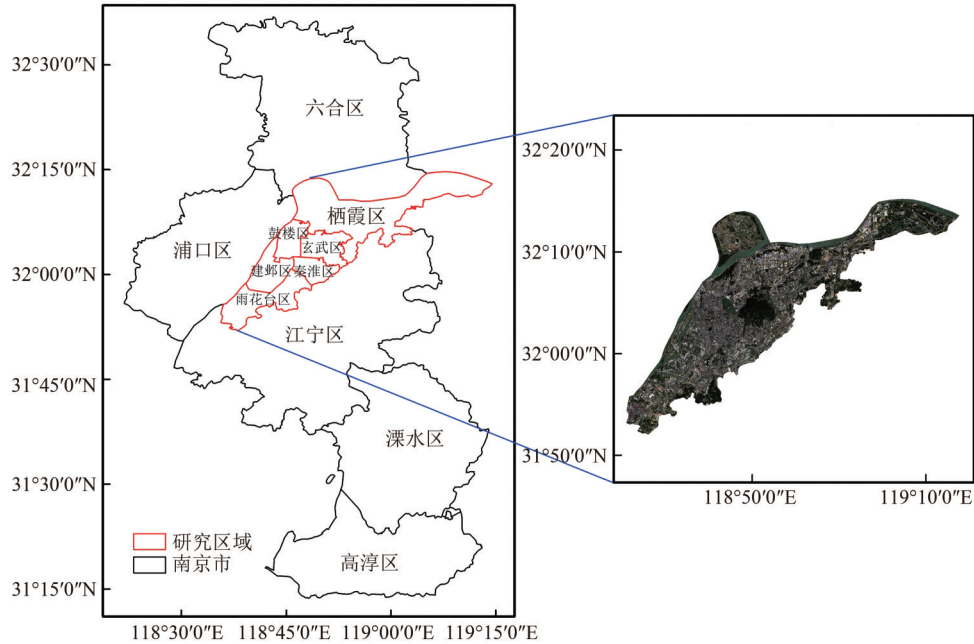


图1 研究区域地理位置及真彩色合成图像

Fig. 1 Geographical location and true-color composite image of the study area

本研究使用到的 Landsat 8、Landsat 9 地表反射率 SR (Surface Reflectance) 数据是经过大气校正后的 Collection2 中的二级产品数据。Landsat 8/9 大气层顶反射率 TOA (Top of Atmosphere reflection) 数据是 Collection2 中的 Tier 1 (T1) 级产品数据, 具体影像日期如表 1 所示。选择除南京市 2022 年 6 月—9 月中旬所有云覆盖 < 20% 的影像, 最后筛选得到 6 月 17 日、6 月 25 日、8 月 4 日、8 月 12 日、9 月 5 日共 5 景影像。ASTER-GED 数据集包含 5 个 ASTER 热红外波段的发射率, 采用温度—发射率分离 TES (Temperature Emissivity Separation) 算法从 2000—2008 年所有晴空 ASTER 图像中得出, 空间分辨率为 100 m × 100 m, 用于确定裸露地表发射率值。NCEP_TCWV 数据集提供了 1948 年—2018 年全球总积水汽含量 TCWV (Total Column Water Vapor) 数据, 涵盖了整个 Landsat 系列的运行期, 空间分辨率为 2.5°, 其时间分辨率为 6 h, 并根据 Landsat 图像获取的时间, 选择与其最近的 2 个数据进行线性插值, 得到大气水汽含量数据。

3.2 地表温度反演

本研究采用的统计单窗 SMW (Statistical Mono-Window) 算法, 在 GEE 平台上实现地表温度反演 (Ermida 等, 2020; Duguay-Tetzlaff 等, 2015)。除

了使用 Landsat 8/9 卫星影像外, 还使用了 ASTER-GED 及 NCEP_TCWV 数据集, 以获取裸露地表的比辐射率及大气水汽贡献。

表 1 本研究所使用的卫星影像

Table 1 Satellite imagery used in this study

日期	传感器	行列号	空间分辨率/m	影像云覆盖率/%
2022-06-17	OLI、TIRS	120、38	30、100	3.47
2022-06-25	OLI-2、TIRS-2	120、38	30、100	18.16
2022-08-04	OLI、TIRS	120、38	30、100	3.52
2022-08-12	OLI-2、TIRS-2	120、38	30、100	10.31
2022-09-05	OLI、TIRS	120、38	30、100	11.09

利用 Valor 和 Caselles (1996) 提出的基于植被覆盖度 (VCM) 的方法, 结合 ASTER-GED 产品进行发射率的计算, 计算过程可表示为

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (1)$$

式中, NDVI 为归一化植被指数, 常用于评估植被健康状况和覆盖程度, ρ_{nir} 为近红外波段的反射率, ρ_{red} 为红光波段的反射率, 利用计算得到的 NDVI 进行植被覆盖度 FVC (Fractional Vegetation Cover) 计算。

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_b}{NDVI_v - NDVI_b} \quad (2)$$

式中, $NDVI_v$ 为全植被覆盖时像元 NDVI 值, $NDVI_b$ 为全裸土覆盖时像元的 NDVI 值, 根据以往研究 (Ren 等, 2017; 孟翔晨 等, 2016; Guan 等, 2012), 将 $NDVI_v$ 设为 0.8, $NDVI_b$ 设为 0.2。

$$e_x = FVC \times e_{x,v} + (1 - FVC) \times e_{x,b} \quad (3)$$

式中, FVC 为像元处植被覆盖度, $e_{x,v}$ 为波段 b 下的植被发射率, $e_{x,b}$ 为波段 b 下的裸土发射率。

$$LST = A_i \times \frac{T_b}{\varepsilon_b} + B_i \frac{1}{\varepsilon_b} + C_i \quad (4)$$

式中, T_b 为热红外波段的亮度温度, ε_b 为相同波段下的发射率, A_i , B_i , C_i 是利用 TCWV 产品进行线性回归模拟得到的相关系数 (Kalnay 等, 1996; Li 等, 2013)。

3.3 局地气候分区分类

根据 Stewart 和 Oke (2012) 以及 Stewart 等

(2014) 提出的局地气候分区分类, 将城市分为 10 类建筑类型及 7 类土地覆盖类型, 如图 2 所示。局地气候分区分类方法主要有基于遥感的方法、基于 GIS 的方法和遥感与 GIS 相结合的方法共 3 种。其中: 基于遥感的方法应用广泛, 使用遥感影像结合随机森林或支持向量机进行像素级分类 (Cai 等, 2018; Wang 等, 2018); 基于 GIS 的方法则是使用高精度矢量数据 (如城市道路数据, 建筑物轮廓数据和建筑物高度数据等) 进行分类 (Du 等, 2020), 分类精度较高, 但其数据缺乏问题较严重且没有规范的分方案, 随着城市大数据的不断发展及制图流程的不断完善, 这一问题会很快得到解决; GIS 与遥感相结合的方法目前使用较少, 是将遥感数据与 GIS 数据进行优势集成, 以获得较高精度的分类结果 (Lopes 等, 2017; Yang 等, 2019; Liao 等, 2023)。

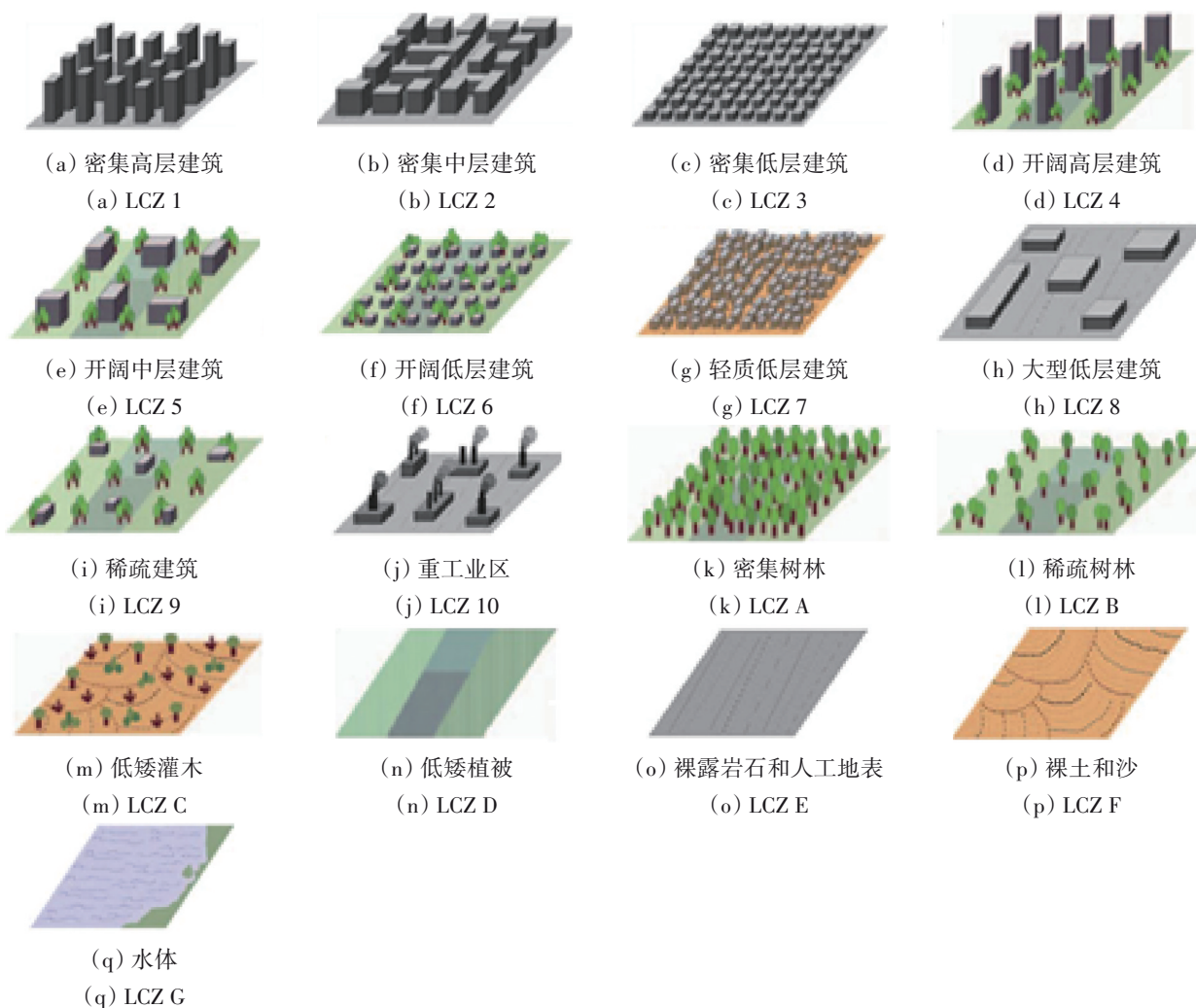


图 2 局地气候分区类型及示意图

Fig. 2 Local Climate Zone types and schematics

本研究使用基于遥感的分类方法，根据LCZ分类体系对南京市部分城区土地覆盖属性进行分类，分类结果总体精度为0.7，Kappa系数0.6，与以往的研究结果相符合（Demuzere等，2022；Ren等，2019）。主要分类流程分为以下几步（Bechtel等，2015；Bechtel等，2015）：

(1) 根据研究区域确定分类范围：依据研究区轮廓建立200 m的缓冲区域，作为分类范围进行训练样本的选择。

(2) 在Google Earth中绘制训练样本：样本分布均匀，各类样本选取数量保持一致。样本示意图如图2所示。

(3) 在SAGA-GIS中完成LCZ分类图：选择可见光至短波红外波段（Bands 1—7）及热红外波段（Bands 10、11）作为局地气候分区分类的特征波段。

3.4 热环境敏感性分析

不同的LCZ类型因其地表覆盖、材料等不同使其热环境呈现差异，而LCZ也会因为地理位置、景观异质性等因素表现出显著的类内热环境敏感性差异。在本研究使用的5景南京市夏季影像中，选择了2组时间间隔较小且间隔时间相同（6月17日和6月25日、8月4日和8月12日）的影像进行了地表温度相对变化的统计，以研究区域整体平均温度的相对变化率为基准，表征不同LCZ类内对于地表温度变化的敏感程度。具体计算方法如下：

$$\text{Var} = \left(\frac{\text{LST}_{\text{date}2,i} - \text{LST}_{\text{date}1,i}}{\text{LST}_{\text{date}1,i}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

式中，Var代表温度的相对变化率， $\text{LST}_{\text{date}1,i}$ 代表第*i*类局地气候分区类型在date1的平均地表温度， $\text{LST}_{\text{date}2,i}$ 代表第*i*类局地气候分区类型在date2的平均地表温度。

4 研究区夏季不同局地气候分区的热环境差异

4.1 局地气候分区分类

南京市主城区局地气候分区分类结果见图3所示。将研究区分为8个建筑类型（LCZs 1—6、8、10）及4个土地覆盖类型（LCZ A/B、D、F、G）。其中，建筑类型中，轻质低层建筑（LCZ 7）大多为使用木头，茅草等原材料建造而成的单层密集型建筑，在南京城市区域未找到其与零散建筑（LCZ 9）的分布；土地覆盖类型中，由于缺乏树木结构信息，将灌木纳入树木类型考虑，低矮植被在结果中同时代表了城区的耕地和草地。在南京城市区域建筑类型分布较广，其中开阔型高层建筑（LCZ 4）所占面积比例最大，其次是密集型中层建筑（LCZ 2），主要分布在秦淮区、建邺区、鼓楼区及雨花台区。地表覆盖类型中所占比例最大的为裸土或沙地（LCZ F），集中分布于雨花台区和栖霞区，存在大量未曾耕种的农田被分为裸土或沙地（LCZ F）一类。

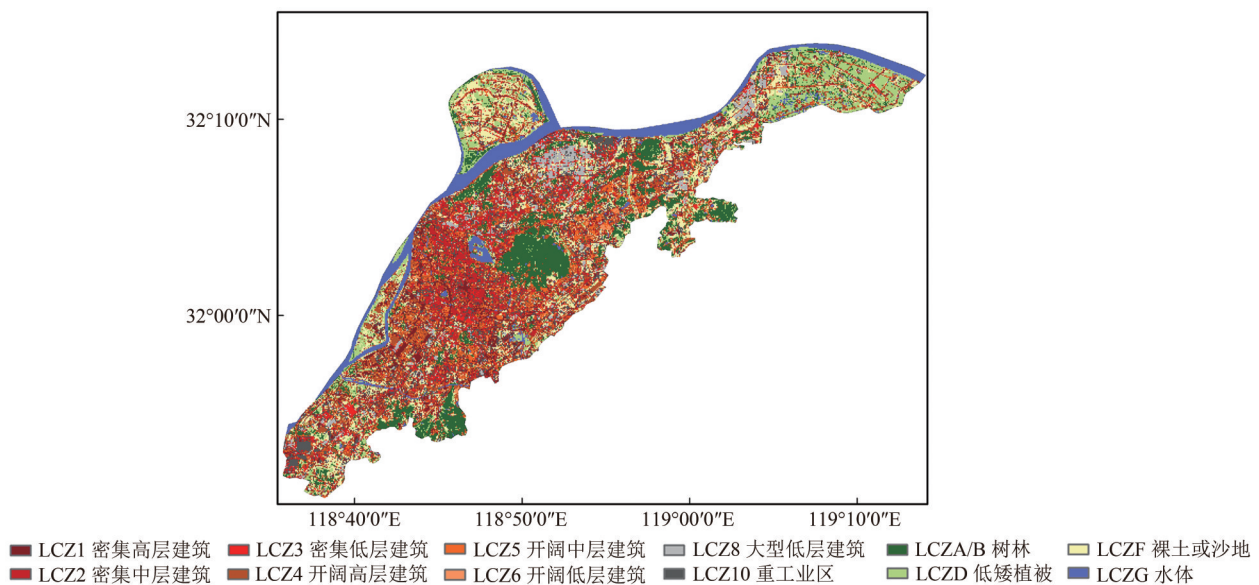


图3 LCZ分类结果

Fig. 3 Result of LCZ classification

4.2 局地气候分区类间热环境差异

为了探究不同LCZ类型之间的地表面热环境差异，5个不同时间测得的LCZ变化特征如图4。可见不同LCZ类型在时间尺度上变化规律基本保持一致，6—9月中旬期间，温度变化明显。

从同一建筑高度来看，紧密型建筑的地表温度高于开阔型建筑，密集型中层建筑（LCZ 2）、密集型低层建筑（LCZ 3）与开阔型中层建筑（LCZ 5）、开阔型低层建筑（LCZ 6）的温度差异较大，但是大型低层建筑（LCZ 8）的温度高于密集型、开放型低层建筑（LCZ 3、6）（图4）。从同一密集程度来看，密集型建筑和开阔型建筑表现出相似的热环境特征，高层建筑的温度明显低于

中层建筑和低层建筑，中层建筑温度略低于低层建筑，开阔度更高的大型低层建筑（LCZ 8）温度高于开阔型低层建筑（LCZ 6）（图4）。树木（LCZ A/B）和低矮植被（LCZ D）的地表温度低于建筑物及裸土或沙地（LCZ F）的地表温度，在地表温度高于35℃时2类LCZ温度差异不大，地表温度低于35℃时，树木（LCZ A/B）的地表温度低于低矮植被（LCZ D）（图4）。重工业区（LCZ 10）的地表温度高于密集型高层建筑物（LCZ 1）和开阔型建筑物的地表温度，低于密集型中、低层建筑物（LCZ 2、3）和大型低层建筑物（LCZ 8）。水体（LCZ G）地表温度低于其他LCZ类型（图4）

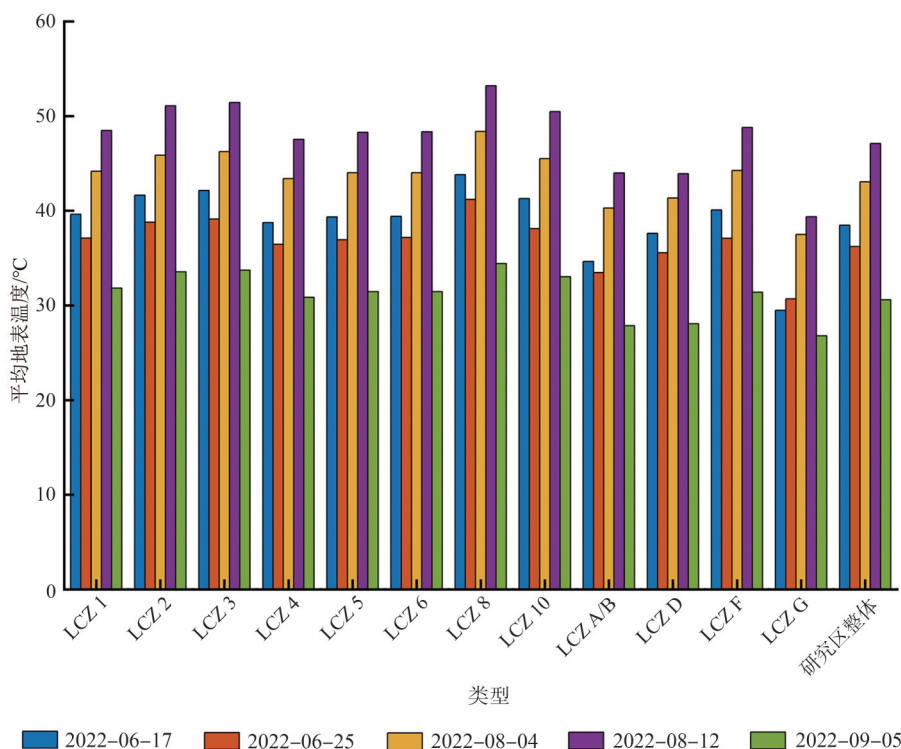


图4 不同LCZ类型在5个不同取样日期的平均地表温度

Fig. 4 Average surface temperature of different LCZ types on five different sampling date

图5为不同时间每个LCZ类型温度的统计值结果。可见：在刚进入夏季的6月，大型低层建筑（LCZ 8）平均地表温度最高，在6月17日达到43.82℃，6月25日达到41.21℃，其次是密集型低层建筑（LCZ 3），在6月17日达到42.13℃，6月25日达到39.12℃，水体的平均地表温度最低，在6月17日为29.49℃，6月25日为30.7℃。在8月4日，大型低层建筑（LCZ 8）平均地表温度最高为48.37℃，其次为密集型低层建筑（LCZ 3），平

均地表温度46.24℃，水体（LCZ G）平均地表温度最低为37.5℃。在8月12日，各项统计值在5日内达到最高，大型低层建筑（LCZ 8）的平均地表温度依旧最高为53.2℃，其次为密集型低层建筑（LCZ 3），平均地表温度51.43℃，水体最低为39.36℃。在9月5日，已经进入夏季末期，大型低层建筑（LCZ 8）的平均地表温度最高为34.42℃，其次为密集型低层建筑（LCZ 3），平均地表温度为33.73℃，密集型中层建筑（LCZ 2）

的平均地表温度为 33.54 °C 与密集型低层建筑 (LCZ 3) 相近, 水体 (LCZ G) 的平均地表温度最低为 26.79 °C。大型低层建筑 (LCZ 8) 和重工业

区 (LCZ 10) 地表温度最大值远高于其他类型, 这可能是由于在白天人类活动和工业生产造成较大影响。

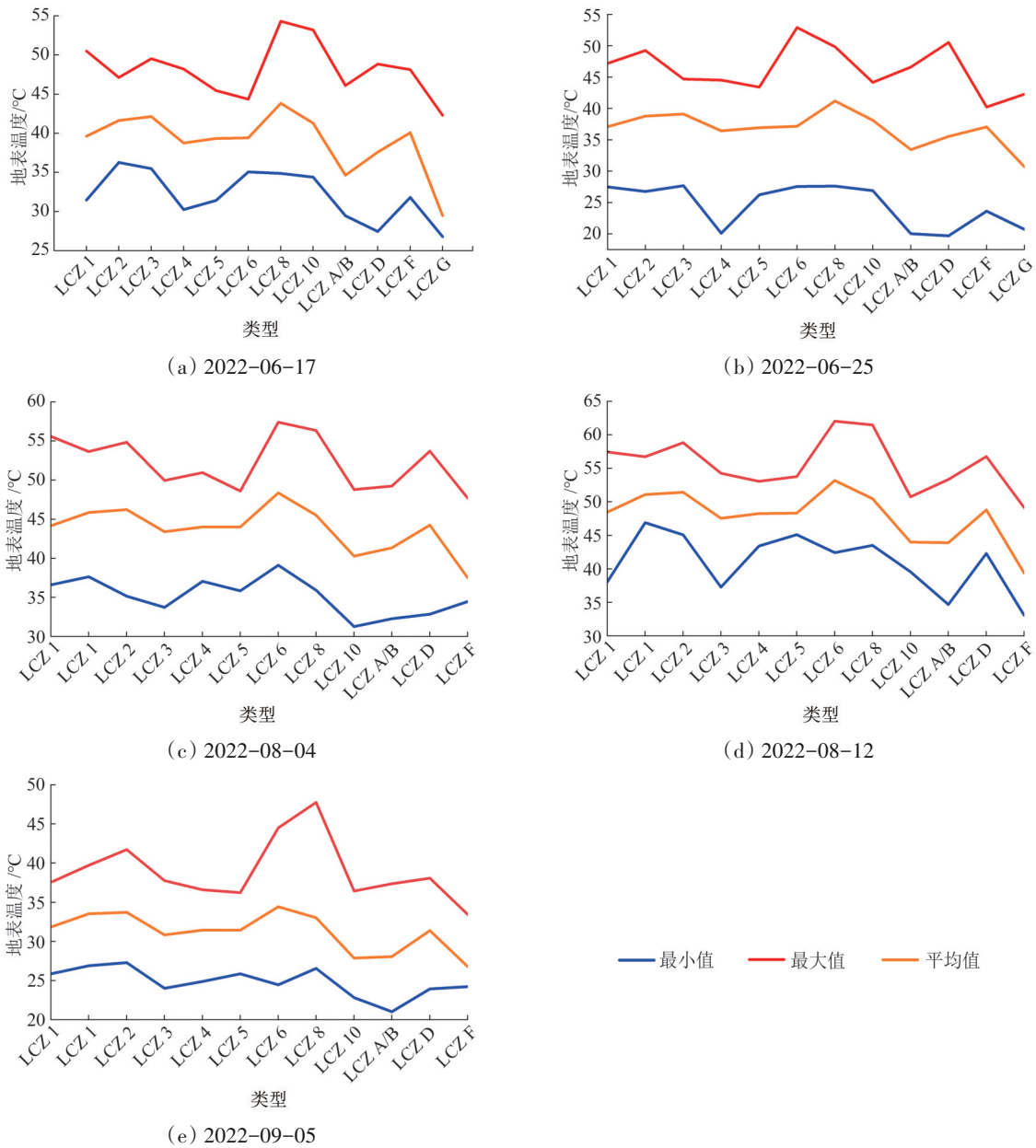


图5 不同日期每个LCZ类型地表温度

Fig. 5 Surface temperature for each LCZ type on different date

图6为各建筑类型的高分辨率局部示例, 从中可以发现, 较高的建筑高度也会产生较多的阴影, 对周围地物形成遮蔽, 降低地表温度 (Du等, 2018; He等, 2022)。建筑物周围景观异质性也会对平均地表温度造成影响, 开阔型建筑周围会存在树木等城市绿化, 而密集型建筑周围多为硬质铺地。大型低层建筑 (LCZ 8) 在各个时期均表现

出了最高的平均地表温度, 这与Du等 (2020) 的研究结果相一致, 这可能是由于大型低层建筑 (LCZ 8) 通常是工厂板房, 人为热造成影响, 同时更高的开阔度以及更大的建筑面积, 使其一直处于太阳照射, 在周围没有临近建筑的阴影遮挡, 表现出了较高的地表温度。水体 (LCZ G) 表现出了最低的平均地表温度, 这是因为研究时间点选

择在夏季,水体的比热容较大,相较于其他LCZ类型温度更加稳定,升温慢,同时受周围环境因素产生的温度变化较小。树木(LCZ A/B)及低矮

植被(LCZ D)的温度表现低于建筑物,低矮植被(LCZ D)的温度表现高于树木(LCZ A/B)。

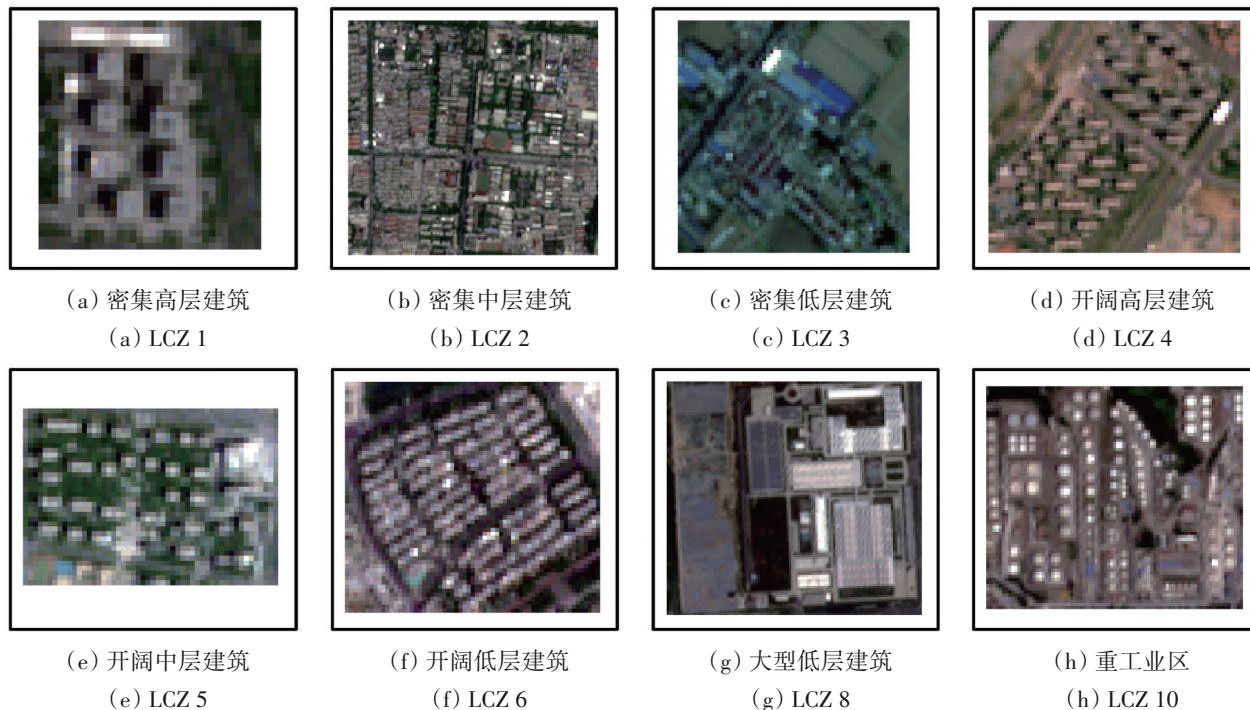


图6 Sentinel-2影像中获取的LCZ局部具体示例

Fig. 6 LCZ localized specific examples Obtained from the Sentinel-2 image

图7为6个不同日期的各LCZ类型与当日南京市整体平均地表温度的差异情况。可见:不同LCZ类型之间对于平均地表温度的偏离差异较大。在夏季刚开始的6月与即将结束的9月,不同LCZ类型与整体平均温度的偏离程度小于8月。具有较高建筑密度的密集型建筑和较大建筑面积的重工业区(LCZ 10)、大型低层建筑(LCZ 8)高于平均温度较多,在8月12日除密集型高层建筑(LCZ 1),均高于平均地表温度 4°C 以上。树木(LCZ A/B)、低矮植被(LCZ D)和水体(LCZ G)一直低于平均温度,水体(LCZ G)最为明显,在6月17日低于平均温度 8.98°C ,在8月12日低于平均温度 7.75°C 。开阔型建筑整体上与平均地表温度保持了较高的一致性,偏差 $<1^{\circ}\text{C}$ 。通过对比不同日期的地表温度统计数据可以发现,高建筑密度表现出较高的地表温度,建筑高度的上升会带来地表温度的下降,这与Hu等(2019)和Xiang等(2023)的研究结果相一致。建筑物密度及其高度对温度的影响是复杂的,在以往的对于城市形态的研究认为,在炎热的夏季城市建筑物密度与室

内温度呈现负相关,但与地表温度呈正相关且影响明显(Azhdari等,2018; Song等,2020)。在忽略纬度因素的影响下,随着建筑物高度的增加,空气密度降低,风速增加。同时,建筑物密度越高,建筑周围风速越高。因此建筑物越高,建筑物密度越大空气流通速度越快,易带来热量的散失。

4.3 局地气候分区类内热环境敏感性差异

如图8所示,在6月17日与6月25日的对比结果可以看出,温度整体下降,只有水体(LCZ G)保持正向变化(4.1%)。重工业区(LCZ 10)的地表温度的相对变化率最大,达到了 -7.68% ,裸土或沙地(LCZ F)的温度变化率达到了 -7.46% ,密集型低层建筑(LCZ 3)的温度变化率达到了 -7.14% 以及密集型中层建筑(LCZ 2)达到 -6.84% 。而8月4日与8月12日的对比结果则显示,温度整体上升,密集型中层建筑(LCZ 2)的温度增幅最大为 11.36% ,其次为密集型低层建筑(LCZ 3)为 11.22% ,重工业区(LCZ 10)和裸土

或沙地 (LCZ F) 同样表现出了较大的温度增幅 (10.9% 和 10.28%), 水体 (LCZ G) 表现出了最小的温度变化幅度为 4.96%。在两组对比结果中, 密集型中层建筑 (LCZ 2)、密集型低层建筑

(LCZ 3)、重工业区 (LCZ 10) 和裸土或沙地 (LCZ F) 都呈现出了较大的温度差异。同时, 无论整体温度变化趋势为升高或降低, 水体均表现出温度升高, 且变化幅度最低。

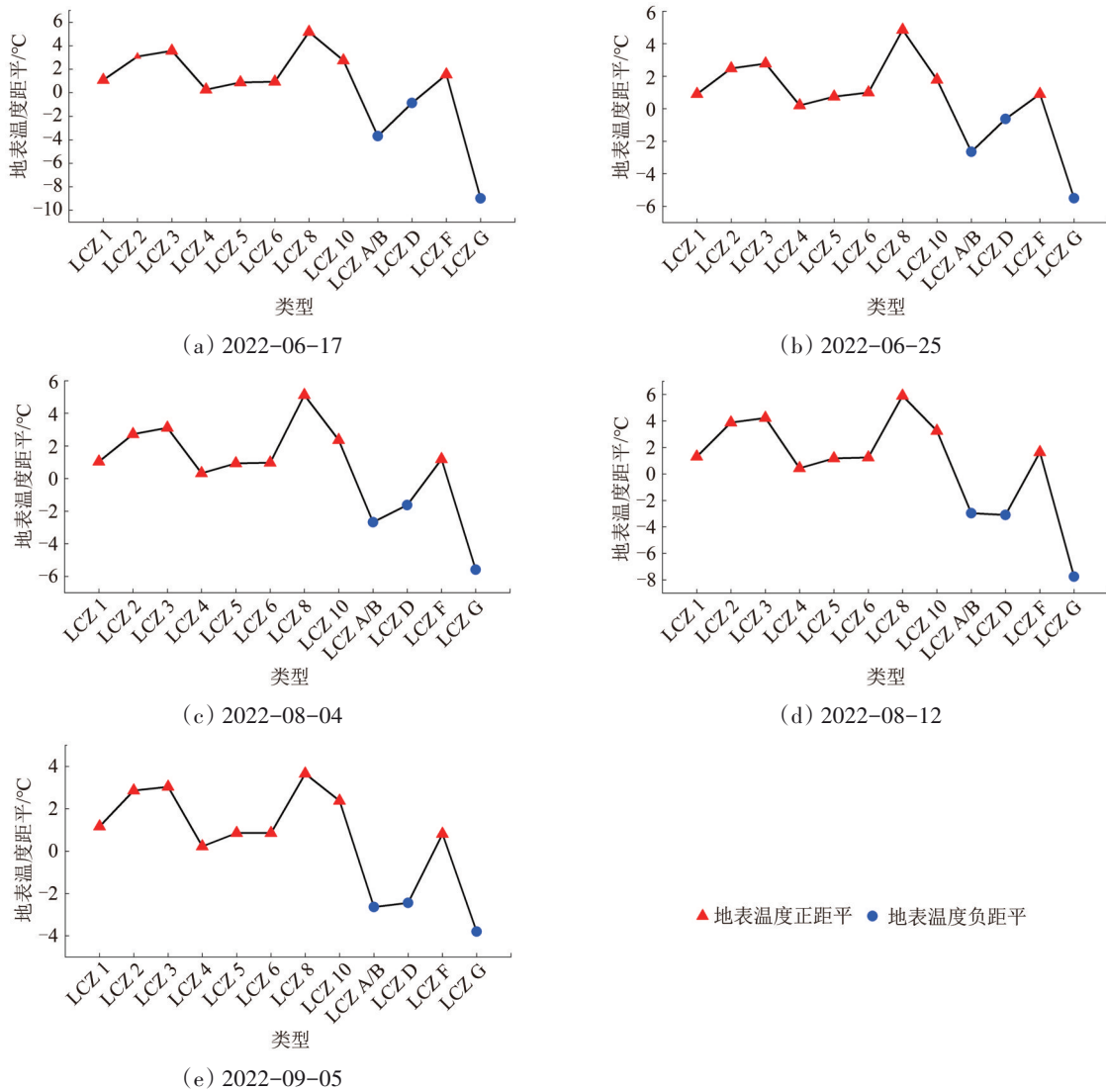


图7 各LCZ类型与城市平均地表温度的偏离情况

Fig. 7 The deviation of each LCZ type from the average urban surface temperature

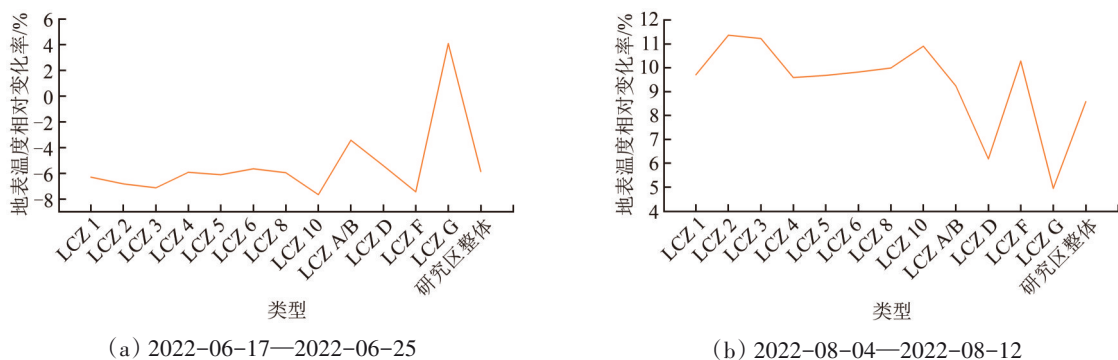


图8 各LCZ类型地表温度平均变化率

Fig. 8 The average rate of change in surface temperature for each LCZ types

5 结 论

本文利用多源遥感数据和基于遥感的分类方法,对南京市主城区及部分郊区进行了局地气候分区分类,并基于 Landsat 8/9 遥感影像动态分析了南京市部分城区夏季地表热环境 LCZ 类间热环境、类内热环境敏感性差异。主要结论如下:

(1) 本研究实现的局地气候分区分类将南京市主城区分为 12 个标准下垫面类别: 密集型高层建筑 (LCZ 1)、密集型中层建筑 (LCZ 2)、密集型低层建筑 (LCZ 3)、开阔高层建筑 (LCZ 4)、开阔中层建筑 (LCZ 5)、开阔低层建筑 (LCZ 6)、大型低层建筑 (LCZ 8)、重工业区 (LCZ 10)、树林 (LCZ A/B)、低矮植被 (LCZ D)、裸土或沙地 (LCZ F) 和水体 (LCZ G)。结果精度符合研究要求,可用于开展后续地表热环境研究;

(2) 在 LCZ 类间特征中,高建筑密度和低建筑高度会呈现出较高的地表温度表现。其中大型低层建筑 (LCZ 8) 地表温度最高,水体 (LCZ G) 地表温度最低,树林 (LCZ A/B)、低矮植被 (LCZ D) 和水体 (LCZ G) 地表温度低于总体平均值,可以认为这 3 类对地表热环境起到一定的降温作用;

(3) 在 LCZ 的类内特征中,密集型中层建筑 (LCZ 2)、密集型低层建筑 (LCZ 3)、重工业区 (LCZ 10) 和裸土或沙地 (LCZ F) 地表温度相对变化剧烈,开阔型建筑 (LCZs 4—6) 地表温度相对变化与研究区域整体保持一致。

参考文献 (References)

- Aslam A and Rana I A. 2022. The use of local climate zones in the urban environment: a systematic review of data sources, methods, and themes. *Urban Climate*, 42: 101120 [DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101120]
- Azhdari A, Soltani A and Alidadi M. 2018. Urban morphology and landscape structure effect on land surface temperature: evidence from Shiraz, a semi-arid city. *Sustainable Cities and Society*, 41: 853-864 [DOI: 10.1016/j.scs.2018.06.034]
- Bechtel B, Alexander P J, Böhner J, Ching J, Conrad O, Feddema J, Mills G, See L and Stewart I. 2015. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(1): 199-219 [DOI: 10.3390/ijgi4010199]
- Bechtel B and Daneke C. 2012. Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4): 1191-1202 [DOI: 10.1109/Jstars.2012.2189873]
- Bechtel B, Foley M, Mills G, Ching J, See L, Alexander P, O'Connor M, Albuquerque T, Andrade M, Brovelli M, Das D, Fonte C, Petit G, Hanif U, Jiménez J, Lackner S, Liu W B, Perera N, Rosni N A and Gál T. 2015. CENSUS of cities: LCZ classification of Cities (Level 0) - workflow and initial results from various cities//9th International Conference on Urban Climate Jointly with 12th Symposium on the Urban Environment. Toulouse: [s.n.].
- Cai M, Ren C, Xu Y, Lau K K L and Wang R. 2018. Investigating the relationship between local climate zone and land surface temperature using an improved WUDAPT methodology - a case study of Yangtze River Delta, China. *Urban Climate*, 24: 485-502 [DOI: 10.1016/j.uclim.2017.05.010]
- Chang Y, Xiao J F, Li X X, Middel A, Zhang Y W, Gu Z L, Wu Y P and He S. 2021. Exploring diurnal thermal variations in urban local climate zones with ECOSTRESS land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 263: 112544 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112544]
- Chen Y H, Wang D D, Zhan W F, Zhou J, Hu D Y, Quan J L, Sun H, Guo Z, Xia H P, Dai X J and Jiang L. 2024. Remotely sensed urban surface temperature: from directional temperature, complete surface temperature to three-dimensional surface temperature. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(6): 1480-1496 (陈云浩, 王丹丹, 占文凤, 周纪, 胡德勇, 全金玲, 孙灏, 郭微, 夏海萍, 代秀娟, 姜璐. 2024. 城市地表温度遥感: 从方向温度、全表面温度到三维表面温度. *遥感学报*, 28(6): 1480-1496) [DOI: 10.11834/jrs.20233064]
- Demuzere M, Kittner J and Bechtel B. 2021. LCZ generator: a web application to create local climate zone maps. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 637455 [DOI: 10.3389/fenvs.2021.637455]
- Demuzere M, Kittner J, Martilli A, Mills G, Moede C, Stewart I D, van Vliet J and Bechtel B. 2022. A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 14(8): 3835-3873 [DOI: 10.5194/essd-14-3835-2022]
- Du P J, Chen J K, Bai X Y and Han W Q. 2020. Understanding the seasonal variations of land surface temperature in Nanjing urban area based on local climate zone. *Urban Climate*, 33: 100657 [DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100657]
- Du Y X, Mak C M and Tang B S. 2018. Effects of building height and porosity on pedestrian level wind comfort in a high-density urban built environment. *Building Simulation*, 11(6): 1215-1228 [DOI: 10.1007/s12273-018-0451-y]
- Duan S B, Ru C, Li Z L, Wang M M, Xu H Q, Li H, Wu P H, Zhan W F, Zhou J, Zhao W, Ren H Z, Wu H, Tang B H, Zhang X, Shang G B and Qin Z H. 2021. Reviews of methods for land surface temperature retrieval from Landsat thermal infrared data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1591-1617 (段四波, 茹晨, 李召良, 王猛猛, 徐涵秋, 历华, 吴鹏海, 占文凤, 周纪, 赵伟, 任华忠, 吴骅, 唐伯惠, 张霞, 尚国珩, 覃志豪. 2021. Landsat 卫星热红外数据地表温度遥感反演研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1591-1617) [DOI: 10.11834/jrs.20211296]
- Duguay-Tetzlaff A, Bento V A, Göttsche F M, Stöckli R, Martins J P A, Trigo I, Olesen F, Bojanowski J S, da Camara C and Kunz H.

2015. Meteosat land surface temperature climate data record: achievable accuracy and potential uncertainties. *Remote Sensing*, 7(10): 13139-13156 [DOI: 10.3390/rs71013139]
- Ermida S L, Soares P, Mantas V, Göttsche F M and Trigo I F. 2020. Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series. *Remote Sensing*, 12(9): 1471 [DOI: 10.3390/rs12091471]
- Guan K, Wood E F and Caylor K K. 2012. Multi-sensor derivation of regional vegetation fractional cover in Africa. *Remote Sensing of Environment*, 124: 653-665 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.005]
- He Y H, Yu C Y, He Y C, Yan B W and Fu J Y. 2022. Spatiotemporal variation in air density and associated effects on the wind-induced response of high-rise buildings. *Engineering Structures*, 264: 114428 [DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114428]
- Hu J, Yang Y B, Pan X, Zhu Q, Zhan W F, Wang Y, Ma W Y and Su W Z. 2019. Analysis of the spatial and temporal variations of land surface temperature based on local climate zones: a case study in Nanjing, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(11): 4213-4223 [DOI: 10.1109/Jstars.2019.2926502]
- Huang F, Jiang S D, Zhan W F, Bechtel B, Liu Z H, Demuzere M, Huang Y, Xu Y, Ma L, Xia W J, Quan J L, Jiang L, Lai J M, Wang C G, Kong F H, Du H L, Miao S Q, Chen Y Y and Chen J K. 2023. Mapping local climate zones for cities: a large review. *Remote Sensing of Environment*, 292: 113573 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113573]
- IPCC. 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Jiang S D, Zhan W F, Yang J, Liu Z H, Huang F, Lai J M, Li J F, Hong F L, Huang Y, Chen J K and Li X H. 2020. Urban heat island studies based on local climate zones: a systematic overview. *Acta Geographica Sinica*, 75(9): 1860-1878 (江斯达, 占文凤, 杨俊, 刘紫涵, 黄帆, 赖佳梦, 李久枫, 洪发路, 黄媛, 陈吉科, 李旭辉). 2020. 局地气候分区框架下城市热岛时空分异特征研究进展. *地理学报*, 75(9): 1860-1878 [DOI: 10.11821/dlxb202009004]
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W G, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y J, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J E, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R and Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437-472 [DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:Tnyrp>2.0.Co;2]
- Li N L, Wang B, Yao Y, Chen L D and Zhang Z M. 2022. Thermal contribution of the local climate zone and its spatial distribution effect on land surface temperature in different macroclimate cities. *Remote Sensing*, 14(16): 4029 [DOI: 10.3390/rs14164029]
- Li Z L, Tang B H, Wu H, Ren H Z, Yan G J, Wan Z M, Trigo I F and Sobrino J A. 2013. Satellite-derived land surface temperature: current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131: 14-37 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.008]
- Liao C, Cao R, Gao Q L, Cao J Z and Luo N X. 2023. Exploring how street-level images help enhance remote sensing-based local climate zone mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 7662-7674 [DOI: 10.1109/Jstars.2023.3301792]
- Liu H M, He B J, Gao S H, Zhan Q M and Yang C. 2023. Influence of non-urban reference delineation on trend estimate of surface urban heat island intensity: a comparison of seven methods. *Remote Sensing of Environment*, 296: 113735 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113735]
- Lopes P, Fonte C, See L and Bechtel B. 2017. Using OpenStreetMap data to assist in the creation of LCZ maps//2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). Dubai, United Arab Emirates: IEEE [DOI: 10.1109/JURSE.2017.7924630]
- Mao Y Q, Wu H Y, Pei H Y, He P C and Liu D Q. 2012. Climate features of summer rainfall in Nanjing during recent 50 a. *Journal of the Meteorological Sciences*, 32(6): 646-652 (毛宇清, 吴海英, 裴海琪, 何鹏程, 刘冬晴). 2012. 近50a南京夏季降水气候特征. *气象科学*, 32(6): 646-652 [DOI: 10.3969/2012jms.0047]
- Meng X C, Li H, Du Y M, Cao B, Liu Q H, Sun L and Zhu J S. 2016. Estimating land surface emissivity from ASTER GED products. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(3): 382-396 (孟翔晨, 历华, 杜永明, 曹彪, 柳钦火, 孙林, 朱金山). 2016. 基于ASTER GED产品的地表发射率估算. *遥感学报*, 20(3): 382-396 [DOI: 10.11834/jrs.20165230]
- Qiao Q, Zhen Z L and Lin Y D. 2023. Assessment and simulation of thermal environments in Taiyuan urban built-up area, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11: 1261291 [DOI: 10.3389/fevo.2023.1261291]
- Ren C, Cai M, Li X W, Zhang L, Wang R, Xu Y and Ng E. 2019. Assessment of local climate zone classification maps of cities in China and feasible refinements. *Scientific Reports*, 9(1): 18848 [DOI: 10.1038/s41598-019-55444-9]
- Ren H Z, Liu R Y, Qin Q M, Fan W J, Yu L and Du C. 2017. Mapping finer-resolution land surface emissivity using Landsat images in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13): 6764-6781 [DOI: 10.1002/2017jd026910]
- Ren X, Wang Y W, Zhang Z, Yang Y C, Hu C and Kang H Q. 2017. Simulation studies for Lake Taihu effect on surrounding cities thermal environment. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(4): 645-660 (任侠, 王咏薇, 张圳, 杨亦辰, 胡诚, 康汉青). 2017. 太湖对周边城市热环境影响的模拟. *气象学报*, 75(4): 645-660 [DOI: 10.11676/qxxb2017.046]
- Song J C, Chen W, Zhang J J, Huang K, Hou B Y and Prishchepov A V. 2020. Effects of building density on land surface temperature in China: spatial patterns and determinants. *Landscape and Urban Planning*, 198: 103794 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.103794]
- Stewart I D and Oke T R. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900 [DOI: 10.1175/Bams-D-11-00019.1]
- Stewart I D, Oke T R and Scott Krayenhoff E. 2014. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4): 1062-1080 [DOI: 10.1002/joc.3746]
- Valor E and Caselles V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, 57(3): 167-184 [DOI: 10.1016/0034-4257(96)00039-9]

- Wang R, Ren C, Xu Y, Lau K K L and Shi Y. 2018. Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: a case study of Hong Kong. *Urban Climate*, 24: 567-576 [DOI: 10.1016/j.uclim.2017.10.001]
- Wang R, Voogt J, Ren C and Ng E. 2022. Spatial-temporal variations of surface urban heat island: an application of local climate zone into large Chinese cities. *Building and Environment*, 222: 109378 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109378]
- Xiang Y, Tang Y Q, Wang Z H, Peng C C, Huang C B, Dian Y Y, Teng M J and Zhou Z X. 2023. Seasonal variations of the relationship between spectral indexes and land surface temperature based on local climate zones: a study in three Yangtze River Megacities. *Remote Sensing*, 15(4): 870 [DOI: 10.3390/rs15040870]
- Xie Q J and Sun Q. 2021. Monitoring thermal environment deterioration and its dynamic response to urban expansion in Wuhan, China. *Urban Climate*, 39: 100932 [DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100932]
- Yang J, Jin S H, Xiao X M, Jin C, Xia J H, Li X M and Wang S J. 2019. Local climate zone ventilation and urban land surface temperatures: towards a performance-based and wind-sensitive planning proposal in megacities. *Sustainable Cities and Society*, 47: 101487 [DOI: 10.1016/j.scs.2019.101487]
- Yao F, Yang X Q, Liu M J, Zhang Y Q and Li H. 2023. Identification of Meiyu process and spatiotemporal characteristics of different precipitation levels during the Meiyu period over the Yangtze-Huai River Basin. *Progress in Geography*, 42(1): 145-160 (姚飞, 杨秀芹, 刘慕嘉, 张余庆, 李华. 2023. 江淮流域梅雨过程识别及梅雨期分级降水时空特征. *地理科学进展*, 42(1): 145-160) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.01.012]
- Yuan B, Zhou L, Hu F N and Zhang Q. 2022. Diurnal dynamics of heat exposure in Xi'an: a perspective from local climate zone. *Building and Environment*, 222: 109400 [DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109400]
- Zhang T, Yang R Q, Yang Y B, Li L and Chen L Q. 2021. Assessing the urban eco-environmental quality by the remote-sensing ecological index: application to Tianjin, North China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7): 475 [DOI: 10.3390/ijgi10070475]

Study on the summer surface thermal environment of Nanjing urban area based on local climate zone

GUAN Xiao¹, JIANG Sida¹, TIAN Jia², TIAN Qingjiu¹

1. *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*

2. *School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

Abstract: The issue of global warming has become increasingly prevalent in recent years. Concurrently, there exists a considerable prevalence of extreme meteorological occurrences in urban environment, exemplified by the intense heat that characterizes the summer season. The urban heat environment has become a research focus under the background of global warming and rapid urbanization. At present, Local Climate Zone (LCZ) represents the principal method of classification employed in the field of urban thermal environment research. In comparison with the traditional urban - rural dichotomy, this approach entails a further subdivision of the city on the basis of the physical characteristics of the buildings and the natural ground cover features. Based on the LCZ system, this paper investigated the summer thermal environment characteristics of the main urban area of Nanjing from two perspectives: interclass and intraclass, using Landsat image inversion of surface temperature. The classification of LCZs divided the study area into 12 categories, of which 8 were designated for building types and 4 were designated for surface cover types. The proportion of building types within the study area was greater than that of ground cover types. The building types exhibited a high proportion of open high-rise (LCZ 4) and dense mid-rise (LCZ 2), which were predominantly concentrated in the central urban areas. The largest surface cover type was bare soil and sand (LCZ F). Results indicated that the thermal environments among LCZ classes showed large differences. Higher building densities had higher mean LSTs. The mean LSTs tended to rise gradually as building height decreased. The time-series trend of the mean temperature for the various LCZ types was highly consistent with the overall mean temperature trend observed in the study area. Large low-rise (LCZ 8) consistently presented high average surface temperatures during the summer months, reaching a maximum of 53.2 °C. Moreover, the average surface temperature for each building type was higher than the average surface temperature for the study area as a whole, and the average surface temperature for each natural ground cover type except bare soil or sand was lower than the average surface temperature for the study area as a whole. The mean surface temperature of compact mid-rise (LCZ 2), compact low-rise (LCZ 3), large low-rise (LCZ 8), and heavy industry (LCZ 10) were higher than the overall mean temperature of the study area. Furthermore, this study presented intraclass analysis of different LCZ types using relative rates of change in LST. An increased sensitivity to temperature fluctuations may have adverse effects on human well-being and economic productivity. Another important finding was that the intra-LCZ thermal environment analyses indicated a heightened sensitivity to temperature fluctuations in the following categories: compact mid-rise (LCZ 2), compact low-rise (LCZ 3), heavy industry (LCZ 10), and bare soil and sand (LCZ F). The findings of this study can serve as a valuable reference point and provide insights for further research in the fields of urban planning, the mitigation of the urban heat island effect, and the enhancement of the urban heat environment.

Key words: urban heat environment, local climate zone, Nanjing city, land surface temperature, Inter-LCZ difference, intra-LCZ difference
Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFF1303903); Open Fund of State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology (No. SKLURE2023-2-6)