

DOI: 10.5846/stxb202105181297

耿树丰,任嘉义,杨俊,国安东,席建超.局地气候区视角下的城市热环境研究.生态学报,2022,42(6):2221-2227.

Geng S F, Ren J Y, Yang J, Guo A D, Xi J C. Exploration of urban thermal environment based on local climate zone. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2221-2227.

## 局地气候区视角下的城市热环境研究

耿树丰<sup>1</sup>,任嘉义<sup>1</sup>,杨俊<sup>1,2,\*</sup>,国安东<sup>1</sup>,席建超<sup>2,3</sup>

1 辽宁师范大学自然地理与空间信息科学辽宁省重点实验室,大连 116029

2 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室,北京 100101

3 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

**摘要:**城市化发展带来热岛效应,影响区域气候变化,地表温度可以反映地表增温程度,更能直接影响人类居住舒适度。运用 Landsat8 TIRS 热红外遥感数据和气象数据反演地表温度,以建筑数据、遥感影像为基础,通过 GIS 空间分析、决策树分类等方法划分局地气候区,从区域角度定量分析不同类型气候区地表温度分异规律。结果表明:(1)北京、天津、石家庄密集型建筑分别占比 27.54%、21.95%、25.09%,且以中低层为主,城市公园包含了主要的绿地和水体。(2)在空间分布上,市中心地表温度高于郊区,热岛效应显著,森林、河流是主要低温区。(3)不同气候区的地表温度存在差异,建成区总体高于自然地表;其中建筑区域内表现为紧凑型低层(LCZ3)平均地表温度最高,稀疏型高层(LCZ4)地表温度最低,北京、天津、石家庄分别相差 1.53℃、2.30℃、2.22℃;植被和水体能够降低地表温度,裸土和铺设路面的地表温度始终较高。因此应充分考虑建筑布局,合理利用植被和水域分布,减少热量聚集,以改善城市生态环境。

**关键词:**城市气候;局地气候区;地表温度;建筑环境;京津冀

## Exploration of urban thermal environment based on local climate zone

GENG Shufeng<sup>1</sup>, REN Jiayi<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1,2,\*</sup>, GUO Andong<sup>1</sup>, XI Jianchao<sup>2,3</sup>

1 Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Urbanization brings about heat island effect, which affects regional climate change. Land surface temperature can reflect the degree of surface warming, and can directly affect human living comfort. This study retrieved land surface temperature (LST) based on Landsat 8 TIRS thermal infrared remote sensing data and meteorological data, and the local climate zones (LCZ) were divided by GIS spatial analysis and decision tree classification. We quantitatively studied LST differentiation rules of different types of local climate zones from the regional perspective. The results showed that (1) most of the buildings in study area were low- and middle-level, with the intensive buildings accounting for 27.54%, 21.95% and 25.09%, respectively. Urban park contained the main green and water space. (2) In terms of spatial distribution, LST in the city center was higher than that in the suburbs. Forest and river were the main low temperature areas, and the heat island effect was significant. (3) LST in built-up LCZs were generally higher than that of natural LCZs. Among built-up LCZs, LCZ3 (compact low rise) had the highest LST, while LCZ4 (sparse high-rise) had the lowest LST, with a difference of 1.53 °C, 2.30 °C and 2.22 °C in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang, respectively. Vegetation and water can lower LST, however, the LST of bare soil and paved road were always higher. Therefore, building layout should be fully

基金项目:国家自然科学基金项目(41771178,41671151);辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2017017);辽宁省教育厅项目(H201783628)

收稿日期:2021-05-18; 网络出版日期:2021-11-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjun@lnnu.edu.cn

considered and vegetation and water distribution should be rationally utilized to reduce heat accumulation and improve urban ecological environment.

**Key Words:** urban climate; local climate zone; land surface temperature; building environment; Beijing-Tianjin-Hebei

21 世纪以来,世界各国城市快速发展,人口聚集,不透水面和建筑改变了原有自然覆盖特征<sup>[1-2]</sup>。在工业发达、经济发展增速较快的大城市,局部热环境和小气候在不同程度上发生变化,城乡之间产生温度差异,引发城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI),不利于可持续发展<sup>[3-6]</sup>。UHI 是城市化导致微气候变化的总体反映,地表温度(Land Surface Temperature, LST)能够说明地表增温程度,更能直接影响人类居住舒适度,近年来受到广泛关注<sup>[7-8]</sup>。

起初,针对地表温度的研究集中于地表覆盖, LST 与不透水面密度(正)和植被密度(负)之间存在显著的相关性<sup>[9-10]</sup>。另外,地表覆盖组分的空间分布及结构对 LST 的影响存在差异,聚集度越大,地表温度越高<sup>[11-15]</sup>。然而,由于建筑在水平地面和垂直空间分布具有不均匀性,城市内部狭窄的街道和高楼对热量和通风存在阻挡作用,建筑的几何形态对 LST 的影响更加复杂<sup>[16-20]</sup>。对于发展中国家,特别是人口稠密区,土地利用方式多样化发展,传统城市热岛研究已不能很好地反映当地实际热环境状况<sup>[21]</sup>。

为了综合考虑城市形态对热环境的影响,Stewart 将建筑物屋顶至地面的一层大气定义为城市冠层,并按照建筑类型和地表覆盖类型将城市划分为 17 个气候区,即局地气候分区(Local Climate Zone, LCZ),代表地物的简单组合<sup>[22]</sup>,为研究城市热环境提供了新思路。局地气候分区的表面温度随研究区域地理位置、地形、地表建筑物高度、间距、材料、透水率、几何形状等的改变而不同,已有研究表明温度差异存在于大多数 LCZ 类别中,Hu 等基于局地气候区分析了地表温度时空变化<sup>[23]</sup>,Yang 等发现城市建成区 LCZ 的 LST 高于自然地表 LCZ,且 LST 与自然 LCZ 相关性更高<sup>[24-25]</sup>。在 LCZ 制图方面,Zhao 等以局地气候区为空间背景构建了地表自训练分类框架<sup>[26]</sup>;Zheng 等基于 GIS 方法对高密度城市进行了局地气候区制图<sup>[27]</sup>。LCZ 分类体系提高了城市景观与气候分类的匹配程度<sup>[28-29]</sup>,但目前国内在 LCZ 尺度下研究 LST 的成果相对较少,本研究采用遥感影像与建筑数据相结合划分 LCZ,能够改善单一影像在划分建成区方面的不足,有利于探究局地气候视角下的 LST 变化规律。

综上所述,本文以建筑数据、Landsat 8 影像和气象数据为基础,运用地表温度(LST)反演、决策树分类、GIS 空间分析等方法对京津冀划分局地气候区,定量分析不同 LCZ 下城市 LST 的分异规律,为国土空间规划、缓解热岛、改善城市生态环境提供参考。

## 1 研究区概况

京津冀地区位于中国环渤海心脏地带,是中国北方经济规模最大、最具活力的地区,经济发展带来一定的环境问题。如图 1,北京(39°26'—41°03'N, 115°25'—117°30'E)地处华北平原北部,地势西北高、东南低,气候为暖温带半湿润半干旱季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥;天津(38°34'—40°15'N, 116°43'—118°04'E)位于华北平原东北部,东临渤海,属暖温带半湿润季风性气候,年平均气温约为 14℃,7 月最热,1 月最冷;石家庄(37°27'—38°47'N, 113°30'—115°20'E),位于河北省中南部,临近渤海海域,温带季风气候显著,四季分明,截至 2019 年,建成区面积 338.16 km<sup>2</sup>,城镇人口 676.14 万人,城镇化率 65.05%。本研究选择三个城市的主城区作为研究区域,即既包含建成区也包含市中心外围的过渡地带,在城市气候带背景下探究地表温度分异规律。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据来源与预处理

选取建筑数据及 Landsat8 遥感数据,如表 1 所示。由于季节变化明显,全年温差较大,选取 2019 年夏季

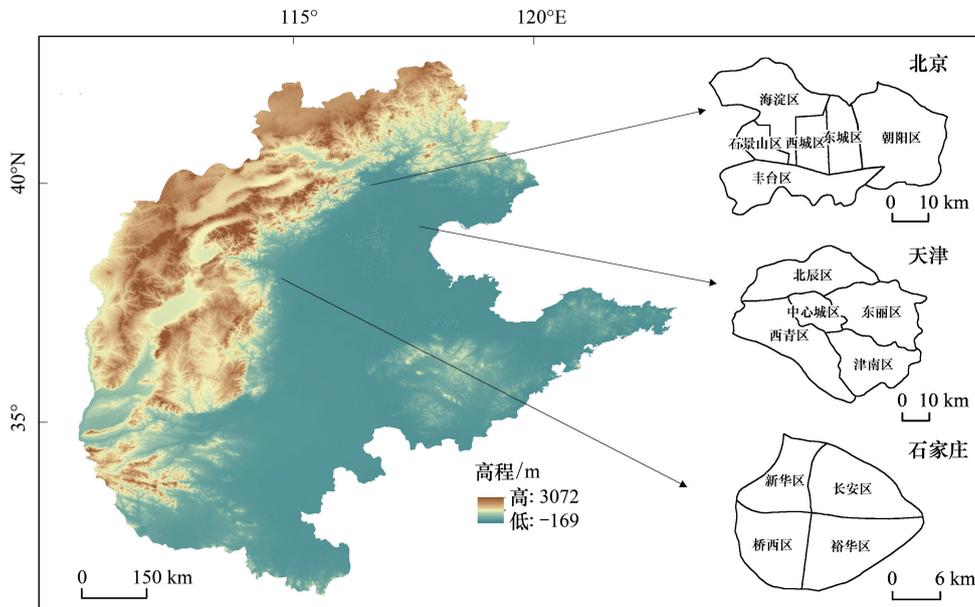


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographic location of the study area

晴天、低云量时段的影像。在使用前利用 ENVI5.3 FLAASH 大气校正模块进行处理以消除水汽等影响,之后通过拼接、裁剪得到研究区域。建筑数据包含建筑物高度、楼层数信息,在 ArcGIS 10.2 中依据现行国家《民用建筑设计通则》(GB50352—2019)<sup>[30]</sup>将建筑高度及密度进行分类,并结合 Landsat-8 影像作为 LCZ 制图的支持数据。此外气象数据参与了天气判断与 LST 反演。

表1 数据来源与说明

Table 1 Data sources and descriptions

数据类型 Data type	来源 Source	说明 Descriptions
遥感数据 Remote sensing data	earthexplorer.usgs.gov	OLI 陆地成像仪和 TIRS 热红外传感器,分辨率分别为 30 m 和 100 m;云量 $\leq 5\%$ ;日期:北京(2019-09-02)、天津(2019-08-17)、石家庄(2019-05-20)
建筑数据 Building data	https://map.baidu.com/	高度:高层(>27 m);中层(10—27 m);低层(<10 m) 密度:紧密型(>0.5);稀疏型( $\leq 0.5$ )
气象数据 Meteorological data	rp5.ru	气温、气压、湿度等

## 2.2 局地气候区划分

Stewart 等的局地气候体系包括 10 种建筑类型和 7 种土地覆盖类型,其中建筑密度分为紧密和稀疏,土地覆盖分为高密度、低密度植被区、灌木区、低矮植被、硬化地面、沙地以及水体<sup>[31]</sup>。本研究利用 ArcGIS 10.2 的 Create Fishnet 工具对研究区构建 30 m 格网,划分 LCZ1-6,同时利用 ENVI5.3,基于 Landsat 8 的蓝、绿、红、近红外波段以及 ISODATA 非监督分类结果构建多源数据集,使用 CART 算法获取 LCZA-G 的分类规则。由于计算量较大,先收集训练样本,在样本区获取决策树,再得到整个研究区的土地覆盖信息。经精度检验,北京、天津、石家庄影像分类的 Kappa 系数分别为 0.94、0.82、0.93。最后统计网格内建筑类型和地表覆盖类型,得到局地气候区分类(表 2)。

## 2.3 地表温度反演

地表温度反演精度受遥感影像质量影响。本研究选取时间段内天气晴朗,采用单窗算法<sup>[32]</sup>和 Landsat8 的 TM10 波段结合估算 LST<sup>[33]</sup>,公式如下:

$$T_s = \frac{(a(1 - C - D) + (b(1 - C - D) + C + D) T_{10}) - D T_a}{C - 237.15} \tag{1}$$

$$C = \varepsilon\tau \tag{2}$$

$$D = (1 - \tau) [1 + (1 - \varepsilon)\tau] \tag{3}$$

式中  $T_s$  为地表温度(K),  $T_{10}$  是传感器上的亮度温度(K),  $T_a$  是大气平均温度(K),  $a, b$  为参考系数, 当地表温度为 0—70℃ 时,  $a = -67.355351, b = 0.458606, \varepsilon$  表示  $T_{10}$  的地表发射率,  $\tau$  表示  $T_{10}$  的大气透射率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 局地气候区空间分布

如图 2 所示, 研究区市区几乎被建筑 LCZ 填满, 建筑高度整体为低层和中层居多, 高层较少, 就密度而言, 北京、天津、石家庄密集型建筑分别占比 27.54%、21.95%、25.09%。其中北京 LCZ1 大多分布在东西城区, LCZ2、LCZ3 由中心城区向外扩张; 天津 LCZ1—3 主要集中在中心城区; 石家庄裕华区西部, 桥西区东部 LCZ2、LCZ3 居多, LCZ1 分布相对零散。另外北京西部、天津市中心外围、石家庄北部有高密度植被或农田覆盖, 城市公园包含了市内主要的绿地和水体分布。

表 2 局地气候分区类型

Table 2 Local climate zone (LCZ) types			
建筑类型气候区 Built-up LCZ		自然类型气候区 Nature LCZ	
LCZ1	紧密型高层	LCZA	高密度植被
LCZ2	紧密型中层	LCZB	低密度植被
LCZ3	紧密型低层	LCZC	农田
LCZ4	稀疏型高层	LCZD	低矮植被
LCZ5	稀疏型中层	LCZE	硬化路面
LCZ6	稀疏型低层	LCZF	裸土
		LCZG	水域

#### 3.2 地表温度反演结果

地表温度能够反应城市热环境格局(图 3)。整体来看, 研究区市中心温度高于郊区, 建筑覆盖区地表温度较高, 工业区往往出现明显的高温, 森林、河流是主要低温区域。北京市西部有大量植被覆盖, 地表温度较低, 有 20.41% 的地区地表温度处在 24℃ 以下, 地表温度在 24—30℃ 的区域占 73.81%, 高于 30℃ 的地区主要分布在东南部, 占比 5.78%; 天津市地表温度表现为中心高、四周低的特点, 所选时间段温度高于北京, 仅有 0.51% 的区域温度低于 30℃, 高于 40℃ 占比达到 55.56%, 热岛效应显著; 石家庄大部分区域地表温度在 26—

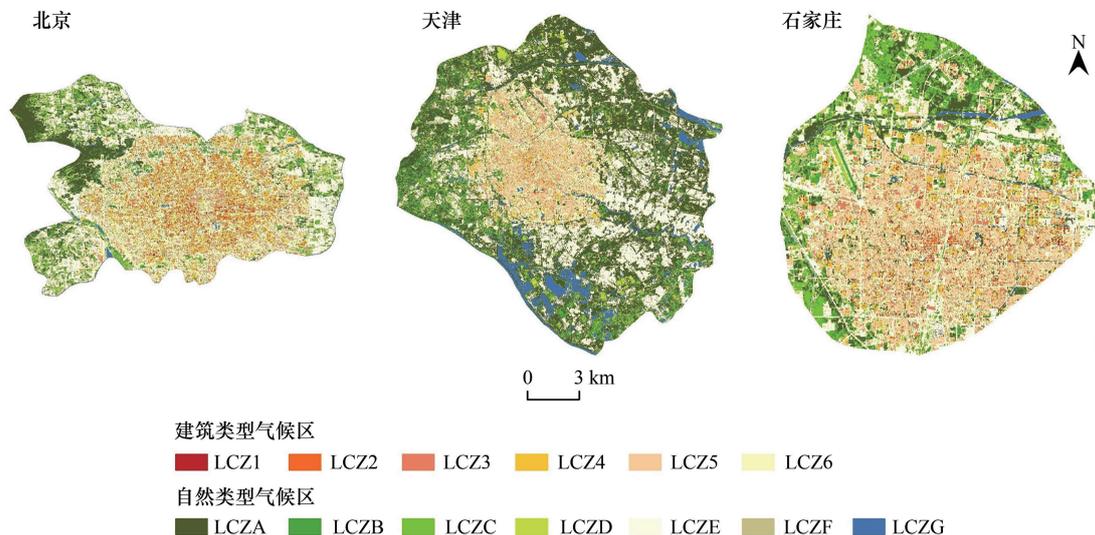


图 2 北京、天津、石家庄局地气候区分布

Fig.2 Distribution of Local climate zones (LCZs) in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang

LCZ1: 紧密型高层; LCZ2: 紧密型中层; LCZ3: 紧密型低层; LCZ4: 稀疏型高层; LCZ5: 稀疏型中层; LCZ6: 稀疏型低层; LCZA: 高密度植被; LCZB: 低密度植被; LCZC: 农田; LCZD: 低矮植被; LCZE: 硬化路面; LCZF: 裸土; LCZG: 水域

32℃,占比 77.92%,有 0.06%的地区温度高于 38℃,说明出现极端高温现象。

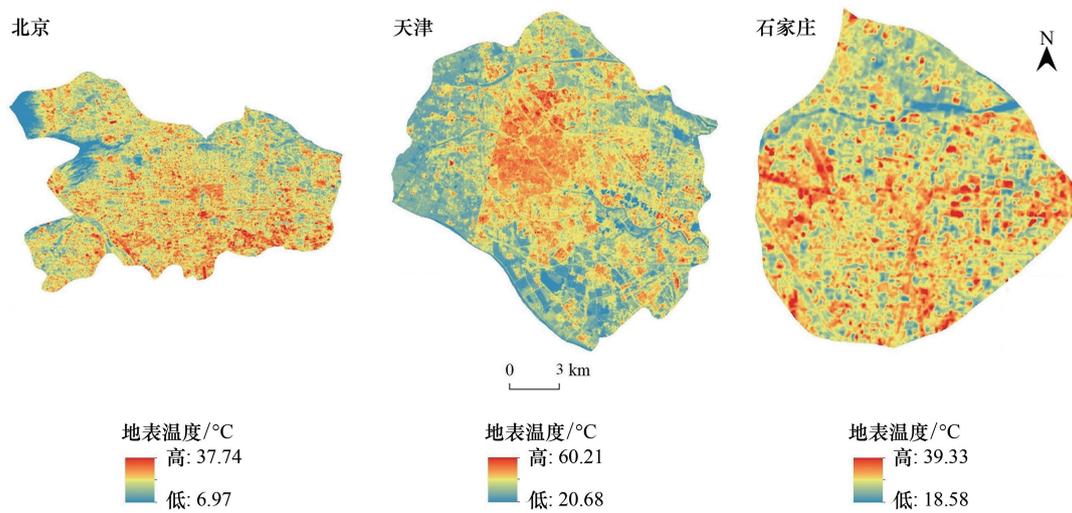


图 3 北京、天津、石家庄地表温度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of LST in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang

### 3.3 基于局地气候区的地表温度差异性

图 4 表明不同气候带的地表温度存在差异,建筑类型 LCZ 总体高于自然地表 LCZ。在城市三维结构中,

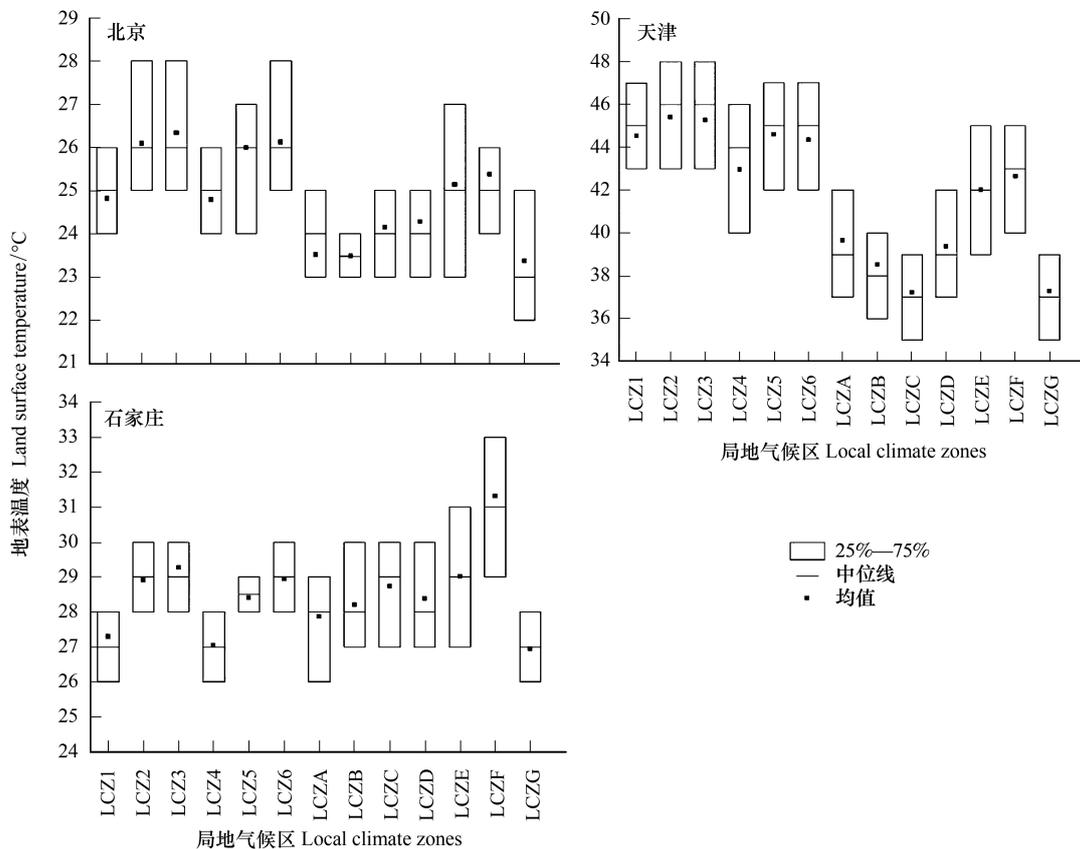


图 4 北京、天津、石家庄局地气候分区 LST

Fig.4 LST of local climate zones in Beijing, Tianjin and Shijiazhuang

建筑在水平方向按不同密度分布,在垂直方向上表现为高度不同,对地表温度造成不同的影响。当建筑高度相同时,建筑密集区域地表温度高于建筑稀疏区域。对于建成区 LCZ,北京、天津、石家庄 LCZ3(紧密型低层)覆盖区的平均地表温度表现为最高,分别为 26.33℃、45.27℃、29.27℃;城市内部的热量易被分散水平低、表面复杂的中高层建筑阻挡,但高度达到一定程度反而会遮挡部分太阳辐射,因此 LCZ4(稀疏型高层)地表温度普遍最低,分别为 24.80℃、42.97℃、27.05℃。另外,植被和水体能够降低地表温度,裸土和铺设路面的地表温度始终较高。

#### 4 结论与讨论

当前,极端气候、热岛效应、温室效应等环境问题严重影响城市人居环境与安全,我国致力于发展绿色低碳循环经济体系,以实现碳达峰、碳中和<sup>[34-36]</sup>。减碳控排与生态文明建设越来越引起人们的关注,局地气候区下的城市热环境研究能够为国土空间规划提供参考。本文以北京、天津、石家庄为研究区域,通过划分局地气候区,利用 Landsat 8 影像反演地表温度,定量分析了不同类型局地气候的地表温度分异规律,研究表明:

(1)北京、天津、石家庄市区几乎被建筑 LCZ 填满,密集型建筑分别占比 27.54%、21.95%、25.09%,自然 LCZ 主要位于郊区,城市公园包含了主要的绿地和水体分布。

(2)在空间分布上,建筑覆盖区地表温度较高,热岛效应显著,森林、河流是主要低温区域。

(3)不同气候带的地表温度存在差异,建筑类型 LCZ 总体高于自然地表 LCZ。其中建筑区域内表现为 LCZ3(紧密型低层)平均地表温度最高,北京、天津、石家庄分别为 26.33℃、45.27℃、29.27℃;LCZ4(稀疏型高层)地表温度普遍最低,分别为 24.80℃、42.97℃、27.05℃。植被和水体能够降低地表温度,裸土和铺设路面的地表温度始终较高。

综上所述,2019 年夏季研究区城市内部存在热岛效应,局地气候区视角下的地表温度差异性明显。合理的城市设施布局能够改善通风,缓解城市内部热量聚集,因此,在空间规划与建设中应考虑建筑分布,充分利用植被和水域等降温作用,因地制宜,从而保证区域气候与社会经济的协调发展。

本文的局限性在于以土地覆盖类型为基础的 LCZ 划分可能会由于尺度问题而出现一定的误差,不能很好地与实际情况相匹配。另外,LCZ 对 LST 的影响可能因为城市规模大小而不同,希望在后续研究中能够深入分析 LST 的时空分布及变化趋势,使结论更具普遍性。此外,气候背景、数据处理、影像精度等也会对结果造成一定影响。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Zhang M, Du S Q, Wu Y J, Wen J H, Wang C X, Xu M, Wu S Y. Spatiotemporal changes in frequency and intensity of high-temperature events in China during 1961-2014. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(9): 1027-1043.
- [ 2 ] 于琛,胡德勇,张畅,曹诗颂,段欣,张亚妮.近 20 年京津唐主体城区地表热场空间特征变化分析. *地理科学*, 2019, 39(6): 1016-1024.
- [ 3 ] Emmanuel R, Krüger E. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: the case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, 2012, 53: 137-149.
- [ 4 ] 敖翔宇,谈建国,支星,过霁冰,陆一闻,刘冬韡.上海城市热岛与热浪协同作用及其影响因子. *地理学报*, 2019, 74(9): 1789-1802.
- [ 5 ] 杨俊,白世豪,金翠,乔莹莹.热环境视角下的最小生态安全距离——以大连北三市为例. *生态学报*, 2019, 39(18): 6860-6868.
- [ 6 ] Yang X C, Leung L R, Zhao N Z, Zhao C, Qian Y, Hu K J, Liu X P, Chen B D. Contribution of urbanization to the increase of extreme heat events in an urban agglomeration in east China. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(13): 6940-6950.
- [ 7 ] Guo A D, Yang J, Sun W, Xiao X M, Xia Cecilia J, Jin C, Li X M. Impact of urban morphology and landscape characteristics on spatiotemporal heterogeneity of land surface temperature. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 63: 102443.
- [ 8 ] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: an urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 349-359.
- [ 9 ] Song J, Du S H, Feng X, Guo L. The relationships between landscape compositions and land surface temperature: quantifying their resolution sensitivity with spatial regression models. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 145-157.
- [ 10 ] Zhou W Q, Wang J, Cadenasso M L. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: a comparative study. *Remote Sensing of*

- Environment, 2017, 195: 1-12.
- [11] Fu S W, Nie S P, Luo Y, Chen X. Implications of diurnal variations in land surface temperature to data assimilation using MODIS LST data. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(1): 18-36.
- [12] 张昉, 胡德勇, 陈姗姗. 北京城区不透水地表盖度变化及对地表温度的影响. *地球信息科学学报*, 2017, 19(11): 1504-1513.
- [13] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [14] 韩林飞, 李响. 健康城市与完善的城市生态规划策略探析. *科技导报*, 2020, 38(7): 26-33.
- [15] Qiao Z, Tian G J, Xiao L. Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment; a case study of Beijing using MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 85: 93-101.
- [16] 冯章献, 王士君, 金珊合, 杨俊. 长春市城市形态及风环境对地表温度的影响. *地理学报*, 2019, 74(5): 902-911.
- [17] Yang J, Wang Y C, Xiao X M, Jin C, Xia J H, Li X M. Spatial differentiation of urban wind and thermal environment in different grid sizes. *Urban Climate*, 2019, 28: 100458.
- [18] 乔治, 黄宇钰, 徐新良, 孙宗耀, 吴晨, 杨俊. 2003-2017年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律. *地理学报*, 2019, 74(3): 475-489.
- [19] Du Y, Xie Z Q, Zeng Y, Shi Y F, Wu J G. Impact of urban expansion on regional temperature change in the Yangtze River Delta. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(4): 387-398.
- [20] He B J. Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban Climate*, 2018, 24: 26-33.
- [21] Xie P, Yang J, Wang H Y, Liu Y F, Liu Y L. A new method of simulating urban ventilation corridors using circuit theory. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 59: 102162.
- [22] Stewart I D, Oke T R, Krayenhoff E S. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 1062-1080.
- [23] Hu J, Yang Y B, Pan X, Zhu Q, Zhan W F, Wang Y, Ma W Y, Su W Z. 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*, 2019, 12(11): 4213-4223.
- [24] Yang J, Ren J Y, Sun D Q, Xiao X M, Xia J H, Jin C, Li X M. Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69: 102818.
- [25] Yang J, Jin S H, Xiao X M, Jin C, Xia J H, Li X M, Wang S J. Local climate zone ventilation and urban land surface temperatures; towards a performance-based and wind-sensitive planning proposal in megacities. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101487.
- [26] Zhao N, Ma A H, Zhong Y F, Zhao J, Cao L Q. Self-training classification framework with spatial-contextual information for local climate zones. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2828.
- [27] Zheng Y S, Ren C, Xu Y, Wang R, Ho J, Lau K, Ng E. GIS-based mapping of local climate zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban Climate*, 2018, 24: 419-448.
- [28] Kotharkar R, Bagade A. Evaluating urban heat island in the critical local climate zones of an Indian city. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 169: 92-104.
- [29] Lehnert M, Geletič J, Husák J, Vysoudil M. Urban field classification by "local climate zones" in a medium-sized Central European city: the case of Olomouc (Czech Republic). *Theoretical and Applied Climatology*, 2015, 122(3/4): 531-541.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50352—2019 民用建筑设计统一标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [31] Stewart I D, Oke T R. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(12): 1879-1900.
- [32] 覃志豪, Zhang M H, Arnon K, Pedro B. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. *地理学报*, 2001, 56(4): 456-466.
- [33] 胡德勇, 乔琨, 王兴玲, 赵利民, 季国华. 单窗算法结合 Landsat 8 热红外数据反演地表温度. *遥感学报*, 2015, 19(6): 964-976.
- [34] Yang J, Wang Y C, Xue B, Li Y F, Xiao X M, Xia J H, He B J. Contribution of urban ventilation to the thermal environment and urban energy demand: Different climate background perspectives. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148791.
- [35] 马瑞明, 谢苗苗, 郟文聚. 城市热岛“源-汇”景观识别及降温效率. *生态学报*, 2020, 40(10): 3328-3337.
- [36] Luo X, Yang J, Sun W, He B J. Suitability of human settlements in mountainous areas from the perspective of ventilation: A case study of the main urban area of Chongqing. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 310: 127467.