

艾合麦提·那麦提, 曾穗平, 倪丽丽, 等. 天津市中心城区典型城市形态原型中建筑形态的热环境效应 [J]. 地理科学, 2024, 44(7): 1228-1236. [Aihemaiti Namaiti, Zeng Suiping, Ni Lili et al. Thermal environmental effects of building morphology in typical urban form prototypes in the central urban area of Tianjin. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(7): 1228-1236.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.20221547

天津市中心城区典型城市形态原型中 建筑形态的热环境效应

艾合麦提·那麦提¹, 曾穗平², 倪丽丽³, 曾坚¹

(1. 天津大学建筑学院, 天津 300072; 2. 天津城建大学建筑学院, 天津 300384;

3. 河北工业大学建筑与艺术设计学院, 天津 300130)

摘要: 以天津市中心城区为例, 使用 Landsat-8 遥感影像反演地表温度(LST), 以表征城市热环境。同时, 采用建筑数据量化 17 种建筑形态指标, 并识别 9 种典型城市形态原型。在此基础上, 分析不同城市形态原型间的地表温度差异, 并用多元线性逐步回归方法探究不同城市形态原型中建筑形态的热环境效应。结果表明: ① 不同城市形态原型之间的夏季地表温度差异显著, 低层高密度区地表温度均值最高, 高层低密度区最低; ② 不同城市形态原型中建筑形态对夏季地表温度均有显著影响, 但影响程度存在差异; ③ 不同城市形态原型中各建筑形态因素对夏季地表温度影响方向一致, 但重要性存在差异。因此, 城市开发和更新中应关注城市形态模式和建筑形态, 提出因地制宜的建筑形态调控策略。

关键词: 城市形态原型; 建筑形态; 地表温度; 热环境效应; 多元线性逐步回归; 天津市中心城区

中图分类号: TU98;X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2024)07-1228-09

随着快速城市化和全球气候变暖, 城市热环境逐渐恶化, 大量城市出现热岛效应, 直接或间接导致能源消耗的增加, 加剧城市空气污染, 阻碍经济发展, 甚至危害人类健康。地表温度(LST)是城市热环境最直接的表现形式^[1], 是研究城市热环境不可或缺的指标。因此, 如何降低地表温度以防止城市热环境进一步恶化, 已经成为相关学者关注的热点问题^[2-3]。

充分了解城市地表温度驱动因素是制定改善热环境策略的基础^[2,4]。众多研究表明, 建筑二维和三维形态是影响城市热环境的重要因素之一^[5-8]。部分学者将建筑物视为城市景观中的斑块^[9-10], 使用建筑斑块占比大小、形状、密度等形态特征的各种景观指标来量化城市建筑二维形态, 并分析其与地表温度之间的关系^[3,5-6,9-12]。但由于土地短缺, 城市建筑物不得不垂直扩张, 改变城市能量平衡过程和气流,

导致地表温度的变化^[13]。因此, 仅关注建筑二维形态是不足以全面反映其热环境效应^[10]。近年, 随着建筑三维数据可用性的提高, 学者们从高度、体积、密度、分布、体形等角度量化建筑三维形态^[8], 并证明其对地表温度有显著影响^[6,8,12-13,14-15]。然而, 以往研究多集中于二维或三维形态, 未能全面分析建筑形态对热环境的影响, 且对三维形态的研究也相对较少。

此外, 城市由不同建筑属性的城市形态模式组成, 具有特定的小气候特征^[16]。研究表明地表温度与其驱动因素的关系存在空间非平稳性^[17-18]。为此, 学者们引入地理加权回归方法^[19-20], 但该方法无法准确区分局部尺度上不同类型城市形态中相关关系的变化和差异^[17]。因此, 研究人员分析单个城市形态单元, 例如城市街区, 以研究微观尺度上的建筑形态热环境效应^[21]。但分析城市中所有单元的热环

收稿日期: 2022-12-15; 修订日期: 2023-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078320)、天津大学自主创新基金项目(2021XSC-0129)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (52078320), Tianjin University Independent Innovation Fund (2021XSC-0129).]

作者简介: 艾合麦提·那麦提(1992—), 男, 维吾尔族, 新疆喀什人, 博士研究生, 主要从事城市热环境研究。E-mail: ahmat@tju.edu.cn

通信作者: 曾穗平。E-mail: zengsuiping@tcu.edu.cn

境效应并不现实。相关学者通过识别代表城市中同质形态单元群,提出典型城市形态原型^[16],简化了城市中不同类型的城市形态模式,并推动研究结果的推广。目前,学者们提出了不同视角的城市形态原型分区方案,如局地气候分区^[2,22]、功能分区^[23]和容积率分区^[17]等。然而,上述分区方案更强调大气条件、人类活动或开发强度。而基于不同建筑特征的分区方案进行全面分析城市地表温度的研究较少。此外,缺乏对不同城市形态原型中建筑形态与地表温度关系差异的深入研究。

鉴于此,本研究选择天津市中心城区作为案例,识别多种典型城市形态原型,并分析其夏季地表温度差异。同时,全面考虑代表城市建筑形态的二维和三维指标,分析多种典型城市形态原型内部建筑形态与夏季地表温度之间的关系及差异,旨在为城市热环境优化提供更精细和有针对性的建筑形态差异化调控策略。

1 数据来源与研究方法

本研究以天津市中心城区(和平区、河东区、河西区、南开区、河北区、红桥区)作为研究区。研究区地处 117°05'30"E ~117°19'15"E, 39°02'51"N ~39°15'22"N, 即天津市外环线以内区域,面积约为 339.75 km², 7 月份最热^[24]。该区域为天津市城市发展的重要核心,人口高度聚集,建筑覆盖密集且空间形态类型多样,城市热岛效应显著^[24-25],是亟需改善城市热环境的典型特大城市高密度城区。

1.1 数据来源

2017 年 7 月 10 日过境的 landsat-8 遥感影像数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。该数据在研究范围内无云,天空晴朗无雨,数据质量较好,在本研究中用于地表温度反演;2017 年建筑、绿地和水域等矢量数据来自百度地图开放平台^①,其中建筑矢量数据在本研究中用于计算各类建筑形态指标。

1.2 研究方法

结合研究区特征并参考相关文献^[15],选择 500 m×500 m 网格单元,统计地表温度和建筑形态,同时识别典型城市形态原型。在此基础上,分析不同典型城市形态原型之间的地表温度差异,并利用多元线性逐步回归方法探究不同典型城市形态原型中建

筑形态的热环境效应。具体方法如下。

1) 典型城市形态原型分类。本研究借鉴“原型”理论和思维,结合城市规划学和城市气候学,基于城市形态参数归纳并分类代表城市中同质单元组的典型城市形态原型^[16]。该研究思路有助于在城市范围内推广研究结果,具有很强的可移植性。本研究的重点在于探究建筑形态的热环境效应,因此参考已有研究^[26-27],选择建筑密度和平均建筑高度这 2 个指标,从平面(二维)和高度(三维)层面归纳并分类典型城市形态原型(图 1)。

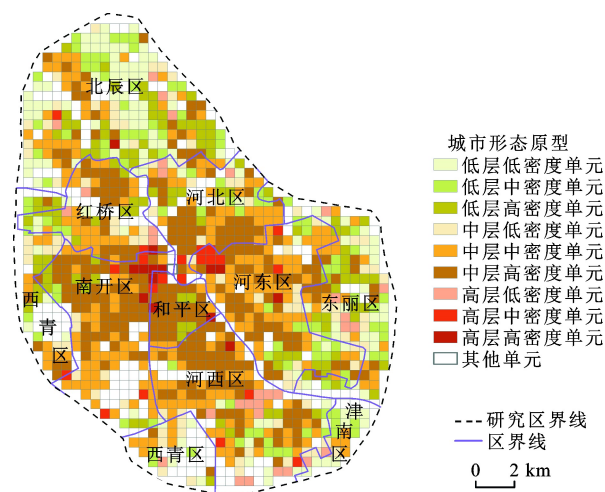


图 1 天津市中心城区典型城市形态原型
Fig.1 Typical urban form prototypes in the central urban area of Tianjin

具体而言,首先将格网块根据平均建筑层数分为低层块(小于 3 层)、中层块(3~7 层)和高层块(7 层及以上),再根据建筑密度将格网分为低密度块(建筑密度值小于 15%)、中密度块(建筑密度值为 15%~25%)和高密度块(建筑密度值大于 25%)。最后通过这 2 个指标两两组合的方式,形成 9 种城市形态原型。为尽可能消除河流、湖泊和大型绿地等重要冷源对城市形态原型地表温度差异的影响,水体占比大于 10% 和绿地占比大于 30% 的其它单元被剔除,得到最终 9 种典型城市形态原型。

2) 地表温度反演。目前,有众多算法可用于地表温度反演。本研究选择反演精度相对更高的辐射传输方程法^[28-29],并使用 Landsat-8 TIRS 第 10 波段反演研究区地表温度。为验证本研究的地表温度反演精度,参考相关研究选取 50 个采样点,使用同

① <https://lbsyun.baidu.com/> [2017-08-01]

期 MODIS 逐日地表温度产品(MOD11A1)的地表温度数据进行验证^[30]。结果显示,两者拟合度为 0.876,均方根误差为 0.537,说明反演精度满足研究要求。

3) 建筑形态指标。本文研究中参考已有的文献^[3, 7-8, 12, 14, 31-32],从二维和三维形态层面共选取 17 个潜在影响地表温度的建筑形态指标(表 1)。其中,二维指标能表征建筑斑块的特征、大小、形状、密度等,对热环境具有重要影响;而三维指标主要通过改变空气流动和太阳辐射影响热环境。

4) 多元线性逐步回归法。本研究借助 SPSS 20.0 中的多元线性逐步回归(Stepwise multiple linear regression)模型^[33]分析不同典型城市形态原型中建筑形态指标与热环境的影响关系。与普通最小二乘回归等传统方法相比,多元线性逐步回归模型可自动识别显著的解释变量并拟合模型,得到最优的回归方程,且在克服多重共线性方面具有更好的性能,已被广泛应用在众多研究中^[33]。

2 结果与分析

2.1 典型城市形态原型热环境差异

首先使用箱线图来初步检查每个典型城市形态原型内部和彼此之间的地表温度分布差异。结

果显示(图 2),根据地表温度平均值来看,低层高密度块地表温度最大(42.58℃),其次是多层高密度块(42.03℃);而高层低密度块地表温度最小(38.16℃),其次是低层低密度块(38.69℃)。因此,相比高层低密度块,低层高密度块可能增加地表温度。另外,在平均温差研究方面,不同典型城市形态原型之间的平均地表温度存在显著差异。关于本研究 9 种典型城市形态原型中最高和最低平均地表温度(低层高密度和高层低密度块)之间的差异最高可达 4.43℃。从每个典型城市形态原型内热环境差异来看,亦存在一定的差异。所有城市形态原型地表温度极差值最大可达 8.41℃(低层低密度块),最小值为 2.89℃(高层高密度块);四分位距(IQR)值最大可达 2.44℃(多层低密度块)。

然而,考虑到用箱线图检查存在主观性,进一步进行统计学检验,以确定 9 种典型城市形态原型之间的地表温度中值是否具有统计学差异。夏皮罗-威尔克法(Shapiro-Wilk)^[34]测试结果显示,低层中密度类和低层高密度类城市形态原型的地表温度数据不服从正态分布,无法使用单因素方差分析(ANOVA)。因此,本研究引入非参数方法克鲁斯卡尔-沃利斯检验(Kruskal-Wallis test)^[35]。从检验结果(卡方统计量为 508.661,自由度为 8, $P<0.01$)得知,

表 1 影响地表温度的二维/三维建筑形态指标

Table 1 2D/3D building morphology indicators affecting land surface temperature

维度	指标	符号	定义
二维 指标	建筑密度	<i>BD</i>	网格单元内建筑物覆盖率
	斑块密度	<i>PD</i>	单位面积内建筑物数量
	边缘密度	<i>ED</i>	每公顷建筑周长的总和
	最大斑块指数	<i>LPI</i>	单位面积内最大建筑物基地面积
	平均斑块面积	<i>AREA_MN</i>	单位面积内建筑基地面积的平均值
	平均形状指数	<i>SHAPE_MN</i>	单位面积内建筑形状指数的平均值
三维 指标	平均建筑高度	<i>ABH</i>	网格单元内建筑物高度的平均值
	高度变异系数	<i>HVC</i>	网格单元内建筑物高度的标准偏差
	起伏度	<i>AM</i>	网格单元内平均建筑物高度与最高建筑高度之差
	容积率	<i>FAR</i>	网格单元内单位面积内建筑物的总面积
	迎风面密度	<i>FAI</i>	单位面积内建筑沿着主导风向的投影面积之和
	天空可视度	<i>SVF</i>	网格单元内由建筑围合形成的空间向天空开敞程度
	建筑结构指数	<i>BSI</i>	网格单元内建筑基地面积与建筑高度之比的平均值
	建筑物表面积	<i>BSA</i>	网格单元内建筑物的平均表面积
	建筑体积密度	<i>BVD</i>	三维空间内建筑体积与总体积的比值
	平均体积	<i>AV</i>	网格单元内建筑物体积的平均值
	分布均匀度	<i>BEI</i>	网格单元内建筑物分布均匀程度

变量	<i>BD</i>	0.424**	0.374**	0.511**	0.315**	0.329**	0.335**	0.375*		0.670**
	<i>PD</i>	0.336**				0.344**	0.210**	0.387*	0.535*	
	<i>ED</i>	0.398**		0.184*		0.380**	0.276**	0.383*	0.623**	
	<i>LPI</i>	0.341**		0.325**	0.287**					
	<i>AREA_MN</i>	0.246**		0.322**		-0.157**				0.547*
	<i>SHAPE_MN</i>	0.188*	0.299**							
	<i>ABH</i>			-0.199*		-0.256**	-0.312**		-0.573**	
	<i>HVC</i>	0.294**				-0.143*	-0.288**			
	<i>AM</i>	0.325**		-0.260**		-0.162**	-0.285**	-0.497**		
	<i>FAR</i>	0.337**	0.320**	0.323**						
	<i>FAI</i>	0.335**	0.210*							-0.622*
	<i>SVF</i>									
	<i>BSI</i>	0.227*		0.267**						
	<i>BSA</i>	0.361**	0.225*	0.322**						-0.604*
	<i>BVD</i>	0.270**	0.252**	0.422**	0.235*	0.170**	0.298**			
	<i>AV</i>		0.243*	0.318**		-0.283**	-0.198**	-0.528**		
	<i>BEI</i>	0.288**	0.226*	0.413**		-0.137*	-0.142*			
		低层低密度块	低层中密度块	低层高密度块	多层低密度块	多层中密度块	多层高密度块	高层低密度块	高层中密度块	高层高密度块
		典型城市形态原型类型								

■ 负相关
 ■ 正相关
 □ 无相关

显著性
 *为 $P<0.05$
 **为 $P<0.01$

变量解释见表1

图4 天津市中心城区不同典型城市形态原型中建筑形态与地表温度相关性分结果

Fig.4 Correlation analysis between building morphology and LST in different typical urban form prototypes in the central urban area of Tianjin

表2 天津市中心城区不同城市形态原型建筑形态指标与地表温度的逐步回归结果

Table 2 Stepwise regression results of building morphological indicators and LST of different urban form prototypes in the central urban area of Tianjin

类型	变量	标准化系数	方差膨胀因子	R^2	F统计量
低层低密度块	<i>BD</i>	0.944**	6.661	0.254	27.252**
	<i>FAR</i>	-0.565**	6.661		
低层中密度块	<i>BD</i>	0.344**	1.007	0.212	13.869**
	<i>SHAPE_MN</i>	0.279**	1.007		
低层高密度块	<i>BD</i>	0.554**	1.271	0.450	46.282**
	<i>BVD</i>	0.201**	1.271		
多层低密度块	<i>BD</i>	0.284**	1.049	0.176	9.952**
	<i>LPI</i>	0.254**	1.049		
多层中密度块	<i>BD</i>	0.398**	1.029	0.229	40.150**
	<i>AV</i>	-0.341**	1.029		
多层高密度块	<i>BD</i>	0.404**	1.069	0.297	30.066**
	<i>HVC</i>	-0.187**	1.359		
	<i>ABH</i>	-0.144*	1.264		
	<i>BEI</i>	-0.150*	1.395		
高层低密度块	<i>AM</i>	-0.475**	1.000	0.360	8.158**
	<i>BD</i>	0.360*	1.000		
高层中密度块	<i>ED</i>	0.524**	1.000	0.275	7.190**
高层高密度块	<i>FAI</i>	-0.678**	1.000	0.459	10.183**

注: **、*分别表示 $P<0.01$ 、 $P<0.05$; 变量解释见表1。

共有 12 个建筑形态指标进入逐步回归模型。其中,二维变量出现 10 次,包括建筑密度(7 次,正影响)、边缘密度(出现 1 次,正影响)、最大斑块指数(出现 1 次,正影响)和平均形状指数(出现 1 次,正影响);三维变量出现 8 次,包括容积率(出现 1 次,负影响)、平均建筑高度(出现 1 次,负影响)、高度变异系数(出现 1 次,负影响)、迎风面密度(出现 1 次,负影响)、建筑体积密度(出现 1 次,正影响)、平均体积(出现 1 次,负影响)、分布均匀度(出现 1 次,负影响)、起伏度(出现 1 次,负影响)。总体上二维和三维变量出现次数差异很小,但各变量出现的次数存在差异显著。其中,出现次数最多的变量是二维变量建筑密度(7 次),除了中、高密度的高层城市形态原型块之外,其它所有块都有出现,且其标准化系数较大,显著影响地表温度。这再次表明,在大部分城市形态原型中,建筑密度指标相对重要。然而,部分指标仅出现 1 次,也有部分指标没进入回归模型,这可能是因为这些指标仅在指定城市形态原型中对地表温度产生影响,又或者是由于变量之间存在共线性,被逐步回归方法剔除。

3 讨论

3.1 不同典型城市形态原型之间的地表温度差异规律

研究表明,天津市中心城区不同典型城市形态原型之间的地表温度存在显著差异。本研究中所定义的典型城市形态原型指的是建筑物在水平和垂直维度的综合空间形态模式,因此它们的地表温度分布差异与建筑密度和平均建筑高度等指标相关。通常高密度的城市形态原型具有更高的地表温度。究其原因,一方面高密度建筑群的增多,会增加粗糙度,阻碍气流的运动,限制热量扩散^[6,27]。另一方面,由于高密度区域中水体和绿地被大量建筑所覆盖,不透水面占比较大,其表面具有更高的太阳辐射吸收率和更低的反射率^[10],影响地表能量平衡,从而导致更高地表温度。此外,高密度区通常是工业或商业区^[24],会产生更多的热量^[15],进一步提高地表温度。在垂直维度上,仅当建筑密度固定时,高层的城市形态原型具有更低的地表温度。究其原因,一方面平均建筑高度越大,其产生的阴影面积越大,到达阴影区域的太阳辐射也越少^[5],因此阴影起到一定的降温作用^[27]。另一方面,高层建筑会增加地表

粗糙度并产生湍流^[11],起到冷却作用。需要注意的是,上述提到的平均建筑高度对地表温度的影响规律,仅在固定建筑密度的条件下才成立。如果建筑密度不同,相同高度的建筑物可能会有不同的阴影效应,最终产生不同的地表温度分布,这与相关研究结果基本一致^[27,36]。综上所述,不同城市形态原型之间的地表温度差异可能由多种物理机制共同作用而来,包括地表能量平衡、建筑表面粗糙度、热扩散率和热容量等。这些因素的相互作用可能导致不同城市形态原型之间的地表温度差异,从而影响城市的热环境和城市气候。

3.2 不同典型城市形态原型中建筑形态对地表温度的影响规律

研究发现,天津市中心城区不同城市形态原型中建筑形态对地表温度的影响程度存在差异。这一差异的成因在于城市地表温度受多种因素的综合影响,包括但不限于建筑形态、土地覆被、建筑材料、人口和社会经济等^[2]。而建筑形态作为其中的关键因素之一,对地表温度产生着重要的影响。然而,由于不同城市形态原型的特征不同,建筑形态对地表温度的影响程度和机理也存在差异。研究还发现,各建筑形态因素的贡献和重要性在不同城市形态原型中存在差异。这说明,城市内部地表温度与影响因素的关系存在空间非平稳性,这与相关研究结果基本一致^[17-18]。因此,针对不同城市形态原型热环境优化,应该从不同的建筑形态指标入手,优先选择影响最大的指标进行调控和优化。

3.3 研究局限性与未来展望

本研究数据来源有限,仅分析夏季白天的数据,未能比较不同季节和昼夜的变化。研究主要探讨了建筑形态对热环境的影响,但需考虑人为热排放和建筑材料属性的作用,这是未来研究的重要方向。本研究仅以天津市中心城区为案例,需在其它城市验证其适用性。未来研究可通过多个案例和实验模拟,得出更普适的结论。采用逐步线性回归方法探究建筑形态的热环境效应,但该方法无法识别非线性关系,未来应采用增强回归树模型^[6]和随机森林回归模型^[29]等机器学习方法,深入研究复杂的影响关系。

4 结论与建议

4.1 结论

1) 天津市中心城区典型城市形态原型在夏季

热环境方面存在明显差异。低层高密度块地表温度最大,高层低密度块地表温度最低,两者平均相差 4.43°C ,且具有统计学差异。此外,城市形态原型内热环境也存在差异,各城市形态原型内地表温度值的极差范围 $2.89\sim 8.41^{\circ}\text{C}$,极差差异显著。

2) 天津市中心城区典型城市形态原型中的建筑形态对夏季地表温度产生显著影响,但影响程度存在差异。具体而言,高层高密度块的建筑形态对地表温度影响最大,其解释度达到 45.9% ;而多层低密度块的建筑形态则对地表温度影响最小,仅解释了 17.6% 的变化。

3) 夏季地表温度对天津市中心城区典型城市形态原型中各种建筑形态指标的响应存在差异和一致性并存。整体而言,在所有城市形态原型中,各建筑形态因素对地表温度影响方向是一致的。然而,不同城市形态原型中各建筑形态因素影响地表温度的相对重要性存在差异。

4.2 建议

根据本研究结果和结论,建议未来城市规划应避免低层高密度形态,优先选择高层低密度形态,以改善热环境。特别是在高密度大城市中,这可以通过降低建筑密度和增加建筑高度来实现。此外,在有限土地和空间资源下,通过调整和管控建筑形态也能改善城市热环境。应采取差异化的建筑形态规划和设计策略,根据不同城市形态原型的热环境效应,提出针对性的解决方案。

参考文献(References):

- [1] Peng J, Xie P, Liu Y et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [2] Yang J, Ren J, Sun D et al. Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69: 102818.
- [3] Chen J, Zhan W, Du P et al. Seasonally disparate responses of surface thermal environment to 2D/3D urban morphology[J]. *Building and Environment*, 2022, 214: 108928.
- [4] Hu D, Meng Q, Zhang L et al. Spatial quantitative analysis of the potential driving factors of land surface temperature in different "Centers" of polycentric cities: A case study in Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 706: 135244.
- [5] Chen C, Bagan H, Yoshida T et al. Quantitative analysis of the building-level relationship between building form and land surface temperature using airborne LiDAR and thermal infrared data[J]. *Urban Climate*, 2022, 45: 101248.
- [6] Li Z, Hu D. Exploring the relationship between the 2D/3D architectural morphology and urban land surface temperature based on a boosted regression tree: A case study of Beijing, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78: 103392.
- [7] 袁帅, 张金梦, 徐志刚, 等. 城市热岛效应对建筑形态的响应及其昼夜变化研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2022, 38(5): 40-46. [Yuan Shuai, Zhang Jinmeng, Xu Zhigang et al. Response of urban heat island effect to morphology characteristics of buildings and its diurnal variation. *Geography and Geo-Information Science*, 2022, 38(5): 40-46.]
- [8] 于晓雨, 许刚, 刘巍, 等. 长江三角洲地区城市建筑三维形态对地表热环境的影响 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(12): 5806-5816. [Yu Xiaoyu, Xu Gang, Liu Yue et al. Influences of 3D features of buildings on land surface temperature: A case study in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration. *China Environmental Science*, 2021, 41(12): 5806-5816.]
- [9] Du S, Xiong Z, Wang Y et al. Quantifying the multilevel effects of landscape composition and configuration on land surface temperature[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 84-92.
- [10] Zeng P, Sun F, Liu Y et al. The influence of the landscape pattern on the urban land surface temperature varies with the ratio of land components: Insights from 2D/3D building/vegetation metrics[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78: 103599.
- [11] Wu W, Yu Z, Ma J et al. Quantifying the influence of 2D and 3D urban morphology on the thermal environment across climatic zones[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 226: 104499.
- [12] Li X, Yang B, Xu G et al. Exploring the impact of 2-D/3-D building morphology on the land surface temperature: A case study of three megacities in China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 4933-4945.
- [13] Yuan B, Zhou L, Dang X et al. Separate and combined effects of 3D building features and urban green space on land surface temperature[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113116.
- [14] Chen Q, Cheng Q, Chen Y et al. The influence of sky view factor on daytime and nighttime urban land surface temperature in different spatial-temporal scales: A case study of Beijing[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(20): 4117.
- [15] 孙喆. 高密度城区形态要素对热环境的影响作用——以北京市五环内区域为例 [J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 2020-2027. [Sun Zhe. Impact of urban morphology factors on thermal environment in high density urban areas: A case of Beijing within 5th ring road. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 2020-2027.]
- [16] Joshi M Y, Rodler A, Musy M et al. Identifying urban morphological archetypes for microclimate studies using a clustering approach[J]. *Building and Environment*, 2022, 224: 109574.

- [17] Lu Y, Yue W, Liu Y et al. Investigating the spatiotemporal non-stationary relationships between urban spatial form and land surface temperature: A case study of Wuhan, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 72: 103070.
- [18] Liu H, Zhan Q, Gao S et al. Seasonal variation of the spatially non-stationary association between land surface temperature and urban landscape[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1016.
- [19] Guo A, Yang J, Sun W et al. Impact of urban morphology and landscape characteristics on spatiotemporal heterogeneity of land surface temperature[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 63: 102443.
- [20] Liu Y, Wang Z, Liu X et al. Complexity of the relationship between 2D/3D urban morphology and the land surface temperature: A multiscale perspective[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(47): 66804-66818.
- [21] 杨俊宴, 邵典, 傅秀章, 等. 基于物理环境数字地图的城市设计逐级优化——过程性探索 [J]. 城市规划, 2022, 46(5): 64-80. [Yang Junyan, Shao Dian, Fu Xiuzhang et al. Progressive optimization of urban design based on the digital map of physical environment: Process exploration. *City Planning Review*, 2022, 46(5): 64-80.]
- [22] 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.
- [23] Wang H, Li B, Yi T et al. Heterogeneous urban thermal contribution of functional construction land zones: A case study in Shenzhen, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1851.
- [24] 宋鑫博, 黄鹤, 郭军, 等. 城市形态对夏季热环境影响研究——以天津中心城区为例 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2165-2174. [Song Xinbo, Huang He, Guo Jun et al. Research on the impact of urban morphology on thermal environment in summer: A case of Tianjin central city. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(11): 2165-2174.]
- [25] Ren T, Zhou W, Wang J. Beyond intensity of urban heat island effect: A continental scale analysis on land surface temperature in major Chinese cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148334.
- [26] 龙瀛, 李派, 侯静轩. 基于街区三维形态的城市形态类型分析——以中国主要城市为例 [J]. 上海城市规划, 2019(3): 10-15. [Long Ying, Li Pai, Hou Jingxuan. Three-dimensional urban form at the street block level for major cities in China. *Shanghai Urban Planning Review*, 2019(3): 10-15.]
- [27] Hu D, Meng Q, Schlink U et al. How do urban morphological blocks shape spatial patterns of land surface temperature over different seasons? A multifactorial driving analysis of Beijing, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 106: 102648.
- [28] Yu X, Guo X, Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat 8 TIRS-Comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 9829-9852.
- [29] Wang Q, Wang X, Zhou Y et al. The dominant factors and influence of urban characteristics on land surface temperature using random forest algorithm[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 79: 103722.
- [30] 杨丽萍, 潘雪萍, 刘晶, 等. 基于 Landsat 影像的额济纳绿洲地表温度及冷岛效应时空格局研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 116-121. [Yang Liping, Pan Xueping, Liu Jing et al. Spatio-temporal variation characteristics of land surface temperature and cold island effect in Ejina oasis. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2): 116-121.]
- [31] 沈中健, 曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究 [J]. 地理科学, 2020, 40(5): 842-852. [Shen Zhongjian, Zeng Jian. Spatial relationship of heat island intensity to correlated land surface factors in Xiamen City. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 842-852.]
- [32] Xu G, Su J, Xia C et al. Spatial mismatches between nighttime light intensity and building morphology in Shanghai, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 81: 103851.
- [33] Chen B, Jing X, Liu S et al. Intermediate human activities maximize dryland ecosystem services in the long-term land-use change: Evidence from the Sangong River watershed, Northwest China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115708.
- [34] Shapiro S S, Wilk M B. An analysis of variance test for normality (complete samples)[J]. *Biometrika*, 1965, 52(3-4): 591-611.
- [35] Kruskal W H, Wallis W A. Use of ranks in one-criterion variance analysis[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1952, 47(260): 583-621.
- [36] Yao X, Zhu Z, Zhou X et al. Investigating the effects of urban morphological factors on seasonal land surface temperature in a "Furnace city" from a block perspective[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 86: 104165.

Thermal environmental effects of building morphology in typical urban form prototypes in the central urban area of Tianjin

Aihemaiti Namaiti¹, Zeng Suiping², Ni Lili³, Zeng Jian¹

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The urban thermal environment is deteriorating due to global warming and urbanization. Scholars worldwide are focused on lowering the land surface temperature (LST) to mitigate this issue. Building morphology significantly influences LST by affecting thermal radiation and wind speed. While numerous studies have examined the impact of 2D and 3D building morphologies on LST, many have lacked comprehensive consideration of relevant indicators and thorough analysis based on zoning schemes for various architectural features. In this study, the central urban area of Tianjin was used as a case study, and Landsat-8 remote sensing imagery was utilized to retrieve LST using the radiative transfer equation to characterize the urban thermal environment. Concurrently, building data were employed to quantify 17 building morphology indicators and identify 9 typical urban form prototypes. Subsequently, the differences in LST among the various urban form prototypes were analyzed, and the thermal environmental effects of building morphology within these prototypes were examined using multiple linear stepwise regression. The findings indicate that: 1) significant differences in summer LST were observed among different urban form prototypes, with the highest mean LST in low-rise, high-density blocks (42.58°C) and the lowest in high-rise, low-density blocks (38.16°C); 2) building morphology within different urban form prototypes had a significant impact on summer LST, although the degree of influence varied. The high-rise, high-density blocks had the greatest influence on LST (explanation degree of 45.9%), while the multi-rise, low-density blocks had the smallest influence (17.6%); 3) within typical urban form prototypes, there was a coexistence of differences and consistency in the response of summer LST to various building morphology indicators. Across all urban form prototypes, the direction of influence of each building morphology factor on LST was consistent, but its relative importance varied. Therefore, future urban planning and urban renewal should avoid low-rise, high-density configurations and prioritize high-rise, low-density ones to enhance the thermal environment. Adjusting and regulating building morphology within limited land and space resources can improve the urban thermal environment. Differentiated building morphology planning and design strategies should be implemented with targeted solutions based on the thermal effects of various urban form prototypes.

Key words: urban form prototypes; building morphology; land surface temperature; thermal environmental effects; stepwise multiple linear regression; the central urban area of Tianjin