36 卷第 4 期 617 ~ 627 页
2018 年 08 月

山 地 学 报
MOUNTAIN RESEARCH

Vol. 36, No. 4 pp 617 ~ 627
Aug., 2018

文章编号: 1008 - 2786 - (2018) 4 - 617 - 11
DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000358

山地城市空间形态的地表热环境效应
——基于 LCZ 的视角

蔡 智,韩贵锋*
(重庆大学 建筑城规学院/山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045)

摘 要: 全球气候变暖背景下,城市高温的强度、发生频率、持续时间和覆盖范围屡创新高,热舒适性已成为影响大城市人居环境质量的一个重要因素。以典型山地城市并有“火炉”之称的重庆市渝中区为例,分析城市空间形态指数与地表温度之间的相关性关系及其作用机理,参考 Local Climate Zone (LCZ) 方案对城市空间形态进行分类,旨在引导改善城市热环境的规划设计与优化调控途径。研究结果表明,容积率、建筑密度、下垫面不透水面率、平均高度 4 个形态指数与地表温度之间呈显著正相关,天空开阔度与地表温度之间呈显著负相关,迎风面积指数与地表温度之间没有显著的相关性关系。在城市空间形态类型方面,建设用地比自然地表温度更高。紧凑类型比开放类型地表温度更高,并且表现出低层 > 中层 > 高层的趋势。因此,在城市规划建设过程中,通过合理的用地布局,将低层空间让位于绿地、水体等自然要素,建筑向竖向高层发展; 在相同建设强度的情况下,高层低密度城市形态更有利于缓解城市热岛效应,提高热舒适性。

关键词: 城市空间形态; 城市热岛; 地表温度; 局部气候分区; 城市规划
中图分类号: TU984 **文献标志码**: A

自工业革命以来,以城市化为代表的人类活动显著改变了地表原貌。而以工业化带动城市化的政策倾斜导向更在一定程度上加剧了城市的无序蔓延,导致了城市功能的不合理布局以及能源的低效使用。城市交通、工业生产、居民生活等人为活动消耗了大量能源,其过程产生的各类废弃物(废气、废热) 在缺乏有效利用与管理的情况下,即以“面源”的方式排放至本就脆弱的城市生态系统中,导致城市生态与环境问题凸显[1],其中较为显著的是城市热环境恶化。早在 1833 年霍华德对伦敦的研究中,就发现伦敦城市的空气温度明显比附近乡村温度高的现象[2],即城市热岛。城市热岛现象地产生,使得城市需要消耗更多能源来维持人工生态系统的平衡,这进一步加大了环境污染[3,4]。更为严重地是,随着城市释放的热量及温室气体的大幅增加,全球气候变暖趋势加速[5],导致近年来暴雨、干旱、热浪等极端气候现象频发,已严重威胁到城市安全甚至人类的永续发展[6]。为此,学者们越发关注城市热岛,并在城市热岛成因(人为热、人工建设)[7]、作用机制[8]、缓解策略(绿地、水体、通风)[9-13]等方面取得了大量成果。城市热岛内涵也由最初的空气热岛发展为表面热岛(地表)、冠层热岛(空气) 和边界层热岛(大气层)[7]。已有研究认为城市热岛是人为热和太阳辐射综合作用于城市空间的结果[7]。显然,控制和优化城市空间形态是缓解城市热环境影响,构建气候友好型城市的重要途径[14,15]。因此,

收稿日期(Received date): 2017 - 09 - 11; 改回日期(Accepted date): 2018 - 01 - 17
基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(51778077)。 [National Nature Science Foundation of China (51778077)]
作者简介(Biography): 蔡智(1988 -),男,湖南永州人,硕士,主要研究方向: 城市生态与城市热环境。 [CAI Zhi (1988 -), male, M. Sc., research on urban form and urban thermal environment] E-mail: czhi911@foxmail.com
* 通讯作者(Corresponding author): 韩贵锋(1975 -),男,陕西西乡人,博士/博士后,教授,主要研究方向: 城市生态与城市热环境。 [HAN Guifeng (1975 -), male, Ph. D., post-doctor, professor, research on urban ecology and urban thermal environment] E-mail: hangf@cqu.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有必要从城市空间形态层面上来对影响热量传递和转换过程的要素进行梳理，以此作为着力点，深入探讨城市空间形态和城市热岛之间的作用关系，以期为相关规划及管理提供理论支持，缓解城市热岛效应，提升人居环境质量。

当前城市空间形态研究，主要使用形态指数与景观格局指数来量化城市空间形态，以确定城市的紧凑或蔓延等形态特征[16]。形状指数作为连接城市空间形态与城市微气候研究的桥梁，一直倍受城市气候研究学者们的青睐，并被普遍运用于城市空间形态与热环境的关系研究中[17,18]。在城市热环境研究中，常用的形态指数通常包括建筑密度[19-21]、天空开阔度[22-24]等。已往研究通常将复杂城市热岛问题予以分解，而从单一形态要素方面剖析城市热岛的成因及作用机制[19-24]。然而，城市空间既包含自然要素，又包含人工要素，两者相互穿插交织，难以用特定的参数来定量描述城市空间形态特征。此外，受研究方法、研究对象、气候环境等因素的影响制约，均有可能导致矛盾甚至错误的结论。例如，韩贵锋[19]、Guo[20]在城市热环境研究中，发现建筑密度与地表温度或空气温度呈显著的正相关关系；而邬尚森[21]却发现，建筑密度与地表温度或空气温度之间呈现出一定的负相关关系。同样的，在天空开阔度与热环境的关系研究中，Giridharan[22]指出天空开阔度越小，形成城市热岛的几率和强度也越大；然而胡友培[24]、Guo[20]等人却指出天空开阔度与温度之间并不是稳定的关系，而是随区域整体空间形态变化而变动。因此，在城市微气候研究中，迫切需要新的理论及方法来弥补现有研究的不足。

可以发现，完全定量的空间形态指数难以准确表达城市空间形态特征。另外，随着城市规模的不断扩大，单核城市逐渐演变成城市群，城市与乡村的界限愈发模糊，这给城市热岛研究中城市与乡村的定义造成了困扰。为此，Oke 等人开始尝试采用统一的形态分类体系来描述城市和乡村景观，以此来反映不同空间形态或地表覆盖影响下的温度差异，即局部气候区分类方案(Local Climate Zone scheme，LCZ)[25,26]。近年来随着卫星遥感及 GIS 技术的发展，使得大范围快速提取地物信息、建构城市数据库、识别城市空间形态特征成为可能，而统一标准、系统分类的 LCZ 方案，也为建构全球城市气候研究体系提供了契机。在此基础上，Mills & Alexander 等人进一步将 GIS 技术与 LCZ 方案进行了融合，并提出了一体化的城市气候分类解决方案及数据共享平台，即世界城市数据库与门户访问工具(World Urban Database and Access Portal Tools，WUDAPT，www.wudapt.org)。由于 WUDAPT 具有操作简单、开放共享、系统规范等方面的特点，因此吸引了全球大量城市气候研究学者们的目光，并积极为建构世界城市气候数据库奉献力量。WUDAPT 也为应对全球气候变化下的城市气候研究提供了全新的视野。中国北京、广州、杭州等城市先后被纳入至 WUDAPT 的工作中。而重庆作为典型的山地城市，至目前为止，还没有被学者纳入至 WUDAPT 的研究体系中。此外，由于基于 LCZ 的城市热环境研究尚处于起步阶段，大部分研究更多集中于使用 LCZ 方案对城市空间形态分类及未来发展的模拟评估[25-26]，少有学者对城市空间形态类型与热环境之间的响应关系进行系统研究，使用何种形态才能获得较好的热环境指数尚还不太清楚，基于山地城市的 LCZ 相关研究也基本上属于空白。为此，笔者在已有研究的基础上，以典型高密度山地城市—重庆市渝中区为例，选取多个典型且常用的城市空间形态指数，分析各类指数与地表温度之间的相关性关系，辨识并提取对地表温度具有显著作用的形态指数，参考 LCZ 中的城市空间形态分类方案[25]，建构了地方城市空间形态分类体系，并对研究区内的城市空间形态进行了分类。以此为基础，研究不同城市空间形态类型与地表温度之间的对应关系，为优化城市形态、改善城市热环境、提升人居环境质量提供理论依据，也为世界城市气候研究体系提供了数据积累，以便于多个城市之间的对比研究。

1 数据与方法

1.1 研究区

重庆市素以老牌“火炉”之称闻名于全国，夏季高温天气持续时间、涉及范围、最高温度屡屡打破历史记录。渝中区位于重庆市西南部(图 1a)，处于 29°31′50″～29°34′20″N、106°28′50″～106°35′10″E 之间，北临嘉陵江，东、南被长江环绕，西面通陆，为东西向狭长半岛(图 1)，总共面积为 23.71 km^2，其中陆地面积为 18.54 km^2。整体地势西高东低，最大高程为 389.1 m，最低高程为 167.2 m，地势起伏较大。作为重庆的“母城”，渝中区近年来用地不

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

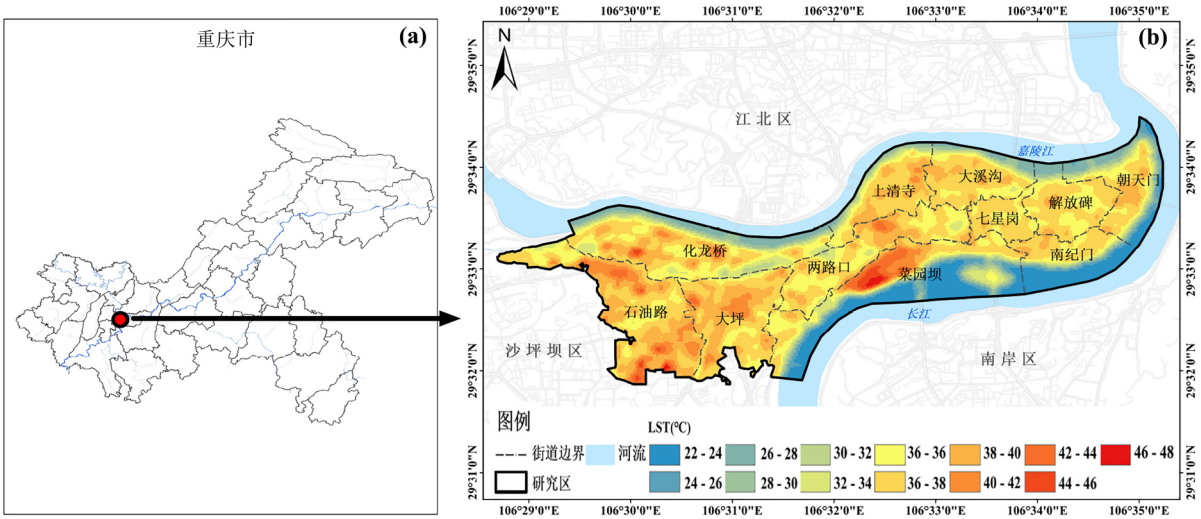


图 1　研究区位和地表温度图(a. 区位图; b. 地表温度图)

Fig. 1　The map of the study area (a. Location; b. Land surface temperature)

足,迫使城市向高密度形态发展,绿地及滨水区被建设用地侵蚀情况严重。如何缓解城市热岛效应,改善人居环境质量,是城市发展所面临的迫切而现实的问题。

1.2　数据来源及预处理

本次研究综合使用 Landsat 8 遥感影像、谷歌影像、1∶500 城市地形图等数据。利用 Landsat 8 TIRS Band 10 反演地表温度(Land Surface Temperature, LST),通过监督分类方法获得初步的城市地表覆盖类型,然后将 LST、地表覆盖、地形图等数据统一纳入至 GIS 数据库中,建构基础研究数据库。

1.2.1　地表温度反演

用于反演地表温度的 Landsat 8 遥感影像来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)。影像成像时间为 2016 年 7 月 10 日 11∶27AM,该时段研究区上空无云、成像质量好,影像轨道号为 p127/r40。首先借助 ENVI 5.1,对遥感数据进行几何纠正、工作区裁剪、辐射校正等工作;使用遥感影像第 10 波段,运用大气校正法反演得到地表温度(图 1b),具体反演流程与方法可以参见文献[27]。反演后的地表温度(22℃~48℃)与当日空气温度(28℃~38℃)具有较高的一致性,反演的结果较为可靠。

1.2.2　地表覆盖监督分类

基于 Landsat 8 遥感数据,谷歌影像数据补充校正,使用 ENVI 5.1 监督分类方法中的最大似然法进行初步地表覆盖类型分类。在进行分类前,首先提取 100 个兴趣研究区对影像监督分类方法进行训练,Kappa 指数达到 0.86。以此作为 LCZ 的地表覆盖基础,主要包括绿地、裸地、水体、建筑、不透水硬质铺装等 5 类(图 2)。

1.2.3　城市空间形态指数

现有城市气候研究中,所使用的城市空间形态指数众多,难以确定哪一类指数具有典型性与代表性。本文结合 LCZ 的指数分类体系[25],考虑山地城市的特殊性、渝中区的区位特征,选择建筑密度(Building Density, BD)、下垫面不透水率(Impervious Surface Fraction, ISF)、天空开阔度(Sky View Factor, SVF)、平均高度(Mean Height, MH)、容积率(Floor Area Ratio, FAR)、迎风面积指数(Frontal Area Index, FAI)这 6 个数据便于获取且城市气候研究中较为常用的空间形态指数(表 1),这些指数通过整合城市地形图(高程、建筑、道路等)、遥感影像(绿地)及相关数据,在 QGIS 软件中进行提取计算。

1.3　研究方法

由于城市空间形态指数计算方式在很大程度上与地块面积相关,且在数理统计上部分空间形态指数与热环境之间存在着尺度相关关系[19],同时考虑到小尺度不能较好反映地块上建筑密度、下垫面类型变化,而大尺度存在空间分辨率较低的缺陷。故综合形态指数尺度相关及模型需要,首先将研究区划分为 250 m×250 m 的基础统计格网,提取落于格网内的 LST、建筑、地表覆盖等信息,结合 QGIS 中的 UMEP 插件计算各格网的城市空间形态指数。然后将各形态指数以及对应的 LST 导出至 SPSS 24.0 软件中进行 Pearson 相关性分析,比较相关系数的显

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



图 2 地表覆盖分类

Fig. 2 Land cover classification

表 1 城市空间形态指数

Tab. 1 Urban form factors

城市空间形态指数	定义	计算公式
建筑密度	一定的地块范围内，建筑物基底总面积与地块总面积的比值	$BD=\frac{C_S}{C_L}$ C_S 为建筑物基底总面积，C_L 为地块总面积
下垫面不透水率	一定的地块范围内，岩石、铺装等硬质面积在下垫面总面积中所占的比重	$ISF=\frac{S_I}{S_L}$ S_I 为岩石、铺装等硬质铺装面积，S_L 为下垫面总面积
天空开阔度	地表被周围凸起的地形或地物所遮蔽时，地表只能见到全部天空的一部分，其中可见部分与天穹半球的比值	$SVF=1-\sum_{i=1}^{N}P_i=1-\sum_{i=1}^{N}\sin^2\beta_i\left(\frac{\alpha_i}{360^\circ}\right)$ N 为天空半球中被障碍物遮蔽的角元素总数，α_i 和 β_i 分别为在该角元素处所能看见太阳的最小仰角和方位角[28]
平均高度	一定的地块范围内建筑或树木的平均高度	$MH=\sum_{i}^{N}H_iP_i$ N 为一定范围内建筑、树木、草地等覆盖的类型数量，H_i 为该覆盖类型的平均高度，P_i 为该覆盖类型在地块范围内所占的比重
容积率	一定的地块面积上总建筑面积与地块面积的比值	$FAR=\frac{T_S}{C_L}$ T_S 为一定地块面积上总建筑面积，C_L 为地块面积
迎风面积指数	特定风向上，建筑物迎风方向总面积（A_F）与地块平面面积（A_T）之比	$FAI=\frac{A_F}{A_T}=L_y*\ Z_H*\ P_{el}$ A_F 为建筑在来风方向上的投影面积，L_y 为建筑在迎风面上的投影宽度，Z_H 为建筑的平均高度，P_{el} 则代表单位面积上的建筑数量[29]

著性，保留与 LST 相关性强且相互之间相关程度弱的空间形态指数。其次，使用保留后的形态指数，采用 LCZ 气候分区方法，并根据渝中区的实情修正指数划分区间，然后对城市空间形态类型进行分类。最后，将城市空间形态类型与 LST 进行叠加，统计分析城市空间形态类型和 LST 之间的关系，识

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

别山地高密度城市空间形态类型的地表热环境效应。

2　结果

2.1　城市空间形态指数与地表温度之间的相关性

统计并分析城市空间形态指数与 LST 之间的相关性，结果发现(表 2)。

下垫面不透水面率、建筑密度、平均高度、容积率与 LST 之间呈现出显著的正相关关系，即城市空间形态指数越大，与之对应的 LST 越高；天空开阔度和 LST 之间存在着显著的负相关关系，即越空旷的地方，地表温度越低，反之建筑物越密集的区域，地表温度越高。这与现有大部分研究结果一致[30,31]，下垫面不透水面率、建筑密度、容积率、天空开阔度等城市形态指数主要反映地表的建设强度大小，人工建设强度越大，与之对应的人为活动对自然环境的改造程度越强。人为热量在高强度建设区域汇聚，难以在短时间内散热，更容易产生热岛现象。

表 2　城市空间形态指数与 LST 之间的 Pearson 相关系数

Tab. 2　The correlations between urban spatial form factors and LST

城市形态指数	天空开阔度	下垫面不透水率	建筑密度	平均高度	迎风面积指数	容积率
LST	−.583**	.531**	.636**	.332**	0.079	.417**

注：**. 相关性在 0.01 水平显著(双边检测)；*. 相关性在 0.05 水平显著(双边检测)。

迎风面积指数与 LST 之间并没有表现出显著的相关关系，这与大部分研究结果相悖[32,33]。理论上，迎风面积指数越高，建筑群立面所产生的“风墙”效应越显著，建筑群所产生的热量不能有效通过空气流动交换出去，从而显著增加高密度建筑群区域内部“热岛”产生的几率。事实上，迎风面积指数在很大程度上依赖于研究网格的边界条件，即建筑的高度以及起伏情况，并不能反映研究范围内的建设强度。另外，受迎风面积指数计算方法的限制，竖向方向上城市空间形态类似而整体建设强度不同的地块可能在某个风向上具有相同的迎风面积指数值。即使是同一地块，建筑群在各方向上的总迎风面积大小也不一，产生了不同的迎风面积指数(图 3)，山地地形起伏的巨大差异又进一步影响并干扰了迎风面积指数。此外，迎风面积指数主要反映的是局部区域内建筑对风的影响能力，在无风或微风条件下，由迎风面积指数所反映的竖向城市空间形态差异对热环境的影响甚微。即使在同样的风速下，上风向由于空气从城市郊区吹入，温度较低，具有更好的冷却效果；而下风向空气在流经城市区域时被加热，温度升高，所能产生的降温冷却效果较为有限。

由于容积率是以建筑密度、建筑高度、天空开阔度等建设强度指数在地块上的综合反映，与多个形态指数之间存在着高度相关性。为减少城市空间形态指数之间相互关联效应对热环境的干扰，保证热环境研究中城市空间形态指数的典型性与代表性，将容积率指数剔除。而迎风面积指数与 LST 之间没有显著的关系，也将之剔除。经上述处理，提取得到与 LST 相关性较好的 4 个城市空间形态指数(建筑密度、下垫面不透水面率、平均高度、天空开阔度)。

2.2　城市空间形态分类

参考 Oke 的 LCZ 城市形态分类方案[25]，基于

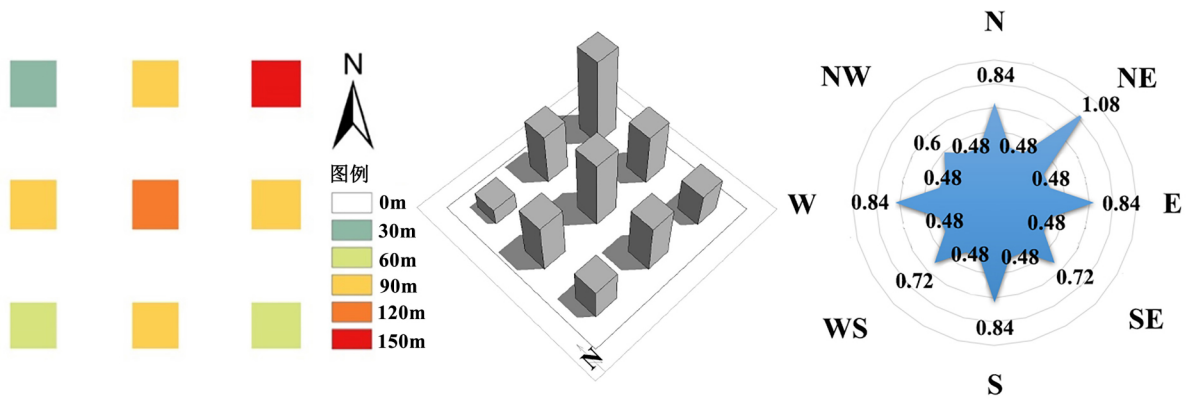


图 3　基于理想格网样本的不同方向上迎风面积指数

Fig. 3　Frontal area index in different directions based on an ideal grid sample

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 基于 LCZ 的城市空间形态分类

Tab. 3 Classification of urban spatial morphology based on local climate zone

LCZ 大类	LCZ 小类	天空开阔度	参考值*	建筑密度	参考值*	不透水面率	参考值*	平均高度/m	参考值*
建设用地	紧凑高层	0.4~0.5	0.2~0.4	0.4~0.8	0.4~0.6	0.6~1	0.4~0.6	>27	>25
	紧凑中层	0.4~0.7	0.3~0.6	0.4~0.6	0.4~0.7	0.3~0.7	0.3~0.5	15~27	10~25
	紧凑低层	0.4~0.8	0.2~0.6	0.4~0.7	0.2~0.4	0.2~0.5	0.2~0.5	9~15	3~10
	开放高层	0.5~0.7	0.5~0.7	0.2~0.4	0.2~0.4	0.2~0.6	0.3~0.4	>18	>25
	开放中层	0.5~0.8	0.5~0.8	0.2~0.4	0.2~0.4	0.2~0.5	0.3~0.5	9~18	10~25
	开放低层	0.6~0.9	0.6~0.9	0.2~0.4	0.2~0.4	0.1~0.4	0.2~0.5	<9	3~10
	重工业	0.7~0.9	0.6~0.9	0.2~0.4	0.2~0.3	0.3~0.5	0.2~0.4	5~15	5~15
自然地表	少量建筑	>0.7	>0.8	0.1~0.2	0.1~0.2	<0.2	<0.2	3~15	3~10
	硬质地表	0.8~0.9	>0.9	<0.1	<0.1	>0.9	>0.9	<1	<0.25
	裸地	0.8~0.9	>0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<1	<0.25
	浓密树林	>0.8	>0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	6~15	3~30
	稀疏树林	0.7~0.9	0.5~0.8	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	3~10	3~15
	水体	>0.9	>0.9	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0	0

* 注: 参考值为 Oke 所推荐的指数区间。

形态指数与地表温度之间的相关性结果,使用建筑密度、下垫面不透水面率、平均高度、天空开阔度等 4 个参数作为研究区内城市空间形态分类的主要指数,并对 Oke 所推荐城市空间形态指数划分区间进行了修正,建构了具有地方适宜性的城市空间形态分类体系(表 3)。

研究区内的城市空间形态类型最终被分成建设用地类型与自然地表类型 2 个大类,紧凑高层、开放高层、少量建筑等 13 个小类(图 4)。统计结果表明,研究区内城市空间形态以紧凑低层型、开放低层型、少量建筑型为主,而绿地、裸地等自然地表类型稀少。

在城市形态的空间分布上,东西部差异明显。东部以紧凑中层、紧凑低层等类型为主,西部以少量建筑、开放低层等类型为主。研究区东部解放碑片区为城市老城核心区域,自建城开埠以来,便一直是重点发展区域,人工建设集中。由于三面环水,地形起伏大,适用于开发建设用地少,近年来经济快速发展与用地资源短缺之间的矛盾愈发突出。在市场经济的推力下,原有山地城市景观不断被高强度城市建设所蚕食,其城市空间形态呈现出以紧凑高层为核心,逐步向周边紧凑低层辐射的趋势;研究区西部大坪、化龙桥、石油路片区为城市新兴发展极,在整体区位中主要承担居住功能,开发强度较低,城市空间形态基本上以少量建筑和开放低层为主。而化龙桥南部、石油路东北部地形起伏大,不便于建设,使得该区域建设强度最低,用地覆盖类型以裸地和绿地为主。主要的城市建设用地集中在大坪和石油路南部区域,该片区城市空间形态以紧凑低层为主,开放高层和开放中层夹杂分布。

2.3 城市空间形态类型的地表温度效应

提取并统计各格网的城市空间形态类型及平均地表温度,分析发现,在城市空间形态大类(自然地表类型、建设用地类型)和各城市空间形态小类(紧凑型、开放型)之间均存在较大的地表温度差异(图 5)。

2.3.1 自然地表类型的地表温度效应

自然地表类型比建设用地类型的地表温度更低。自然地表覆盖类型上由于其较低的地表不透水面率、建筑密度和平均建筑高度,一方面反映了人工建设对自然空间形态较低的改造程度,另一方面绿地、水体等自然要素本身也具有较强的降温效应,从而呈现出硬质地表/铺装(36.07℃) > 少量建筑(36.06℃) > 裸地(35.75℃) > 浓密树林(33.80℃) > 水体(27.69℃)等类型地表温度依次降低的趋势。进一步统计分析得知,温度变化最大为水体(方差 3.01℃)、最小为浓密树林(方差 0.05℃)。由于本次研究仅将靠近河岸的水面区域纳入研究范围内,并且将陆地占地面积少于 10% 的格网统一归类为水体,而大多靠近水体的陆地区域其建设强度较高,另外还有码头、船舶的存在,这就导致了大部分水体格网具有混合的下垫面用地类

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

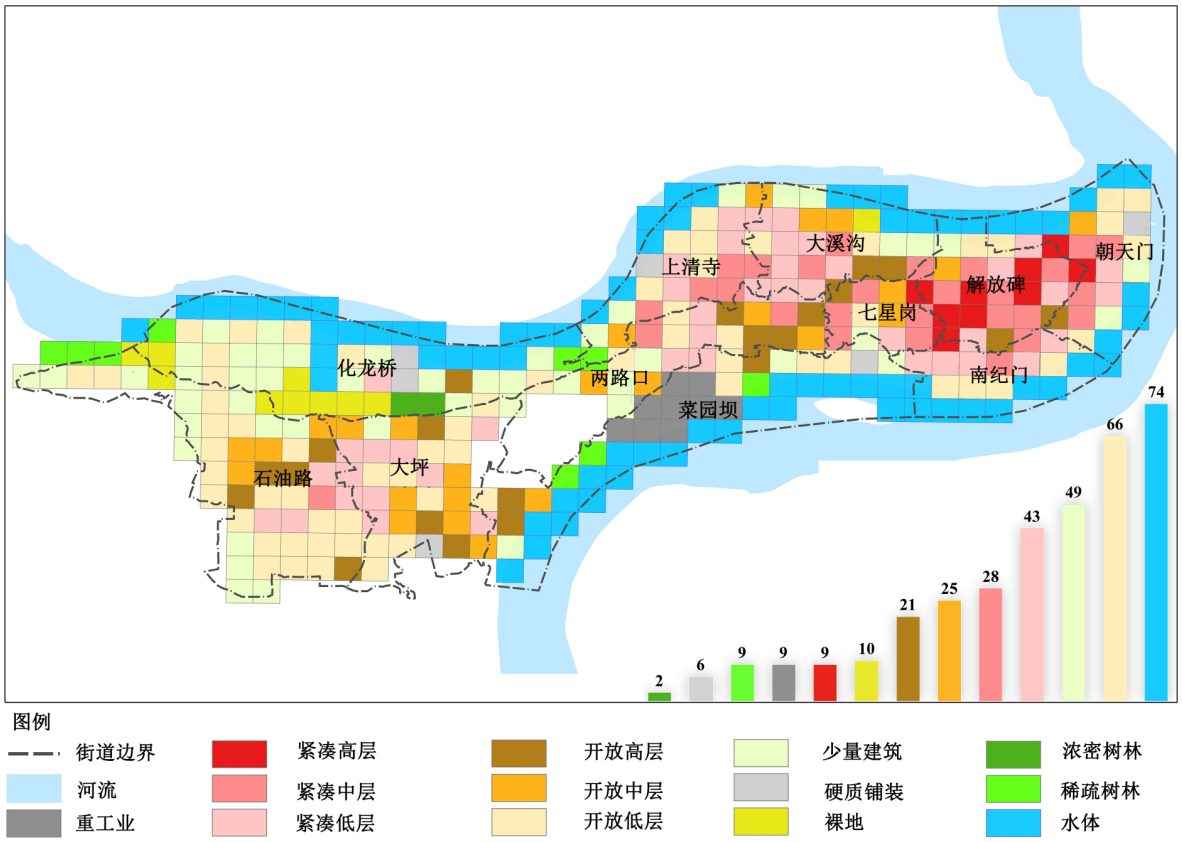


图 4　研究区城市空间形态分布

Fig. 4　The distribution of urban spatial form in study area

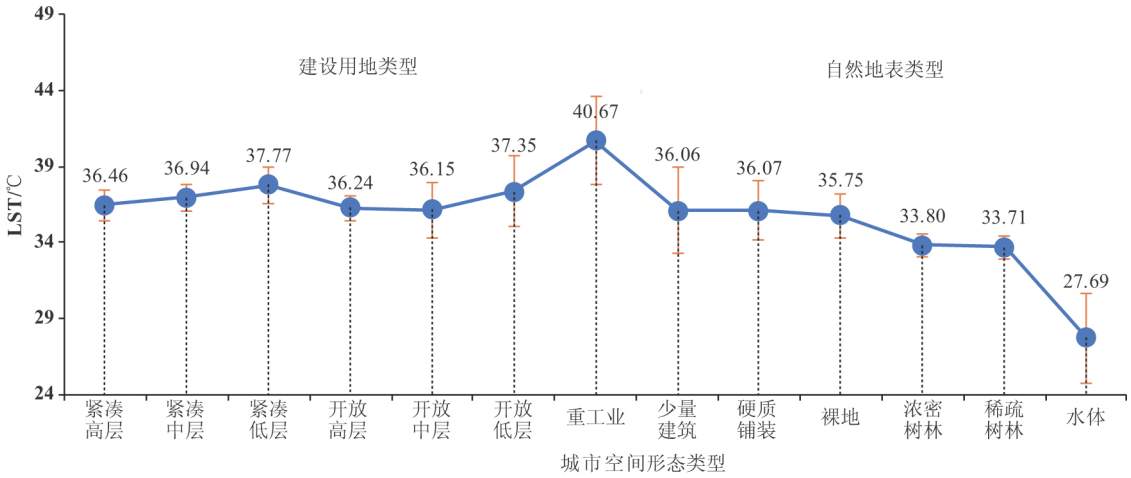


图 5　各城市空间形态类型对应的地表温度

Fig. 5　Statistics of land surface temperature in different urban spatial form

型，在人为热和自然热差异的双重影响下，各水体格网内表面温度变化差异显著。而浓密树林区域内外建设量少，整体构成以树木为主，空间异质性低，受其他要素干扰较少，因而其温度变化最小。

2.3.2　建设用地类型的地表温度效应

在建设用地类型的热环境效应方面，紧凑型比开放型地表温度更高（图 5），即紧凑高层（36.46℃）＞开放高层（36.24℃）、紧凑中层（36.94℃）＞开放中层（36.15℃）、紧凑低层（37.77℃）＞开放低层（37.35℃）。然而其温度变化的方差显示，紧凑型（1.03℃）比开放型（1.63℃）温度变化更趋稳定，并且呈现出低层（2.31℃）＞中层（1.85℃）＞高层

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(0.77℃)的趋势。人工建设强度较低时,人工建设对原有自然地表空间形态的改造程度有限,因地表覆盖及人为热量释放差异的原因,人工建设区域释放的总热量显著高于非建设区域,导致热量在空间分布上的不均,这种趋势在低密度建筑区域表现尤为明显。随着人工建设强度的增加,原有自然地表逐渐被硬质铺装覆盖,当城市空间形态表现为紧凑型时,下垫面已基本被硬质铺装所覆盖,地表所吸收的总太阳辐射量也趋于一致。另一方面,相对于低层类型较为散乱且不规整的建筑空间形态布局,高层建筑为满足采光及消防等方面的要求,其空间形态布局更为规整。

然而在同为紧凑型或开放型的城市空间形态里,地表温度并没有与建设量之间表现出一定的正相关关系,反而表现出一定的逆向耦合关系。即以高层为主的城市空间形态类型比以低层为主的城市空间形态类型地表温度更低(图5),如紧凑高层(36.46℃)<紧凑中层(36.94℃)<紧凑低层(37.77℃)、开放高层(36.24℃)<开放中层(36.15℃)<开放低层(37.35℃)。事实上,受太阳光入射角度的限制,建筑层数越高,建筑所能提供的建筑阴影越多,所能到达地表的总太阳辐射量越少。虽然以高层建筑为主的城市空间形态可能比以低层建筑为主城市空间形态消耗更多的能源,释放更多的热量,但大部分高层建筑释放的热量通过空调散热等形式,直接作用于空气,热量不易于在近地表累积。此外,建筑高层处由于没有裙房以及其他建筑的阻挡,具有良好的通风条件,这进一步为建筑散热提供了便利。

3 讨论

文章研究结果表明,在高强度开发建设不可避免的情况下,可以通过合理有效的布局,将低层空间让位于绿地、水体等自然要素,建筑向竖向高层发展,建设一种高层低密度的城市空间形态,可以达到较好的热环境调控效果,也满足了城市开发建设强度的要求,避免了城市低密度无效蔓延,又可以获得良好的景观环境收益,实现城市和谐可持续发展。由于国内基于LCZ的研究非常少,其他平原城市是否和山地城市具有同样的空间形态热环境效应,仍然需要更多的探索与验证。

迎风面积指数与地表温度之间没有显著的相关关系,这也说明了迎风面积指数在城市热环境研究中的局限性,尤其是在复杂的山地环境中,对城市风热环境的影响要素更多。因此,城市通风廊道建设需要综合考虑城市的主导风向、地形条件、山水格局等多方面的影响,并通过通风廊道将绿地、水体等自然地表类型串联起来,以进一步增强风廊的降温效应。在城市用地布局上,可以考虑将工业用地等具有显著增温效应的用地类型布置在城市下风向,以减少对城市热环境的影响。此外,需要利用灾害风险理论,评估热环境作用对象的敏感性和脆弱性,识别热敏感的用地类型、城市空间和城市人群(老人、儿童),通过规划用地布局及其空间形态调控手段,综合提高城市热环境舒适性。

文章也存在不足之处,如仅使用地表温度来作为评价城市热环境的指数,使用空气温度可能获得更好的效果。此外,大量研究指出,夜晚和白天城市热环境状况截然不同,夜晚城市空间形态与热环境之间存在着怎样的关系还需进一步研究。

4 结论

抽取与地表温度具有显著相关性的城市空间形态因子,使用LCZ分类体系,对重庆市渝中区具体城市空间形态类型进行了划分,结果发现:

(1)在诸多定量表征城市空间形态的指数中,建筑密度、下垫面不透水面率、平均高度、容积率均与地表温度之间呈现出显著的正相关关系;天空开阔度与地表温度之间呈现出显著的负相关关系;迎风面积指数与地表温度之间的相关性关系不显著。

(2)在具体的城市空间形态类型中,首先,城市空间形态大类(地表覆盖)之间,建设用地类型的地表温度比自然地表类型更高。其次,在城市空间形态小类(同为建设用地或自然地表用地)之间,城市空间形态所对应的地表温度依次为紧凑低层>紧凑中层>紧凑高层、开放低层>开放中层>开放高层、裸地>绿地>水体。而在地表温度的变化上,高层>中层>低层,并且空间形态变化越小的类型其温度越趋于稳定,如紧凑高层、浓密树林。

在城市规划建设过程中,主要调控建筑密度、天空开阔度、不透水率和平均建筑高度等形态指数,优化空间形态;合理使用开放高层、紧凑高层等城市空间形态,充分使用水体、绿地来控制可能产生的热环境效应,提升城市热环境舒适性。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

致谢:感谢同济大学建筑与城市规划学院沈清基教授、重庆大学建筑与城规学院黄瓴教授、孙忠伟副教授对本文的指导,另外匿名评审专家的意见也有助于文章质量的提高,在此一并致谢!

参考文献(References)

[1] 沈清基,张鑫,周原田. 城市危机:特征、影响变量及表现剖析—基于生态环境危机的视角[J]. 城市规划学刊,2012,**123**(6):23-33 [SHEN Qingji, ZHANG Xin, ZHOU Yuantian. Urban ecological crisis: characteristics, factors and analysis [J]. Urban Planning Forum, 2012, **123**(6): 23-33]

[2] STEWART I D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature [J]. International Journal of Climatology, 2011, **31**(2): 200-217

[3] 肖荣波,欧阳志云,李云峰,等. 城市热岛的生态环境效应[J]. 生态学报,2005,**25**(8):2055-2060 [XIAO Rongbo, OU YANG Zhiyun, LI Yunfeng, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(8): 2055-2060]

[4] WILSON B. Urban form and residential electricity consumption: Evidence from Illinois, USA [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, **115**(7): 62-71

[5] CORBURN J. Cities, climate change and urban heat island mitigation: localising global environmental science [J]. Urban Studies, 2009, **46**(2): 413-427

[6] FOUILLET A, REY G, LAURENT F, et al. Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France [J]. International Archives of Occupational and Environmental Health, 2006, **80**(1): 16-24

[7] 埃维特·埃雷尔,戴维·珀尔穆特,特里·威廉森. 城市小气候[M]. 叶齐茂,倪晓晖译. 中国建筑工业出版社,2014:25-86 [ERELL E, PEARLMUTTER D, WILLIAMSON T J. Urban microclimate: designing the spaces between buildings [M]. YE Qimiao, NI Xiaohui. translate. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014: 25-86]

[8] ADAMS M P, SMITH P L. A systematic approach to model the influence of the type and density of vegetation cover on urban heat using remote sensing [J]. Landscape and Urban Planning, 2014, **132**: 47-54

[9] BOWLER D E, BUYUNGALI L, KNIGHT T M, et al. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence [J]. Landscape and urban planning, 2010, **97**(3): 147-155

[10] THEEUWES N E, SOLCEROVA A, STEENEVELD G J. Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, **118**(16): 8881-8896

[11] 岳文泽,徐丽华. 城市典型水域景观的热环境效应[J]. 生态学报,2013,**33**(6):1852-1859 [YUE Wenze, XU Lihua. Thermal environment effect of urban water landscape [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(6): 1852-1859]

[12] WONG M S, NICHOL J, NG E. A study of the "wall effect" caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, **102**(4): 245-253

[13] CAI Z, HAN G, CHEN M. Do water bodies play an important role in the relationship between urban form and land surface temperature? [J]. Sustainable Cities & Society, 2018, 39: 487-498

[14] 岳文泽,刘学. 基于城市控制性详细规划的热岛效应评价[J]. 应用生态学报,2016,**27**(11):3631-3640 [YUE Wenze, LIU Xue. Assessment on heat island effect based on urban regulatory planning [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(11): 3631-3640]

[15] 韩贵锋,蔡智. 山地城市公园形态对其降温效应的影响[J]. 西部人居环境学刊,2016,**31**(6):61-68 [HAN Guifeng, CAI Zhi. Impact of mountain urban park form on cooling effect [J]. Journal of Human Settlements in West China, 2016, **31**(6): 61-68]

[16] 杨磊,李贵才,林姚宇,等. 城市空间形态与碳排放关系研究进展与展望[J]. 城市发展研究,2011,**18**(2):12-17 [YANG Lei, LI Guicai, LIN Yaoyu, et al. Progress and prospect on relationship research between urban form and carbon emission [J]. Urban Studies, 2011, **18**(2): 12-17]

[17] 丁沃沃,胡友培,窦平平. 城市形态与城市微气候的关联性研究[J]. 建筑学报,2012(7):16-21 [DING Wowo, HU Youpei, DOU Pingping. Study the relationship between urban pattern and urban microclimate [J]. Architectural Journal, 2012(7): 16-21]

[18] 崔胜辉,徐礼来,黄云凤,等. 城市空间形态应对气候变化研究进展及展望[J]. 地理科学进展,2015,**34**(10):1209-1218 [CUI Shenghui, XU Lilai, HUANG Yunfeng, et al. Progress and prospect of study on urban spatial patters to cope with climate change [J]. Progress in Geography, 2015, **34**(10): 1209-1218]

[19] 韩贵锋,蔡智,谢雨丝,等. 城市建设强度与热岛的相关性——以重庆市开州区为例[J]. 土木建筑与环境工程,2016,**38**(5):138-147 [HAN Guifeng, CAI Zhi, XIE Yusi, et al. Correlation between urban construction and urban heat island: a case study in Kaizhou district, Chongqing [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, **38**(5): 138-147]

[20] GUO G H, ZHOU X, WU Z, et al. Characterizing the impact of urban morphology heterogeneity on land surface temperature in Guangzhou, China [J]. Environmental Modelling and Software, 2016, **84**: 427-439

[21] 邬尚霖. 建筑密度对街区热环境影响分析[J]. 华中建筑,2016,**34**(8):52-56 [WU Shanglin. Analysis of impact of building density on the block thermal environment [J]. Huazhong Architecture, 2016, **34**(8): 52-56]

[22] GIRIDHARAN R, GANESAN S, LAU S S Y. Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong [J]. Energy and Buildings, 2004, **36**(6): 525-

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

534

[23] 张海龙，祝善友，王明江，等. 基于 3D 建筑物数据的天空开阔度估算及其城市热岛应用研究——以 Adelaide 为例 [J]. 遥感技术与应用，2015，**30**(5)：899－907 [ZHANG Hailong，ZHU Shanyou，WANG Mingjiang，et al. Sky view factor estimation based on 3D urban building data and its application in urban heat island — illustrated by the case of Adelide [J]. Remote Sensing Technology and Application，2015，**30**(5)：899－907]

[24] 胡友培. 高密度城市形态热岛性能优化设计研究 [J]. 建筑学报，2015(2)：23－29 [HU Youpei. A performance-oriented study on the morphological optimization in a high density area concerning urban heat island effect [J]. Architectural Journal，2015(2)：23－29]

[25] 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

[26] STEWART I D，OKE T R，KRAYENH E S. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations [J]. International Journal of Climatology，2014，**34**(4)：1062－1080

[27] 邓书斌，陈秋锦，杜会建，等. ENVI 遥感图像处理方法 [M]. 北京：高等教育出版社，2014：422－424 [DENG Shubing，CHEN Qiujin，DU Huijian，et al. The method of remote sensing image processing using ENVI [M]. Beijing：Science Press，2014：422－424]

[28] MATZARAKIS A，MATUSCHEK O. Sky view factor as a parameter in applied climatology — rapid estimation by the SkyHelios model [J]. Meteorologische Zeitschrift，2011，**20**(1)：39－45

[29] NG E，YUAN C，CHEN L，et al. Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness：a study in Hong Kong [J]. Landscape and Urban Planning，2011，**101**(1)：59－74

[30] SONG J，DU S，FENG X，et al. The relationships between landscape compositions and land surface temperature：quantifying their resolution sensitivity with spatial regression models [J]. Landscape and Urban Planning，2014，**123**(1)：145－157

[31] CHEN L，NG E，AN X，et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise，high-density urban areas of Hong Kong：a GIS-based simulation approach [J]. International Journal of Climatology，2012，**32**(1)：121－136

[32] MAN S W，NICHOL J，NG E. A study of the "wall effect" caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques [J]. Landscape and Urban Planning，2011，**102**(4)：245－253

[33] YUAN C，REN C，NG E. GIS-based surface roughness evaluation in the urban planning system to improve the wind environment — a study in Wuhan，China [J]. Urban Climate，2014，10：585－593

Assessing Land Surface Temperature in the Mountain City with Different Urban Spatial Form Based on Local Climate Zone Scheme

CAI Zhi，HAN Guifeng*

(*College of Architecture and Urban Planning / Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area，Chongqing University，Chongqing* 400045，*China*)

Abstract: Under the background of global warming，the intensity，frequency，duration and coverage of high temperature in urban areas are often exceeding the historical records. Thermal environment has become one of the most important factors affecting the quality of human settlements in cities. In a famous mountain city and "stove" city in China，Yuzhong district of Chongqing is a typical high population density urbanized area with high temperature especially in the summer. Taking Yuzhong district as an example，the potential relationships between urban spatial form factors and Land Surface Temperature (LST) were analyzed by Statistical Package for Social Science (SPSS，version 24.0). The LST was retrieved from Landsat8 images. The six urban spatial form factors were calculated through the current vector topographic maps，including Building Density (BD)，Impervious Surface Fraction (ISF)，Sky View Factor (SVF)，Mean Height (MH)，Floor Area Ratio (FAR)，and Frontal Area Index (FAI). The Local Climate Zones (LCZ) scheme was used to classify the urban spatial form，which aimed to improve urban thermal environment through the urban planning and design. The results show that FAR，BD，ISF and MH have significant positive correlations with LST，and SVF has a significant negative correlation with LST.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

However, there is no significant correlation between FAI and LST. The study also found that the LSTs in urbanized areas covered with buildings are higher than those without buildings (that covered with vegetation, water, bare soil, etc.). The LSTs in compact spatial form are higher than the LSTs in the open spatial form. Furthermore, the LSTs vary in different compact spatial form, e. g., the highest is compact low-rise higher form, followed by compact middle-rise form, and the lowest is compact high-rise form. Therefore, the reasonable layouts of land use and buildings should be considered in the process of urban planning and design, by such ways: providing more space for the green areas, water and other natural elements, and the development of high-rise building. High rise and lower density urban form are more effective to mitigate urban heat island effect and improve urban thermal environment.

Key words: urban spatial form; urban heat island; land surface temperature; local climate zone; urban planning

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net