doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.018

城市建设强度与热岛的相关性
——以重庆市开州区为例

韩贵锋,蔡智,谢雨丝,曾卫
(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:城市建设强度是城市热岛形成与演变的主要驱动因素,为了揭示两者之间的量化关系,以重庆市开州区为例,在用地地块、规则网格和建筑斑块3个空间尺度上,使用ArcGIS提取地表温度(LST)与建设强度指标,利用SPSS分析其相关性并构建多元回归模型。结果表明:用地地块尺度上,LST与绿化率、建筑密度和容积率之间均呈现显著的负相关,与建筑底面积和总建筑面积之间均呈现显著的正相关。规则网格尺度序列上,LST与建设强度各指标之间的相关性系数随网格面积的增大而增大,在840 m网格时达到最大值;总体上LST与绿化率之间呈显著的负相关,与建筑密度和容积率之间呈显著的正相关。建筑斑块的尺度上,LST与建筑层数之间有显著的负相关关系,与总建筑面积之间有显著的正相关关系。城市建设强度直接或间接影响了城市热岛的形成与演变,而相关分析发现,建设强度指标并非都与LST之间呈正相关关系,这表明城市热岛除受建设强度的影响外,还受区域气候、城市形态、城市性质、交通方式以及建筑材质与色彩等多种因素的协同影响,是一个非线性的复杂过程。

关键词:城市规划;土地利用;城市热岛;容积率;建筑密度
中图分类号:TU984　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1674-4764(2016)05-0138-10

Correlation between urban construction and urban heat island: A case study in Kaizhou District, Chongqing

Han Guifeng, Cai Zhi, Xie Yusi, Zeng Wei
(College of Architecture and Urban Planning; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Urban construction was an important driving factor result in the urban heat island. In order to reveal the relationships between urban construction and urban heat island, taking Kaizhou District, as an example, land surface temperatures (LST) and urban construction index were extracted using ArcGIS spatial analysis tools, and the relationship between the two was analyzed in SPSS on three spatial scales:

收稿日期:2016-01-21
基金项目:国家自然科学基金(41001364);重庆市自然科学基金(CSTC 2011jjA00025);中央高校基本科研业务费科研专项(CDJZR12190007)
作者简介:韩贵锋(1975-),男,副教授,博士,主要从事城市化的环境效应与生态规划研究,(E-mail)hangf@cqu.edu.cn。
Received: 2016-01-21
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 41001364); Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTC 2011jjA00025); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. CDJZR12190007)
Author brief: Han Guifeng (1975-), associate professor, PhD, main research interest: environmental effects of urbanization and ecological urban planning, (E-mail) hangf@cqu.edu.cn.

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

land patch, regular grid and building lot. The results showed that LST varied greatly from land use type, and the correlations between LST and urban construction index were different among three scales. On land patch scale, there were significantly negative correlations between LST and greening ratio (GR), floor area ratio (FAR) and building density (BD) respectively and there were significantly positive correlations between LST and building bottom area (BBA) and total construction area (TCA) respectively. On regular grid scales, the correlations between LST and urban construction index increased along with the increase of grid area, and almost all correlation coefficients reached maximum values on the 840-meter grid scale. The LST was negatively correlated with GR and was positively correlated with BD and FAR respectively. Then the multiple regression model was established between LST and BD and GR. On building lot scale, there were significantly positive correlations between LST and BD and FAR respectively. However, there were significantly negative correlations between LST and building floors (BF) and strong positive correlations between LST and TCA. Although, urban construction index had great influence on urban heat island, not all urban construction index were positively correlated with LST. The results implied that urban heat island intensity and its spatial distribute were also affected by other various factors including topography, local climate, urban morphology, designated function of city, urban transportation and building material and color. Furthermore, the impact of various factors on urban heat island may be a nonlinear complicated and dynamic process.

Keywords: urban planning; land use; urban heat island; floor area ratio; building density

中国正处于高速城市化阶段，2014 年城镇化率已达到 54.77%。随着国家新型城镇化规划的实施，未来几年将有 1 亿左右的农业转移人口和其他常住人口在城镇落户[1]。城市人口增加和空间扩张是城市化的基本表征。伴随着城市的发展，城市环境和生态问题也愈发凸显，成为城市人居环境质量关注的主要焦点之一。城市化急剧改变了城市所在地原有的地貌形态和土地用途，以及区域内的太阳辐射入射量、能量平衡、湿度、风场结构及风速等，最终改变了城市局部气候[2]。其中，最为常见的是城市热岛现象。早在 19 世纪初，霍华德在对伦敦的研究中就发现城市温度要比临近的乡村高的现象。随后，学者们对城市热岛的形成机理、影响因素、热岛模拟和减缓措施等方面进行了大量研究[3-10]。已有研究一致认为城市热岛由众多因素影响，诸如人口、土地使用方式改变而导致热量在城市集中所产生的结果[11]，也是城市多种要素协同影响的综合表现。城市热岛的热量来源可分为太阳辐射（吸收量、反射量）和人为热（交通、建筑、工业、人体）两类。按其影响要素可以分为自然要素、人工物质空间要素、非物质空间要素几类。自然要素包括气候、风向、自然地形地貌、植被、水域[3-4]；人工物质空间要素包括土地利用、建筑及其组合形式、城市空间形态（开阔度、粗糙度、建筑密度、容积率）[5-7]；非物质空间要素包括人口、资源消耗、产业经济等[8-10]。其中，土地利用性质及强度是城市规划、实施和管理最为重要的控制要素，其建筑密度、容积率、建筑高度等对城市形态的影响最大，对城市热岛产生、形成和发展的作用最直接。目前对城市热岛的研究方法主要有 3 种：传统的外场实验和观测、实验室仿真、数值模拟[12]。传统研究方法是使用固定的自动监测站或定点样点或流动监测车监测温度，进而通过插值评估城市热岛空间分布及其强度，其研究对象主要是地面局部小范围内草地、树林、水体等的降热增湿效果[7,17-18]。近年来，随着遥感技术的发展，使用遥感影像反演地表温度的方法，可以弥补传统研究方法测点有限且不能多点同步测量，以及大范围、多次重复测量困难的缺点，其对象也逐步转化为对更大尺度范围内植被覆盖率、绿地布局、城市肌理等城市热岛影响机制的研究[6,15-16]。此外，遥感与 GIS 技术的结合，特别是各种关于热岛效应模型的构建与应用[7,17-18]，为研究解决城市热岛问题提供了新思路，成为城市热岛研究的有效途径。尽管城市土地利用和建设强度被认为是城市热岛效应中的最重要影响因子[19-20]，然而对城市建设强度与城市热岛强度之间的量化研究相对较少。笔者以重庆市开州区为例，使用遥感数据反演地表温度来度量城市热岛强度，结合城市土地利用性质和强度等资料，使用量化分析方法研究

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

城市建设强度指标与地表温度之间的相关性，分析建设强度对城市热岛的影响程度和作用机理，以期在规划编制阶段为相关规划提供经验和参数准备，从而在城市规划和景观规划过程中，通过预先采取措施来有效缓解城市热岛效应，改善人居环境质量。

1 数据与方法

1.1 研究区域

开州区位于重庆市东北部，地处长江三峡腹地、大巴山南麓，是典型的山地城市，也是因三峡水库淹没而新建的城市（图1）。介于北纬30°49′30″～31°41′30″、东经107°55′48″～108°54′之间，西邻四川省开江县，北接城口和四川省宣汉县，东毗云阳县和巫溪县，南邻万州区。开州属于小江流流域上游，城区南北被山川环绕，南河自西向东，东河由北向南，在城区交汇。城区以东3 km处的水位调节坝竣工后，在城区内形成了水面达14.8 km^{2}的汉丰湖，库容约8 000万m^3。近年来，重庆市的高温均位于开州城区，城市热岛现象凸显，笔者将开州城区的建成区作为研究区，其面积为41.94 km^2。由于是移民新城，各项资料齐全，便于开展研究，而且典型的山水格局对于重庆市乃至其他山地区域的城市热岛研究都具有代表性。

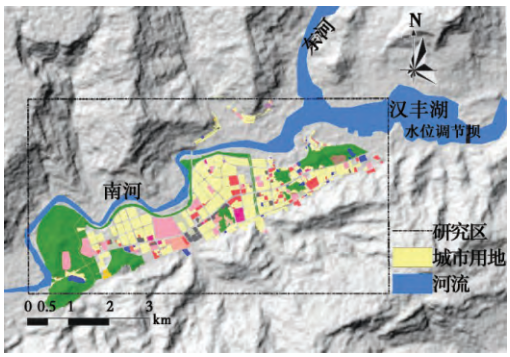


图1 研究区

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源与处理

使用Landsat8第10波段反演地表温度（LST），遥感影像来自http://www.gscloud.cn/。遥感成像时间是2013-08-12T11:22 am，影像轨道号为p127，行号为r38，空间分辨率为100 m（数据分发时处理为30 m）。为保证数据精度及准确性，首先借助ENVI 5.1对遥感影像进行几何纠正、工作区裁剪、辐射校正等工作。使用第4和第5波段提取归一化植被指数（NDVI），剔除NDVI＜0的非植被区域，并将其转换为地表绿化率，其他数据资料包括研究区航拍图、城乡规划图、建设现状图、土地利用现状图等。

1.2.1 地表温度反演 大量研究表明[21-24]，运用热红外波段进行地表温度的反演可以获得较真实的地表热环境信息。采用大气校正法对Landsat8的热红外波段（Band10）进行地表温度反演，从而反映城市热岛。其基本原理是，首先估计大气对地表热辐射的影响，然后把这部分大气影响从卫星传感器所观测到的热辐射总量中扣除，得到地表的热辐射强度，再将其转化为相应的地表温度[25-26]。具体流程与方法参见文献[27]，反演得到的LST如图2所示。历史天气记录表明，开州城区当天的天气记录为晴天，空气温度为24～38 ℃，反演的地表温度为28～44 ℃，气温与地表温度具有较好的一致性。

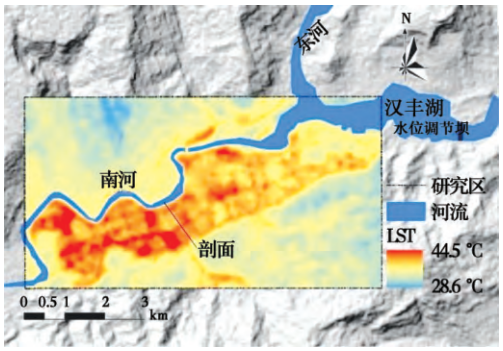


图2 研究区域的LST

Fig. 2 Land surface temperature (LST) in the study area

1.2.2 建设强度统计 城市建设强度用以衡量城市建设活动对原有地形地貌的改造程度，也是衡量社会经济发展的重要指标。利用ArcGIS 10.2，依据建设现状图及航拍图提取现状建筑信息，再叠加现状用地信息，统计用地内的多项建设强度指标，包括建筑底面积（Building Bottom Area，BBA）、总建筑面积（Total Construction Area，TCA）、容积率（Floor Area Ratio，FAR）、建筑密度（Building Density，BD）、绿化率（Greening Ratio，GR）、建筑高度（Building Height，BH）和建筑层数（Building Floors，BF）等。

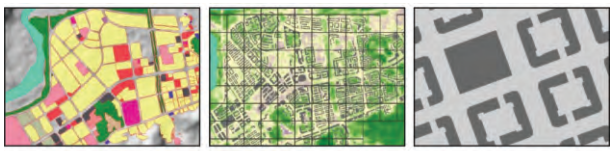
1.3 研究方法

鉴于空间相关性的强烈作用[15,18]，分别基于用

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

地地块、规则网格和建筑斑块等 3 个空间尺度（图 3），利用 ArcGIS 10.2 提取建设强度与 LST 样本，然后在 SPSS 中进行数据相关性分析，揭示建设强度指标与 LST 之间的相关性及其显著性，分析建设强度对 LST 的影响机制。

在用地地块尺度上提取城市建设强度指标，包括用地性质、BD、BBA、FAR、GR 等。由于城市用地地块的划分具有很强的人为主观性，相同面积和性质的地块，建设强度可能存在巨大的差异。为了减小这种人为因素的影响，尝试在不同规则网格尺度上来统计分析建设强度与 LST 之间的相关关系。事实上，城市建设强度主要由地块内建筑体量大小直接决定。此外，无论是从地块的尺度还是从规则网格的尺度上来看，统计单元内的信息都是地块内的多个建构筑物的混合信息，会对统计结果造成较大的影响。因此，从建筑斑块尺度上统计分析 LST 与建设强度之间的相关关系，试图进一步降低统计单元内混合地物的影响，探究建设强度与 LST 之间的真实关系，揭示建设强度对城市热岛的贡献和作用。



（a）用地地块尺度　（b）规则网格尺度　（c）建筑斑块尺度

图 3　研究尺度

Fig. 3　Three spatial scales in this study

2　结果与分析

2.1　基于地块尺度的分析

统计分析发现，居住、绿地、教育、商业等类型在城市用地中所占的比重较大，其他类型用地所占比重较小，不具有统计意义。因而只分析比重较大的城市用地内的 LST 与城市建设强度之间的关系。

2.1.1　**用地性质与 LST 之间的关系**　城市用地性质是决定地块内建设强度和人们活动方式的重要因素之一。由于城市下垫层面对 LST 作用显著且直接[28]，各类用地的平均 LST 有较大差异（图 4）。体育用地下垫层面主要为水泥、沥青、金属等不透水面，平均温度最高（41.84 ℃）；广场用地具有类似的下垫层面，其平均温度（38.67 ℃），仅次于体育用地；公园绿地内大部分是透水面，而且树木的蒸腾作用具有很好的降温增湿效果[13-14]，因而绿地内的平均温度最低（36.6 ℃）；同样，由于居住用地大多具有较高的绿地率，LST（36.97 ℃）也相对较低。各用地内平均温度的方差显示，教育用地的方差最大（1.79 ℃），缘于教育用地内透水性下垫面与不透水下垫面的差异明显，教学区具有较高的绿化，运动区基本没有绿化，导致了局部 LST 差异显著；其次是商业用地 LST 方差（1.39 ℃），商业用地大多处于城市道路与居住、行政等用地之间，LST 受道路等周边环境影响较大。不同的城市用地性质，具有不同的热环境效应[6]，某一类用地性质，其内部的功能安排和使用方式，也对 LST 有较大的影响。

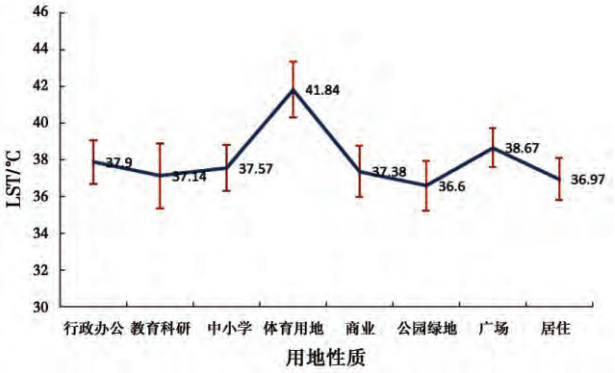


图 4　主要用地的平均 LST

Fig. 4　Mean land surface temperature of each main land use type

2.1.2　**建设强度和 LST 之间的相关性**　基于用地地块的统计结果见表 1。LST 与建设强度各指标均有显著的相关性。由于绿地植被具有显著的降温增湿功能，绿化率与 LST 之间呈现中等强度相关。然而，FAR 和 BD 作为衡量建设强度的重要的指标，与 LST 之间呈现较弱的负相关关系，这个结果似乎与人们的主观感受和认识不符。从霍华德发现城市热岛现象到 Oke 等人对城市热岛的研究，一直到当今人们对城市热岛的普遍理解是，热岛伴随城市而出现，在人口和建筑密度越大的地区，城市热岛越显著。而基于地块的统计发现，FAR 和 BD 并非与 LST 成正相关关系。事实上，FAR 和 BD 的计算依赖于地块面积，而城市建设用地的地块划分主要基于土地使用性质、权属边界、规划管理、道路，并兼顾自然地形和其他专项规划等多种因素，几乎完全是各类主观因素综合作用的结果。例如，用地性质和

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

面积完全相同的两个地块，空间区位不同，它们的FAR和BD可能有较大差异，从而导致了与LST的负相关关系。研究区内大多都是中低层建筑，相关研究表明，低层高密度城市肌理提供了更多的街巷空间以及建筑阴影，大大减少了底层建筑所接收的太阳辐射[29]。高层或超高层建筑往往导致地块的高容积率，高层建筑物之间容易形成峡谷效应，有利于局部空气流动，达到自然降温效果。建筑底面积和总建筑面积作为城市不透水下垫面多少的真实反映，其值越大，反映不透水面的比例越高，因感热交换和储热而引起的地表温度越高，与众多研究结果一致[19]。

表1 地块内建设强度与LST之间的相关性系数

Table 1 Correlation coefficients between urban construction index and LST on land patch scale

地块	地块数量	GR	FAR	BD	BBA	TCA
所有地块	375	−0.432**	−0.188**	−0.174**	0.175**	0.172**
居住地块	198	−0.420**	−0.232**	−0.334**	0.366**	0.342**
商业地块	43	−0.247	−0.171	0.202	0.174	0.070

注：** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)。

单独提取居住用地地块，统计建设强度指标与LST的相关性，其结果与整体统计的结果一致，LST与GR、FAR和BD之间均呈现显著的负相关，与BBA和TCA之间均呈现显著的正相关，与所有地块的统计结果基本一致。除了GR与LST之间仍然保持较显著的负相关外，其他的建设强度指标与LST之间的相关系数均显著，而且相关性有了明显增加。居住作为城市的最主要功能之一，其用地面积在城市建设用地中所占比重最大，与LST之间的相关性与上述总体统计结果一致。尽管居住用地的地块划分依然具有一定的人为主观性，但是居住用地的地块大小及其建设强度具有较好的一致性，因此，其建设强度与LST相关性优于总体相关性。而对商业用地的统计发现，各建设强度指标与LST之间没有显著的相关性，这可能缘于商业用地地块划分及其建设强度主要依赖于商业类型和商业区位，不同定位的商业用地其建设强度差异非常大，导致在统计上没有显著性。鉴于较强的人为主观因素影响，基于地块统计的建设强度指标与LST之间的相关性不强或不显著，FAR与LST之间显著的负相关性难以解释。因此，为了避免或减小地块划分人为主观性的影响，尝试使用规则网格替代地块进行统计分析。

2.2 基于网格的分析

基于反演所得到LST分辨率(30 m)，提取30 m×30 m网格内的LST，并计算网络内的TCA、BBA、GR，再用总建筑面积/网格面积得到FAR，用建筑底面积/网格面积得到网格内的BD。在网格尺度上，每个网格的面积是固定的，因而计算出来的FAR和TCA之间、BD和BBA之间的关系就具有一致性，故只需要分析LST与FAR、BD之间的相关性即可。

2.2.1 30 m网格取样分析 按照30 m网格统计，共有7 372对样本，LST与绿化率之间的相关性系数$r=-0.444$($p<0.01$)，相对于地块统计的相关性，有一定程度的增加。而LST与建筑密度的相关系数$r=0.073$($p<0.01$)、容积率$r=-0.042$($p<0.01$)之间的相关性关系虽然显著，但相关程度非常弱。这说明采用网格法进行数据采样，确实能避免一定人为因素的干扰影响，有利于保证数据的客观性与准确性。但基于像元的30 m网格采样由于尺度过小，网格内的建筑物不完整，加之采样点之间的空间自相关效应也存在，这些因素对统计结果的影响不可避免。为此，进一步增大网格面积，在多个网格尺度序列上进行统计分析。

2.2.2 网格尺度序列分析 参照有关研究成果[30]，按照120 m的尺度间隔逐渐增加网格尺度，形成11个尺度序列，在每个尺度上计算建设强度指标并提取LST平均值，得到相关性结果如图5。LST与各建设强度指标之间的相关性随采样网格的尺度增加而逐渐增强，并在840 m达到最大值，样本的数量由7 372对(30 m)下降到7对(2 120 m)，其后的相关性从1 560 m开始变的不显著。这个变化趋势表明，利用Landsat研究城市热岛或者热环境时，840 m可能是一个最佳尺度。

在所有的尺度序列中，BD和LST的相关性系数最大值为$r=0.684$($p<0.01$)，FAR和LST相关性系数最大值为$r=0.630$($p<0.01$)，并且BD与LST之间的相关系数始终大于FAR与LST之间的

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

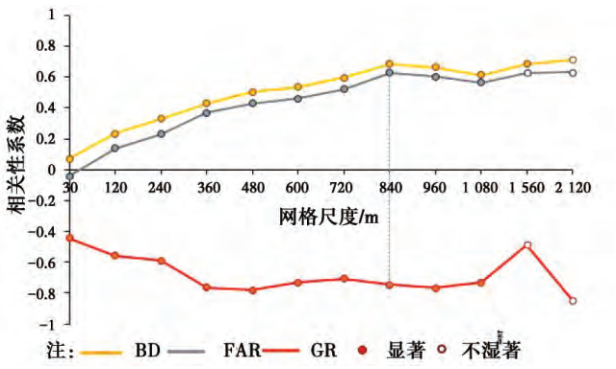


图 5　网格尺度序列上 LST 与建设强度指标之间的相关系数变化

Fig. 5　Trend of correlation coefficients between urban construction index and LST on regular grid scale series

相关性系数。GR 与 LST 之间的相关性系数在 360 m的尺度上已达到稳定值。事实上，建筑密度作为一个水平层面上的观测量，因接受太阳辐射而引起的 LST 变化是显著而直接的。而 FAR 作为一个空间垂直层面上的统计量，与 LST 的关系更多的是通过人为热（人口数量、能源消耗、经济）等非物质要素间接体现出来，因此，还涉及到建筑环境（通风、气候）。这也解释了相比 FAR，BD 与 LST 的相关性更强的原因。

为了进一步分析 LST 与城市建设强度指标之间的关系，在 840 m 的尺度上，利用 SPSS 的逐步回归方法建立多元回归模型，由于 BD 与 FAR 和 LST 的相关性高度一致，回归模型将 FAR 剔除，得到如下结果：

$$LST = 38.145 + 26.544 \times BD - 6.936 \times GR$$

回归模型的拟合优度 $R^2 = 0.677$，F 检验值为 23.711（$p < 0.05$）；回归系数 t 检验结果表明，系数均是显著的（$p < 0.01$）。通过比较模型的标准化系数，发现 BD 对 LST 的贡献大于绿化率。在绿化率 GR 不变的情况下，当建筑密度 BD 每增加 0.1 个单位（10%），LST 相应增加 2.7 ℃；反之，在建筑密度 BD 不变的情况下，当绿化率 GR 每增加 0.1 个单位（10%），LST 相应减少 0.69 ℃。这就说明，通过控制建筑密度比增加绿化所达到的降温效果更有效，在城市规划和建设管理中，需要结合实际情况以判断采取哪种措施减缓热岛更为有效。然而回归模型的拟合优度 R^2 仅为 0.677，不能达到理想的预测效果，这表明在对 LST 的影响因素中，除了建筑密度、绿化率外，还存在其他的影响因子，或者说 LST 与建设强度各指标之间可能是复杂的非线性关系。

2.3　基于建筑斑块的分析

尽管采用网格的方法可以较好的规避人为主观因素的影响。但提取出来的建设强度是网格内的建筑和地表的混合信息，鉴于下垫层面对 LST 显著影响，并且建筑体量是直接反映城市用地内建设强度的主要指标，也是城市热岛形成的主要物质要素，建筑斑块（边廓）可以更为直接地反映建设强度与 LST 间的关系。即在建筑斑块的尺度上，统计分析建筑层数、建筑面积与 LST 之间的对应关系。在基于建筑斑块尺度上提取 LST，由于大多建筑斑块面积较小，且 LST 的分辨率是 30 m，为了避免大量破碎化建筑斑块对数据的影响，对 1 000 m^2 以下的建筑斑块进行剔除，不参与统计分析。

2.3.1　建筑性质与 LST 之间的关系　建筑性质决定了建筑的使用类型，并影响了建筑的使用强度。在传统观念中，商业、办公等大体量且高强度使用的建筑会产生大量的人为热并导致其周围 LST 升高。然而统计数据表明，不同的建筑使用性质对 LST 并没有很大的影响（图 6）。尽管体育建筑和广场建筑的平均温度较高，但这主要是由于体育建筑多采用的钢结构等具有较大热储容的材料，而且体育、广场场地周围少有绿化。其他类型的建筑 LST 相差不大，相对建筑材料来说，由建筑性质引起的建筑使用强度和使用方式差异性对 LST 的影响比较有限。

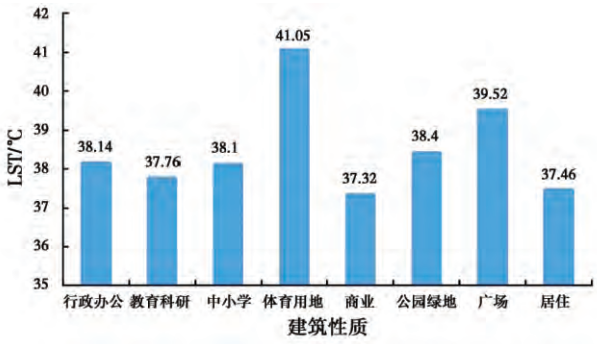


图 6　建筑性质与 LST 之间的关系

Fig. 6　Relationship between building type and LST

2.3.2　建筑层数、建筑面积与 LST 之间的关系　基于建筑斑块统计分析发现，LST 分别与 BF 和 TCA 之间均呈显著相关关系，其中与 TCA 之间的相关系数 $r = 0.188$（$p < 0.05$），与 BF 之间的相关系数为 $r = -0.282$（$p < 0.02$）。在建筑斑块的尺度

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

上，LST与BBA之间的相关性不显著。LST与BF之间呈现显著的负相关，即建筑层数越大(建筑高度越高)LST越小。相对于低层、高密度的城市空间形态，高层、低密度的城市形态为周围建筑提供了更多的建筑遮阴效果以及更高的天空开阔度，更大的开敞空间，为建筑周围空气流动提供了便利，使得建筑能够迅速散热[28]。另一方面，风速与地面距离呈一定的负相关关系，相对于建筑底层，建筑高层有更好的通风条件，并且受下垫层面的热环境影响更小[11]。

3 讨 论

3.1 3个尺度上LST与城市建设强度相关性的变化

LST作为直接的观测量，是城市物质和非物质要素在各种作用下综合表现出来的表面辐射温度，是客观存在的表征量。而地块作为城市规划建设与管理的基本空间单元，其边界、大小和形状尽管考虑了地形、水体等自然要素，但更多的是人为主观的考虑用地性质及空间配置、道路网络与功能区位以及地块的权属边界，并兼顾地块开发建设的难易性和管理的便利性以及其他经济因素，因此，地块的划分主要体现了社会性。基于此得到的容积率、建筑密度等开发强度指标具有很强的人为主观性。另一方面，容积率、总建筑面积作为垂直方向上的统计量，与LST的关系更多的是通过人为热量等非物质要素体现出来，受气候、地形、能源消耗等方面的影响较大。这就导致了统计分析中建筑密度、容积率与LST关系中的分析对象的差异性，最终使其与LST之间的相关关系变得不显著。

由于影响城市热岛的因素众多，与气候条件、地形条件、城市形态、城市性质都有关系，基于Landsat遥感影像，使用网格分析得到840 m最优的分析尺度，是否具有普适性，还需要进行多个城市的对比研究，从而得到通用的最佳研究尺度。

3.2 局部环境对LST的影响

从统计分析结果中可以发现，在局部范围内LST差异性显著，这说明在较小的尺度内，LST更容易受局部环境内水体、绿地、气流等方面的影响。研究区西、北被河流所环绕，东、南被山峦所阻隔，由于水体与绿地具有较好的降温效果，因而沿河带与沿山带用地内的LST相对来说均偏低。提取LST与土地覆盖/利用(LUCC)(图2)制作剖面图(见图7)发现，LST随地形起伏而变化，在城市中相对低凹的平坦地带，由于较高的城市建设强度以及较少的绿地，使得这一区域的LST明显要高于其他区域。此外，相对于道路周边高密度的建筑肌理，开阔的城市道路形成了通风廊道，有利于地表的散热，道路地段的LST有了一定程度的降低。因此，局部的绿化、建筑密度和高度组合、通风廊道的通畅化等方面的改造或优化，可以在一定程度上缓解城市热岛效应。

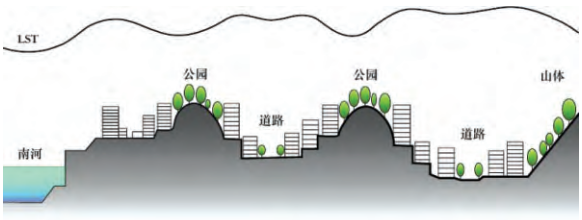


图7 LST随地形及环境变化

Fig. 7 LST trend with the topography and climate changes

3.3 人为活动对LST的影响

人为活动以多种形式影响着城市大气层，包括工业释放的污染物、汽车排放的尾气等，并直接或间接影响着城市热岛强度。人为排放的热量对高纬度寒冷地区的热岛效应影响最大，此外，夏季大量空调系统所排放的废热也对高密度城市中心区的热岛效应具有很大的促进作用。然而，人为热量的排放具有很大的时空性差异，并且受地形、气候、城市形态、经济等多种因素的影响[10]，使得城市热岛各影响因子之间的关系更加复杂化，这就需要在更小的尺度上，分季节、分时段地进行更深入的研究，以便在城市用地及功能布局上进行优化设计，减少人为热量排放，也是城市规划与设计的内容。

3.4 建筑材质差异对LST的影响

不同的建筑材质对太阳辐射的反射率有较大差异[31]，工业、体育、临时建筑等大多采用低反射率、高热储容材料，其表面的LST往往要高于其他类型建筑。绿化、水体等材料在居住建筑中运用的最多，因而，此类建筑周围的城市热岛效应有所减缓。屋顶绿化在重庆山地城市普遍存在，这也可能导致建筑底面积与LST之间的不相关。因此，有关屋顶绿化和墙面立体绿化的城市热岛的减缓效能是值得深入研究的一个重要方向。

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

4　结　论

缺少植被覆盖的不透水面具有较高的地表温度，不同的用地性质其平均 LST 有较大的差异。城市建设强度与城市热岛之间的关系并不完全符合人们传统的主观认识，即建设强度越大温度越高、城市热岛越强。建设强度指标与 LST 之间的相关性较为复杂，而且在不同空间尺度上表现出很大的差异。

1)在地块尺度上，总建筑面积、建筑底面积分别与 LST 呈现出显著的正相关，即建筑量越大，对应的 LST 越高。然而，由于地块的划分具有很强的人为主观性，导致建筑密度、容积率分别与 LST 之间呈现显著的负相关关系。

2)在多个网格尺度序列上，建筑密度、容积率与 LST 均呈现显著的正相关，而且相关程度随网格尺度的增加而逐渐增强，在 840 m 的网格尺度上其相关性系数达到最大值，网格尺度进一步增加，相关性下降。这为城市热岛研究提供了一个较为可靠的空间尺度选择。在所有网格尺度上，LST 与建筑密度之间的相关性系数要大于 LST 与容积率之间的相关性系数，说明建筑密度对热岛的贡献要大于容积率。在 840 m 网格尺度上所建立的多元线性回归模型($R^2=0.677$)尽管具有一定的解释和预测能力，但是还不足以表达影响城市热岛的各种因素的共同作用机制。

3)在建筑斑块的尺度上，LST 与总建筑面积之间是显著的正相关关系，与建筑层数之间是显著的负相关关系；相对于低层高密度的城市形态，高层低密度的建筑，可以提供更多的遮阴效果，同时，呈现更大的天空开阔度，从而有利于提高局部风速，加快散热。

在城市热岛研究中，空间尺度的选择是一个非常重要的前提，处于不同发展阶段的城市，最佳的研究尺度可能也不同，在不同的尺度上得到结论也有差异，甚至得到相反的结论，这正体现了城市热岛形成和演变的复杂性。城市建设强度作为城市规划、建设和管理中的重要指标，决定着城市下垫面被人为改造的程度，对城市热岛有显著的影响。其中，建筑密度的增温作用和绿化率的降温作用，对城市热岛的影响最为显著，因此，在城市规划中这两个指标应该重点考虑，并适当地优化组合，以便将可能的城市热岛降到最低。

参考文献：

[1] 国务院. 国家新型城镇化规划(2014—2020 年)[Z]. 2014.
Chinese Government. National new-type urbanisation plan (2014—2020) [Z]. 2014. (in Chinese)

[2] WANNER H, HERTIG J. Studies of urban climates and air pollution in Switzerland [J]. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23: 1614-1625.

[3] SUN R H, CHEN L D. How can urban water bodies designed for climate adaptation [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(1/2): 27-33.

[4] 韩贵锋，叶林，孙忠伟. 山地城市坡向对地表温度的影响-以重庆市主城区为例[J]. 生态学报, 2014,34(14): 4017-4024.
HAN G F, YE L, SUN Z W. Influence of aspect on land surface temperature in mountainous city: A case study in central area of Chongqing City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 4017-4024. (in Chinese)

[5] DOUSSET B G F. Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003,58(1):43-54.

[6] CHEN X L, ZHAO H M, LI P X, et al. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes [J]. Remote Sensing of Environment, 2006,104(2): 133-146.

[7] WONG M S, NICHOL J E, 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.

[8] WHITFORD V, ENNOS A R, HANDLEY J F. "City form and natural process"-indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK [J]. Landscape and Urban Planning, 2001, 57(2):91-103.

[9] 何晓凤，蒋维楣，陈燕，等. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 2007(1): 74-82.
HE X F, JIANG W M, CHEN Y, et al. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer [J]. Chinese

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

Journal of Geophysics, 2007, 50(1): 74-82. (in Chinese)

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

[11] 埃维特·埃雷尔, 戴维·珀尔穆特, 特里·威廉森. 城市小气候—建筑之间的空间设计[M]. 叶齐茂,倪晓晖. 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
EVYATAR E, DAVID P, TERENCE W. Urban microclimate: Designing the spaces between building [M]. YE Q M, NI X H. translate. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)

[12] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2012, 70(3):338-353.
SHOU Y X, ZHANG D L. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(3):338-353. (in Chinese)

[13] 郝兴宇,蔺银鼎,武小钢,等. 城市不同绿地垂直热力效应比较[J]. 生态学报, 2007, 27(2):685-692.
HAO X Y, LIN Y D, WU X G, et al. Vertical thermal characteristics analysis between different urban green land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2):685-692. (in Chinese)

[14] 吴菲,李树华,刘娇妹. 林下广场、无林广场和草坪的温湿度及人体舒适度[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2964-2971.
WU F, LI S H, LIU J M. The effects of greening none greening square and lawn on temperature humidity and human comfort [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2964-2971. (in Chinese)

[15] CHUN B, GULDMANN J M. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities [J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 125(SI):76-88.

[16] LI X M, ZHOU W Q, OUYANG Z Y, et al. Relationship between land surface temperature and spatial pattern of greenspace: What are the effects of spatial resolution [J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 114:1-8.

[17] MASSONV. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2000, 94(3):357-397.

[18] SONG J, DU S H, 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, 123:145-157.

[19] 武鹏飞,王茂军,张学霞. 基于归一化建筑指数的北京市城市热岛效应分布特征[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4):1325-1331.
WU P F, WANG M J, ZHANG X X. Distribution of urban heat island effects based on normalized difference built-up index in Beijing City [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(4):1325-1331. (in Chinese)

[20] GUO G H, WU Z F, XIAO R B, et al. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters [J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 135:1-10.

[21] 覃志豪, LI W J, ZHANG M H, et al. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003, 56(2): 37-43.
QIN Z H, LI W J, ZHANG M H, et al. Estimating of the essential atmospheric parameters of mono window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat TM6 [J]. Remote Sensing for Land Resources, 2003, 56(2):37-43. (in Chinese)

[22] 覃志豪, ZHANG M H, ARNON K, et al. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法[J]. 地理学报, 2001, 56(4):456-466.
QIN Z H, ZHANG M H, ARNON K, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456-466. (in Chinese)

[23] VOOGT J A O. Thermal remote sensing of urban climates [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 370-384.

[24] WAN Z M, DOZIER J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4):892-905.

[25] 徐涵秋. 新型 Landsat8 卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 741-747.
XU H Q. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satelite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3):741-747. (in Chinese)

[26] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演

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

算法对比[J]. **遥感学报**，2015，19(3)：451-464.
SONG T，DUAN Z，LIU J Z，et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat8 satellite [J]. Journal of Remote Sensing，2015，19(3)：451-464. (in Chinese)

[27] **邓书斌，陈秋锦，杜会建，等**. ENVI **遥感图像处理方法**[M]. **北京：科学出版社**，2014：422-424.
DENG S B，CHEN Q J，DU H J，et al. The method of remote sensing image processing using ENVI [M]. Beijing：Science Press，2014：422-424. (in Chinese)

[28] **王敏，孟浩，白杨，等. 上海市土地利用空间格局与地表温度关系研究**[J]. **生态环境学报**，2013，22(2)：343-350.
WANG M，MENG H，BAI Y，et al. Relationships between landscapes spatial pattern and land surface temperature in Shanghai [J]. Ecology and Environmental Sciences，2013，22(2)：343-350. (in Chinese)

[29] MIDDEL A，HÄB K，BRAZEL A J，et al. Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones [J]. Landscape and Urban Planning，2014，122：16-28.

[30] **韩贵锋，梁保平. 地表温度与植被指数相关性的空间尺度特征—以重庆市为例**[J]. **中国园林**，2011，27(1)：68-72.
HAN G F，LIANG B P. Spatial scale characteristics of correlation between land surface temperature and vegetation index-A case study of Chongqing City[J]. Chinese Landscape Architecture，2011，27(1)：68-72. (in Chinese)

[31] MEMON R A，LEUNG D Y，CHUNHO L. A review on the generation，determination and mitigation of urban heat island [J]. Journal of Environmental Sciences，2008，20(1)：120-128.

（**编辑　胡英奎**）

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