

引用格式: 林中立, 徐涵秋. 基于LCZ的城市热岛强度研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 713-722. [Lin Z L, Xu H Q. 2017. A study of urban heat island intensity based on local climate zones" Journal of Geo-information Science, 19(5): 713-722.] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00000

基于LCZ的城市热岛强度研究

林中立, 徐涵秋*

1. 福州大学 环境与资源学院, 福州 350116; 2. 福州大学 遥感信息工程研究所, 福州 350116; 3. 福建省水土流失遥感监测评估与灾害防治重点实验室, 福州 350116

A Study of Urban Heat Island Intensity Based on "Local Climate Zones"

LIN Zhongli and XU Hanqiu*

1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 2. Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China; 3. Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing Soil Erosion and Disaster Protection, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

Abstract: In the context of city expansion and raise of awareness of climate change, urban planners are looking for methods and tools to take the urban heat island (UHI) into account. Urban heat island intensity (UHII) is an important metric used in measuring UHI effect. Nevertheless, its quantitative measurement has not yet been clearly addressed. Due to the limitation of meteorological stations either in number or location, the traditional method of calculating the temperature difference between urban and rural areas based on the meteorological station data fails to accurately describe the UHII of a city. In order to solve this problem, a classification schema "Local Climate Zones" (LCZ) was proposed by Steward and Oke. Nowadays, the satellite remote sensing imagery is widely used to reveal urban heat island phenomenon. Therefore, this paper applied the new framework of LCZ to the study of UHII in Fuzhou City, located in the center of the Fuzhou basin, southeast China, using remote sensing technology. Fuzhou City has witnessed a rapid urban expansion since the late 1970s. The fast expansion of the city has caused severe UHI phenomenon in the city. Thus, it has become the top one furnace city in China. This study reveals that LCZ based on remote sensing technology can effectively distinguish the thermal contrasts among all LCZ classes. Such contrasts are governed largely by height and spacing of buildings, pervious surface fraction, trees density and soil wetness. In addition, the LCZ can fully disclose the distribution patterns of UHI. In this study, we revealed a $UHII_{LCZ}$ of 6.73°C for Fuzhou city on 27 September 2015, which indicates a significant UHI in the city.

Key words: urban heat island intensity; local climate zones; remote sensing; Fuzhou

***Corresponding author:** XU Hanqiu, E-mail: hxu@fzu.edu.cn

摘要 城市热岛强度是城市热岛研究和应用中的一个重要度量指标,但其科学计算一直是该研究的难点。目前常用的基于气象站的城乡温差算法,由于在代表城区与郊区温度的选择上存在困难,较难准确客观地计算热岛强度。为此,本文在LCZ分类体系的基础上,结合卫星遥感影像数据,将其应用于福州市的城市热岛研究中,以科学地计算城市热岛强度。研究表明,

收稿日期 2016-07-25;修回日期:2016-11-09.

基金项目 国家自然科学基金项目(41501469)。

作者简介 林中立(1989-),男,博士生,主要从事环境与资源遥感研究。E-mail: zhongli_lin@qq.com

*通讯作者 徐涵秋(1955-),男,江苏射阳人,教授,博士生导师,主要从事环境资源遥感应用研究。E-mail: hxu@fzu.edu.cn

采用分层分类和人工目视解译相结合的方法能较好地实现LCZ的遥感分类,并确定出分别代表城市和郊区的地表温度,据此计算得到2015年9月27日福州的城市热岛强度为6.73℃,热岛效应十分显著。进一步将分类结果与遥感地表温度影像叠加,可有效地区分各地类的热特性,全面反映城市热岛的分布状况。

关键词 城市热岛强度;LCZ;遥感;福州市

1 引言

当前,城市化进程正在全球范围内以前所未有的速度进行。据联合国(United Nations, UN)最新人口统计数据,2014年全球已有54%的人口居住在城市,预测到2050年,城市人口比例将达到66%^[1]。城市化给全世界带来繁荣和进步的同时,也给全球的生态环境带来了明显的负面影响,其中城市热岛效应表现尤为突出,已经引起了全球范围内的普遍关注^[2-5]。城市热岛(Urban Heat Island, UHI)是指城市气温高于郊区的现象^[6],而城郊之间的温度差就被称之为城市热岛强度(Urban Heat Island Intensity, UHII),它是刻画城市热岛程度的一个重要和最常用的指标。在以往的城市热岛研究中,很多城市热岛强度的计算方法无法进行科学地界定^[7]。由此可见,如何科学地表征城市热岛强度一直是城市热岛研究中的难点。目前,较为常用的评价方法是直接利用城乡温度差以衡量城市热岛强度^[8-11],也有一些学者利用城市建成区与建成区缓冲区的温度差值^[12-14],以及利用不同不透水面比例区域间的温度差值^[15],来估算城市热岛强度。但是这些计算方法面临的困难是如何客观选取能够分别代表城区和郊区的温度。同时,建立一个适用于不同城市间热岛定量化评价统一体系,也是当前研究中的一个重要课题^[7,16]。

鉴此,Stewart和Oke^[16]提出了一种基于局地气候区的分类体系(Local Climate Zones, LCZ),该分类体系旨在为城市热岛的研究提供一个适用于全球不同城市热岛强度比较的分类准则。目前,基于LCZ的城市热岛研究已在海外各城市逐渐开展^[17-20],Stewart等^[17]利用气象数据和LCZ体系分别对加拿大的温哥华(2008-2010年)、瑞典的乌普萨拉(1948-1949年)和日本的长野(2001-2002年)的城市热岛强度进行研究,结果显示,基于LCZ方法计算出这3个城市的城市热岛强度(记为:UHII_{LCZ})分别为6、3和1 K。Alexander和Mills^[18]对爱尔兰的都柏林2010年8-9月的城市热岛强度进行研究,结果表明,在理想的天气状况下UHII_{LCZ}为4.3~4.8 K。

Ng等^[19]研究得到新加坡2014年1-3月的UHII_{LCZ}为2.01℃。Lehnert等^[20]就捷克奥洛穆茨的14个气象站的LCZ类别划分进行了讨论。Bechtel等^[21]利用遥感影像分类技术,在全球范围内建立了各大城市的LCZ分类数据库,为利用遥感数据进行LCZ分类开创了先河。应用卫星遥感数据可以大大弥补基于有限地面气象站观测点在空间分布上的不足,实现对城市地表热岛空间分布的全面观测。

总的来看,LCZ是国际上新兴的一种城市热岛强度定量计算方法。它比简单地利用少量城郊气象站数据计算的城市热岛强度更为科学。目前,LCZ在国际上的应用已在逐渐增多,但在中国却还未曾有报道。因此,本文尝试将LCZ分类体系与卫星遥感数据相结合,应用于福建省会城市福州的城市热岛研究中,以期深入探究LCZ分类体系在城市热环境卫星遥感研究中的优势。

2 数据与方法

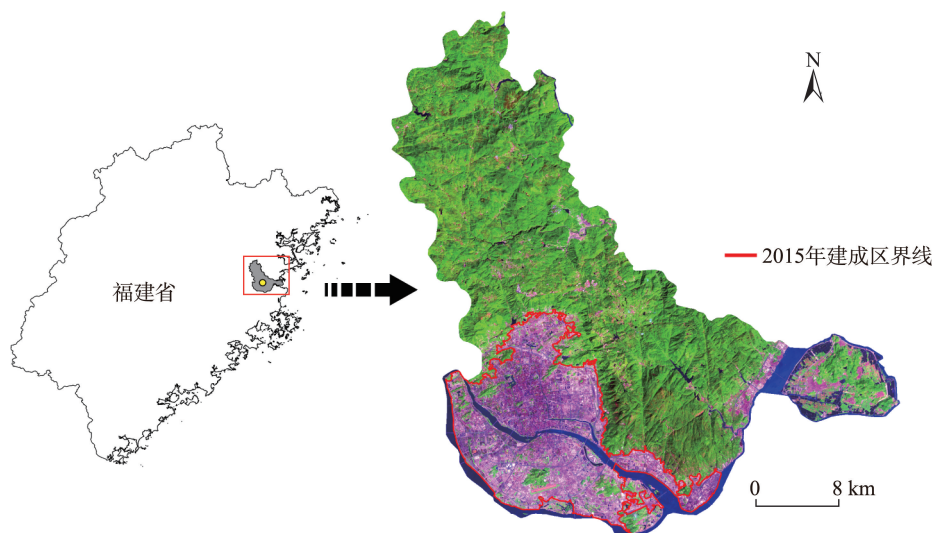
2.1 研究区与遥感数据

福州市位于福州盆地中心,四周被海拔600~1000 m的群山所环抱。福州属于亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,雨量充沛,年平均气温16~20℃,年平均降水量达900~2100 mm。近年来,福州因城市热岛效应严重,而被列为中国的新“火炉”之首^[22]。因此,福州市具有研究LCZ分类与UHII_{LCZ}的典型性。本文选择福州市的5个主要行政区(鼓楼、台江、仓山、晋安和马尾)作为研究区,总面积为1013.41 km²(图1)。

本文选用2015年9月27日过境的Landsat 8影像作为遥感影像数据源,为了减少地形、光照和大气等因素对光谱信息的影响,对影像进行辐射校正,将灰度值(DN)转换为传感器处反射率(at-sensor reflectance)^[23-25]。

2.2 LCZ分类体系

LCZ是一种基于局地气候理念的分类体系,它将区域气候按下垫面类型的不同,分为若干局地气候小区,然后分别从中选择出可代替城区的气候小



注:红色矩形框区域为本文研究区

图1 研究区位置及其Landsat 8影像(2015-09-27)

Fig. 1 Location of the study area and its Landsat 8 image (2015-09-27)

区和代表郊区的气候小区,通过计算出二者的温度差来表征城市热岛强度^[16,26]。LCZ分类体系由建筑类型和土地覆盖类型构成,在2个类型下又细分17个次级标准类,建筑类型包括LCZ 1~LCZ 10,土地覆盖类型包括LCZ A~LCZ G。由于气候变化、农业耕作和季节循环会引起土地覆盖特性的变化,因此土地覆盖类型又被赋予b、s、d、w等4种可变特性(表1)。

2.3 基于LCZ的遥感影像分类

为了能够准确地从Landsat 8影像中分出LCZ各类,本文借助同期Google Earth高分辨率影像,对研究区的LCZ类别进行鉴引。确定出研究区存在的13个LCZ类别,并在此基础上选取各类别的分类训练区(表2)。

由于LCZ是一种基于气象学的分类体系^[16],而遥感是以土地覆盖为基础的分类,因此很难用遥感方法来实现准确的LCZ分类。鉴此,本文采用分层分类法,先从遥感影像中分出基本大类(水体、植被、非植被),然后参考同期的Google Earth高分辨率影像,采用分层分类和人工目视解译相结合的方法来调试确定每一类别的最佳阈值,以区分出各LCZ类别。

分类流程如下:①首先构建修正归一化差值水体指数(MNDWI)^[27]、归一化差值植被指数(NDVI)^[28]、建筑用地指数(ABI)^[29]、归一化差值不透水面指数(NDISI)^[30]和裸土指数(BI)^[31],形成5个衍生指数波段,然后将其线性拉伸到0~255之间;②使用MNDWI指数区分出研究区的水体(LCZ G)与非水体;③

利用NDVI指数从非水体区中分出植被与非植被;④对于植被的各类别(茂密树木(LCZ A)、稀疏树木(LCZ B)、灌木和矮树(LCZ C)和低矮植被(LCZ D)),利用NDVI与BI指数的比值(图2)以及植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)^[32]来进一步区分;⑤对于非植被类型,利用原始波段与衍生指数波段的阈值组合,采用逐层判别和人工目视解译相结合的方法,依次分出大型低层建筑(LCZ 8)、工业厂房(LCZ 10)、裸土或沙(LCZ F)、开阔中层建筑(LCZ 5)、密集中层建筑(LCZ 2)、密集高层建筑(LCZ 1)、密集低层建筑(LCZ 3)、裸露的岩石或道路(LCZ E);⑥将以上各类与同期的Google Earth高分辨率影像逐类叠加,进行必要的人工修改。图3给出以上各步骤的流程图和分层分类法的阈值。

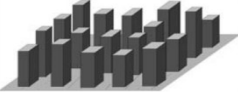
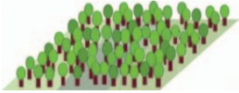

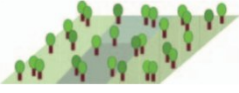

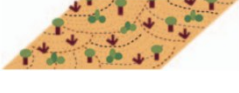

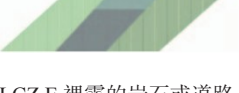


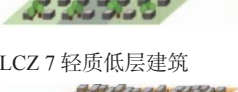





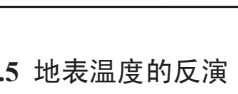
2.4 城市热岛强度计算

在Stewart和Oke^[16]的城市热岛强度(UHI_{LCZ})定义中,郊区的温度是以LCZ D(低矮植被类)的平均温度来代表,而城区的温度则必须在诸多的LCZ建筑类型中,选择其中的某一类来代表,通常是以占建成区面积比例最大的建筑类别来代表。然后计算郊区和城区类别之间的平均温度差来获得城市热岛强度 UHI_{LCZ} ,即:

$$UHI_{LCZ} = LST_{LCZ X} - LST_{LCZ D} \quad (1)$$

式中: $LST_{LCZ X}$ 为代表城区的LCZ建筑类型X的平均温度; $LST_{LCZ D}$ 为代表郊区的低矮植被类型的平均温度。

表1 LCZ分类体系^[16]
Tab. 1 Local climate zones scheme

建筑类型	定义	土地覆盖类型	定义
LCZ 1 密集高层建筑 	密集混合的高层建筑(10层以上);几乎无树木;不透水路面;建筑材料为混凝土、钢材、石头和玻璃	LCZ A 茂密树木 	茂密的落叶林和(或)常绿林;地表覆盖大量可透水面(低矮的植被);区域功能为天然林、苗圃林或城市公园
LCZ 2 密集中层建筑 	密集混合的中层建筑(3-9层);几乎无树木;不透水路面;建筑材料为石头、砖、瓦片和混凝土	LCZ B 稀疏树木 	稀疏的落叶林和(或)常绿林;地表覆盖大量可透水面(低矮的植被);区域功能为天然林、苗圃林或城市公园
LCZ 3 密集低层建筑 	密集混合的低层建筑(1-3层);几乎无树木;不透水路面;建筑材料为石头、砖、瓦片和混凝土	LCZ C 灌木和矮树 	开阔分布的灌木、矮树丛和矮小的树木;地表覆盖大量可透水面(裸土或沙);区域功能为天然灌木林地或农用地
LCZ 4 开阔高层建筑 	开阔分布的高层建筑(10层以上);地表覆盖大量可透水面(低矮的植被、稀疏的树木);建筑材料为混凝土、钢材、石头和玻璃	LCZ D 低矮植被 	草地或草本植物/作物。几乎无树木;区域功能为草地、农用地或城市公园
LCZ 5 开阔中层建筑 	开阔分布的中层建筑(3-9层);地表覆盖大量可透水面(低矮的植被、稀疏的树木);建筑材料为混凝土、钢材、石头和玻璃	LCZ E 裸露的岩石或道路 	岩石或不透水路;几乎无植被;区域功能为天然荒漠(岩石)或城市交通运输干道
LCZ 6 开阔低层建筑 	开阔分布的低层建筑(1-3层);地表覆盖大量可透水面(低矮的植被、稀疏的树木);建筑材料为木头、砖、石头、瓦片和混凝土	LCZ F 裸土或沙 	土或沙;几乎无植被;区域功能为天然沙漠或农用地
LCZ 7 轻质低层建筑 	密集混合的单层建筑;几乎无树木;夯实的土质路面;轻质建筑材料(木头、茅草和波纹状板材)	LCZ G 水体 	大面积开阔的水体,如海和湖;或小面积水体,如河、水库和池塘
LCZ 8 大型低层建筑 	开阔分布的低层大型建筑(1-3层);几乎无树木;不透水道面;建筑材料为钢材、混凝土、金属和石头	土地覆盖的可变特性 (因气候变化,农业耕作和季节循环所引起的土地覆盖特性的变化)	
LCZ 9 零散建筑 	自然环境中零散的中、小型建筑;地表覆盖大量可透水面(低矮的植被、稀疏的树木)	b 光秃的树木	冬季少叶落叶林
LCZ 10 工业厂房 	中低层工业建筑(塔、贮水池、堆积物);几乎无树木;不透水路面或夯实的土质路面;建筑材料为金属、钢材和混凝土	s 积雪覆盖	积雪覆盖厚度大于10 cm
		d 干燥地表	焦土(如火烧迹地)
		w 湿润地表	浸水土壤

2.5 地表温度的反演

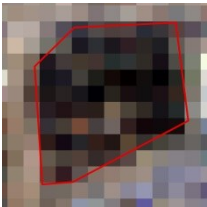



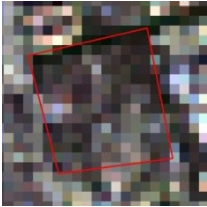

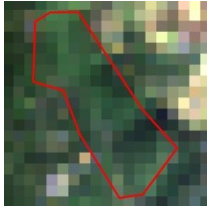





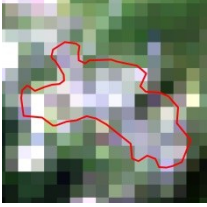



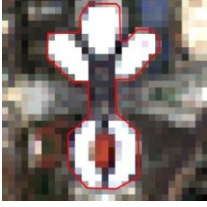






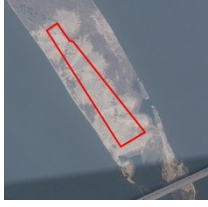


Landsat 8 卫星的热红外传感器(TIRS)具有2个热红外波段(10、11波段),但由于TIRS 11波段的定标参数尚不稳定,因此,USGS暂不鼓励使用劈窗算法,而建议采用TIRS 10波段以类似TM/ETM+的单波段方法来计算地表温度^[25,33-34]。因此,本文选用

TIRS 10波段来计 Landsat 8 的地表温度,算法采用 Jiménez-Muñoz 和 Sobrino 的单通道算法^[35-36],计算公式如下:

$$LST = \gamma [\varepsilon^{-1} (\psi_1 L_{\text{sensor}} + \psi_2) + \psi_3] + \delta \quad (2)$$

式中: L_{sensor} 为传感器辐射值($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); ψ_1 、

表2 研究区主要LCZ类别 Landsat 8与 Google Earth 影像对照
Tab. 2 LCZ identification based on Landsat 8 and Google Earth images

Landsat 8影像	Google Earth影像	Landsat 8影像	Google Earth影像
LCZ 1 密集高层建筑		LCZ A 茂密树木	
			
LCZ 2 密集中层建筑		LCZ B 稀疏树木	
			
LCZ 3 密集低层建筑		LCZ C 灌木和矮树	
			
LCZ 5 开阔中层建筑		LCZ D 低矮植被	
			
LCZ 8 大型低层建筑		LCZ E 道路	
			
LCZ 10 工业厂房		LCZ F 裸土或沙	
			
		LCZ G 水体	
			

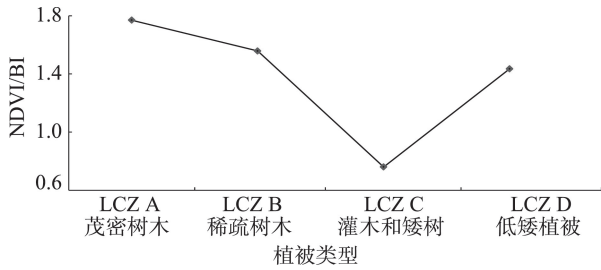


图2 LCZ植被类型NDVI/BI光谱特征曲线

Fig. 2 Spectral signatures of NDVI/BI of LCZ vegetation types

ψ_2 、 ψ_3 是通过大气水汽含量计算的大气参数,可以从文献[35]、[36]中计算获得; γ 和 δ 是基于 Planck 函数的 2 个参数,计算公式为:

$$\gamma \approx T_{\text{sensor}}^2 / (b_{\gamma} L_{\text{sensor}}) \quad (3)$$

$$\delta \approx T_{\text{sensor}} - T_{\text{sensor}}^2 / b_{\gamma} \quad (4)$$

其中:

$$T_{\text{sensor}} = \frac{c_2}{\lambda \ln[c_1 / (\lambda^5 L_{\text{sensor}}) + 1]} \quad (5)$$

式中: T_{sensor} 为传感器处亮度温度值(K); λ 为热红外波段的中心波长或有效作用波长(μm); c_1 、 c_2 是

Planck 辐射常数,分别为 $1.19104 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 和 $14387.7 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; b_{γ} 是算法系数,Landsat 8 第 10 波段的 $b_{\gamma}=1324 \text{ K}$ [37]; ε 是地表比辐射率,可采用文献[34]的方法估算 Landsat 8 第 10 波段的 ε 。对所得反演结果与地面气象站实测的地表温度进行验证,误差为 $0.35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 结果与讨论

3.1 结果分析

根据图 3 的分类流程,获得了研究区 LCZ 分类结果图(图 4),并对分类结果进行统计(表 3)。精度验证利用同期 Google Earth 影像,采用随机采样法,选出了 1200 个验证点,验证得到的分类总精度为 82.92%,Kappa 系数为 0.806(附表 A),满足精度要求。

从图 4 和表 3 可以看出,研究区范围内,LCZ A (茂密树木)所占的比例面积最大,为 53.92% (546.41 km^2),LCZ B (稀疏树木)次之,为 7.72% (78.22 km^2),但城市建成区内成片树木分布十分缺

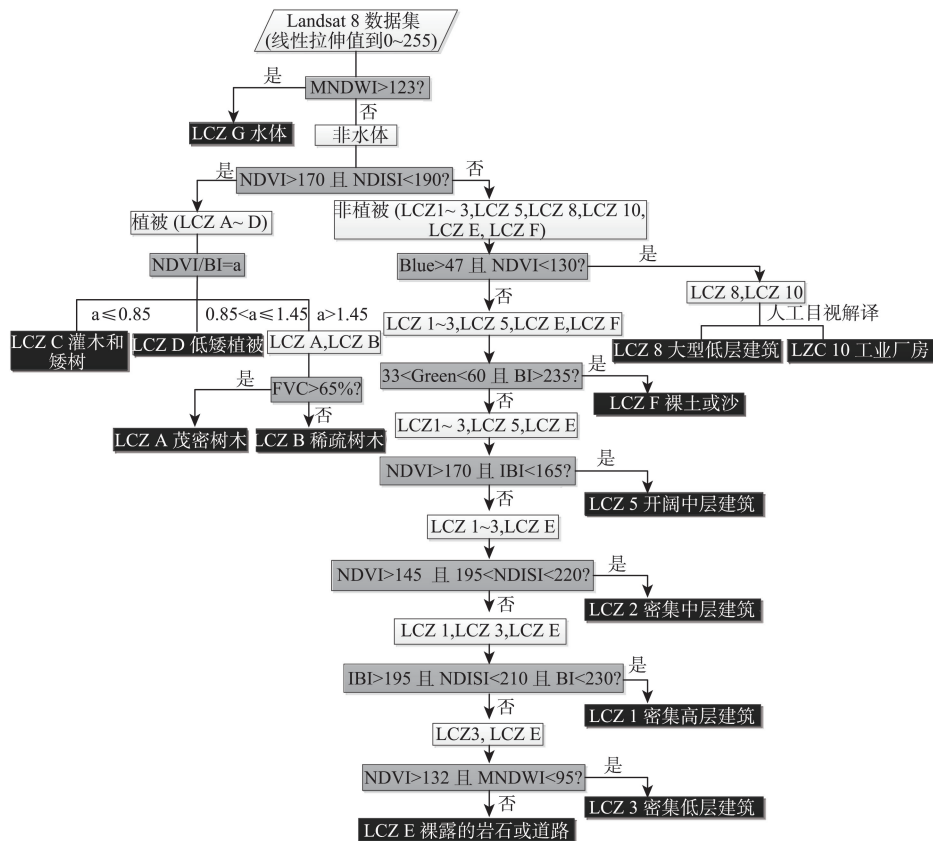


图3 LCZ遥感分层分类流程图

Fig. 3 Flow chart of the hierarchical classification of LCZ

乏。建筑类型以LCZ 2(密集中层建筑)所占比例最大,为6.71%,面积为68.01 km²,LCZ 3(密集低层建筑)以5.19%(52.62 km²)次之,说明研究区的建筑类型以中、低层为主,且多为密集的连接建筑。

将LCZ分类图与反演获得的LST影像叠加,统计得到各类LCZ的平均地表温度(表3),其中代表郊区的LCZ D的平均温度为32.94℃。为了客观地从6个LCZ建筑类型中选择出代表城区温度的类别,将城市建成区(图1)范围内的LCZ分类图进行面积统计。从表3可得,福州市建成区以密集中层建筑

类(LCZ 2)所占比例面积最大,为27.86%(64.44 km²),因此可选择LCZ 2的平均温度(39.67℃)代表城区温度,然后与代表郊区的LCZ D的平均温度相减,由此获得福州的城市热岛强度,即:

$$UHII_{LCZ} = LST_{LCZ2} - LST_{LCZD} \tag{6}$$

以上结果表明,福州市的城市热岛强度高达6.73℃,城市热岛效应十分显著。

3.2 讨论

城市热岛强度是指城郊之间温度差,其计算方法简单,即把城市的温度减去郊区的温度就可以求得城市热岛强度。但是如何科学地确定城市、郊区的温度却是一个长期困惑业界的问题。传统的方法是将位于城市气象站的温度减去位于郊区气象站的温度来获得城市热岛强度^[8,10]。但在中国实施起来有一定的难度,原因之一是中国大部分城市气象站少,而且几乎都不设在郊区,因此无法获得郊区的温度。例如,福州市没有郊区气象站,所以无法按这一方法计算热岛强度。另一原因是即使有郊区气象站,但由于近年的城市扩展,这些气象站现在也都位于城区之内,无法代表郊区温度,因此传统计算城市热岛强度的方法现在几乎不可行。当前常用的是将城市建成区的平均温度减去郊区的平均温度来确定城市热岛强度,但是如何确定城市的平均温度,特别是如何确定郊区的平均温度也缺乏一种科学的方法,其确定往往因人而异,其结

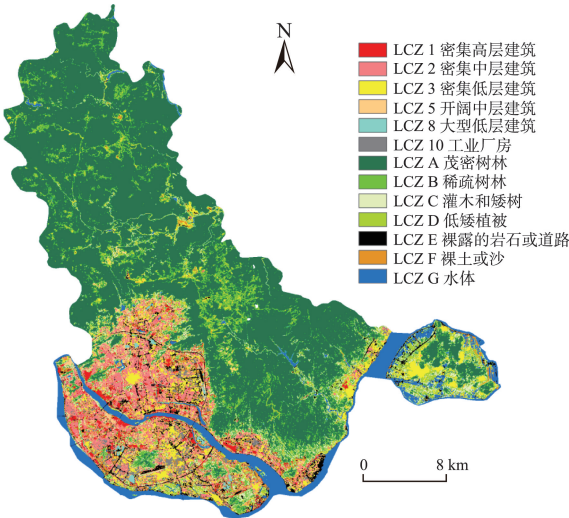


图4 研究区LCZ分类结果图
Fig. 4 LCZ classification image of the study area

表3 LCZ分类结果统计
Tab. 3 Statistics of LCZ classification results

LCZ类型	研究区范围			建成区范围	
	面积/km ²	比例/%	LST/℃	面积/km ²	比例/%
LCZ 1 密集高层建筑	21.29	2.10	37.38	19.48	8.42
LCZ 2 密集中层建筑	68.01	6.71	39.67	64.44	27.86
LCZ 3 密集低层建筑	52.62	5.19	39.23	33.52	14.49
LCZ 5 开阔中层建筑	21.88	2.16	37.89	19.24	8.32
LCZ 8 大型低层建筑	2.23	0.22	42.45	2.23	0.96
LCZ 10 工业厂房	16.79	1.66	41.82	15.14	6.54
LCZ A 茂密树木	546.41	53.92	28.24	4.61	1.99
LCZ B 稀疏树木	78.22	7.72	28.64	6.31	2.73
LCZ C 灌木和矮树	53.55	5.28	32.72	15.45	6.68
LCZ D 低矮植被	44.52	4.39	32.94	8.61	3.72
LCZ E 裸露的岩石或道路	30.47	3.01	39.23	22.33	9.65
LCZ F 裸土或沙	14.66	1.45	37.96	9.38	4.06
LCZ G 水体	62.76	6.19	29.05	10.56	4.57
合计	1013.41	100.00	—	231.33	100.00

果带有很大的主观性,也无法相互对比。以遥感方法为例,通常以城市建成区的边界外推一定距离的缓冲区范围作为郊区,然后以其平均温度作为郊区温度来求出热岛强度^[12-14]。以福州市为例,本次分别以2、4、6 km为距离,设定了3个缓冲区,分别计算它们的平均温度作为郊区温度,然后与福州建成区的平均温度相减,获得了3个城市热岛强度值,分别为7.8、8.8和9.2℃。显然缓冲区距离的设定直接影响了热岛强度的计算,使其结果带有很大的主观性,难以对比。如果将以上计算结果与本文用LCZ方法求出的热岛强度值6.7℃对比,只有2 km缓冲区的热岛强度计算结果最为接近,但仍有1.1℃之差。由于LCZ方法的城郊温度是依靠分类结果来客观确定,不带有主观因素,因此其计算结果客观可靠,且便于不同城市或同一城市不同年份之间的对比,已成为当前欧洲以及世界很多城市普遍采用的热岛强度计算方法^[17-20]。

4 结论

LCZ分类体系能根据城市建筑表面结构、材质与土地覆盖类型对各地类的热特性进行有效地区分,为城市热岛的研究提供了一个适用于全球不同城市热岛强度比较的分类准则。利用城乡LCZ类别间的温度差代替传统的城乡温度差可以对城市间的热岛强度进行科学地定量化计算。本文基于LCZ分类体系,实现了LCZ与卫星遥感数据的结合,弥补了有限的地面观测点在空间分布上的不足,由此计算出的城市热岛强度(UHI_{LCZ})可以更客观、准确地评价城市热岛效应的状况。

将LCZ分类体系应用于福州市的热岛研究,分别得到代表城区的LCZ 2和代表郊区的LCZ D的平均地表温度,二者的温度差为6.73℃,表明2015年9月27日福州的热岛强度为6.73℃,反映了福州城市热岛效应十分显著,改善城市热环境,缓解城市热岛效应已迫在眉睫。

参考文献(References):

- [1] United Nations. World urbanization prospects: the 2014 revision[M]. Population Division, Department of Economic and Social Affairs, New York, 2015.
- [2] Georgescu M, Moustaoui M, Mahalov A, et al. Summer-time climate impacts of projected megapolitan expansion in Arizona[J]. *Nature Climate Change*, 2013,3(1):37-41.
- [3] Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009,64(4):335-344.
- [4] 张艳,鲍文杰,余琦,等.超大城市热岛效应的季节变化特征及其年际差异[J]. *地球物理学报*, 2012,55(4):1121-1128. [Zhang Y, Bao W J, Yu Q, et al. Study on seasonal variations of the urban heat island and its interannual changes in a typical Chinese megacity[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012,55(4):1121-1128.]
- [5] 徐涵秋.基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析[J]. *生态学报*, 2011,31(14):3890-3901. [Xu H Q. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(14):3890-3901.]
- [6] Mnaley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958,84:70-72.
- [7] 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.
- [8] Zhao L, Lee X, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands[J]. *Nature*, 2014,511(7508):216-219.
- [9] Zhou D, Zhao S, Liu S, et al. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014,152:51-61.
- [10] 王郁,胡非.近10年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究[J]. *地球物理学报*, 2006,49(1):61-68. [Wang Y, Hu F. Variations of the urban heat island in summer of the recent 10 years over Beijing and its environment effect[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1):61-68.]
- [11] 许辉熙.成都平原中等城市的热岛效应动态特征对比研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2015,38(1):13-19. [Xu H X. Comparison on dynamic characteristics of urban heat island effects in medium - sized cities in Chengdu Plain [J]. *Geomatics and spatial information technology*, 2015, 38(1):13-19.]
- [12] Peng S, Piao S, Ciaia P, et al. Surface urban heat island across 419 global big cities[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012,46(2):696-703.
- [13] Zhou B, Rybski D, Kropp J P. On the statistics of urban heat island intensity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013,40(20):5486-5491.
- [14] Tan M, Li X. Quantifying the effects of settlement size on urban heat islands in fairly uniform geographic areas[J]. *Habitat International*, 2015,49(4):100-106.

- [15] Imhoff M L, Zhang P, Wolfe R E, et al. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(3):504-513.
- [16] 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.
- [17] Stewart I D, Oke T R, Krayenhoff 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.
- [18] Alexander P J, Mills G. Local climate classification and Dublin's urban heat island[J]. *Atmosphere*, 2014,5(4):755-774.
- [19] Ng Y X Y, Chua L H C, Irvine K N. A study of urban heat island using "local climate zones" - the case of Singapore [J]. *British Journal of Environment and Climate Change*, 2015,5(2):116-133.
- [20] Lehnert M, Geletič J, Husák J, et al. Urban field classification by "local climate zones" in a medium-sized Central European city: The case of Olomouc (Czech Republic)[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2015,122:531-541.
- [21] Bechtel B, Alexander P J, Böhner J, et al. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015,4(1):199-219.
- [22] 天气网.四大火炉新排名福州居首[N/OL]. 2014. <http://fuzhou.tianqi.com/news/26867.html>.
- [23] Chander G, Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003,41(11):2674-2677.
- [24] Chavez P S. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996,62(9):1025-1035.
- [25] USGS. Landsat 8 (L8) Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)[OL]. http://landsat.usgs.gov/calibration_notices.php, 2013.
- [26] Stewart I D, Oke T R. Newly developed "thermal climate zones" for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer[C]//Eighth Symposium on Urban Environment, Phoenix, AZ, 2009.
- [27] Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006,27(14):3025-3033.
- [28] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[C]//Proceedings of the Third ERTS Symposium, Nasa SP-351, Washington DC, USA, 1973,1:309-317.
- [29] Xu H. Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematic-oriented index combination technique[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007,73(12):1381-1391.
- [30] Xu H Q. Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI) [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010,76(5):557-565.
- [31] Rikimaru A. Landsat TM data processing guide for forest canopy density mapping and monitoring model[C]//International Tropical Timber Organization (ITTO) workshop on utilization of remote sensing in site assessment and planning for rehabilitation of logged-over forest, Bangkok, Thailand, 1996:1-8.
- [32] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997,62(3):241-252.
- [33] 徐涵秋,林中立,潘卫华.单通道算法地表温度反演的若干问题讨论——以 Landsat 系列数据为例[J].*武汉大学学报·信息科学版*, 2015,40(4):487-492. [Xu H Q, Lin Z L, Pan W H. Some issues in land surface temperature retrieval of Landsat thermal data with the single-channel algorithm[J]. *Geomatics and information science of Wuhan University*, 1997,62(3):241-252.]
- [34] 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 the land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015,58(3):741-747.]
- [35] Jiménez-Muñoz J C, Cristóbal J, Sobrino J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009,47(1):339-349.
- [36] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003,108(D22):4688, doi: 10.1029/2003JD003480.
- [37] Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A, Skokovic D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014,11(10):1840-1843.

		验证数据														
LCZ类型		1	2	3	5	8	10	A	B	C	D	E	F	G	行合计	使用者精度/%
分类数据	1	84	9	0	0	1	1	0	0	0	1	4	0	15	115	73.04
	2	8	173	9	4	0	3	0	0	3	0	9	1	0	210	82.38
	3	1	15	88	0	2	4	0	1	0	0	4	6	0	121	72.73
	5	1	12	0	39	0	2	0	0	2	1	1	1	0	59	66.10
	8	0	0	0	1	13	0	0	0	0	0	0	0	0	14	92.86
	10	0	4	5	0	0	34	0	0	0	0	2	0	0	45	75.56
	A	0	0	0	0	0	0	236	14	4	0	0	0	0	254	92.91
	B	0	0	0	0	0	0	4	29	8	1	0	0	0	42	69.05
	C	1	0	0	4	0	0	0	4	52	2	0	2	3	68	76.47
	D	2	0	0	0	0	0	0	1	2	37	0	0	1	43	86.05
	E	0	4	0	0	0	0	0	0	2	0	40	5	0	51	78.43
	F	0	2	2	0	0	3	0	0	0	0	0	28	0	35	80.00
G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	142	143	99.30	
列合计		97	219	104	48	16	47	240	49	73	42	61	43	161	1200	
生产者精度/%		86.60	79.00	84.62	81.25	81.25	72.34	98.33	59.18	71.23	88.10	65.57	65.12	88.20		
总精度/%																82.93
Kappa系数																0.806