

引用格式: 陈冰倩, 张友水, 程璟媛, 等. 福州市地表温度热点及时空变化分析[J]. 地球信息科学, 2019, 21(5): 710-719. [Chen B Q, Zhang Y S, Cheng J Y, et al. The hot spot and spatiotemporal changes of the land surface temperature in Fuzhou[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(5): 710-719.] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180597

福州市地表温度热点及时空变化分析

陈冰倩^{1,2}, 张友水^{1,2*}, 程璟媛^{1,2}, 赵 雪¹

1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

The Hot Spot and Spatiotemporal Changes of the Land Surface Temperature in Fuzhou

CHEN Bingqian^{1,2}, ZHANG Youshui^{1,2*}, CHEN Jingyuan^{1,2}, ZHAO Xue¹

1. Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Fujian Normal University, Institute of Geography, Fuzhou 350007, China

Abstract: As the largest developing country in the world, China has witnessed rapid urbanization in the recent years. A large amount of natural land surface has been transformed into artificial land surface, leading to a series of environmental problems, among which the most prominent is urban heat island. Therefore, how to mitigate the urban heat island effect caused by the acceleration of urbanization process has become a hot research direction. To accurately analyze the influence of urban spatial pattern on thermal concentration, this article used two periods of remote sensing imagery, Landsat ETM+ on May 4, 2000 and Landsat OLI on July 27, 2016, to obtain the land cover information of Fuzhou and verified the accuracy. The hot spot analysis of the retrieved land surface temperature (LST) and impervious surface area (ISA) of Fuzhou were used to study the change characteristics, spatial concentration characteristics, and scale effect of LST in the past sixteen years of urbanization. The hot spot results show the following two findings. (1) The spatial thermal concentration could be better illustrated through analyzing the relationship between the distance from city center and LST. In 2000, the urban heat island effect was significant within a 1.03 km distance from the city center; however, in 2016 the distance increased to 2.1 km and the number of hot spots increased from three to five. During this period, the hot concentrated area (the hot and less hot areas) also increased from 15.7% to 47.3%. (2) Compared with other spatial autocorrelation analysis methods, Getis-Ord Gi* can help more directly analyze the impact of land cover change on LST and understand the details of the change of urban internal thermal intensity, because the formation of hot and cold spots depends on not only the level of LST. The hot spot method adopted in this study can be used for urban environmental protection and planning, and can also be used as a basis for urban land planning and thermal environmental impact analysis in the future. Meanwhile, the hot spot chart can be used to simulate urban microclimate and estimate the cooling effect of urban green space. In addition, comparative analyses of more multi-temporal and different cities can be further discussed in the future, especially studies on different types of cities, such as strip cities, polycentric cities and central cities.

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2019-02-21.

基金项目: 福建省公益类科研院所专项(2019R1102); 福建省自然科学基金项目(2018J01739). [Foundation items: Public Welfare Research Institutes of Fujian Province, No. 2019R1102; Natural Science Foundation of Fujian Province, No. 2018J01739.]

作者简介: 陈冰倩(1994-), 女, 福建福州人, 硕士生, 主要研究方向为热红外遥感、图像分析研究. E-mail: bingqianvip@163.com

*通讯作者: 张友水(1974-), 男, 安徽含山人, 教授, 主要研究方向为遥感与地理信息系统应用. E-mail: yzha5553@163.com

Key words: land surface temperature retrieval; imperious surface area; mixed pixel decomposition; hot spot analysis; heat island effect; Fuzhou City

***Corresponding author:** ZHANG Youshui, E-mail: yzha5553@163.com

摘要:中国作为世界第一大发展中国家,近年来城镇化发展迅速,大量自然地表转化为人工地表,从而引起了一系列环境问题,其中以城市热岛问题最为显著。因此如何缓解因城市化进程的加快引起的城市热岛效应已成为热门研究方向。为精确分析城市空间格局对热集聚的影响,本研究利用2000年5月4日的Landsat ETM+和2016年7月27日获取的Landsat OLI两期遥感影像,获取福州市的土地覆盖信息并进行精度验证。在地表温度(Land Surface Temperature, LST)反演基础上通过热点分析(Getis-Ord G_i^*),并结合不透水面(Imperious Surface Area, ISA)信息来研究城市化进程中福州市16年来LST的变化特性,空间集聚特性及其产生的尺度效应。热点分析结果显示:①通过分析福州市内各地和热点中心的距离与LST的关系可较好地反映空间热集聚。2000年在距热点中心0.97、1.03、0.95 km范围内热集聚明显;2016年则增长到分别在距热点中心半径1.89、2.01、2.10、2.05、2.13 km范围内热集聚显著且热点区数量也从3个增加至5个。热集聚区(热点区和较热区)总面积在此期间从15.7%增至47.3%;②由于热点图中的热点区和冷点区的形成不单取决于LST的高低,因此热点分析与空间自相关分析方法相比,能更直观地分析土地覆盖变化对LST的影响,了解城市内部热强度变化的细节。本研究采用的热点分析方法可用于城市环境保护与规划,将来还可作为城市土地规划与热环境影响的分析依据。同时可利用热点分析图模拟城市微气候,估算城市绿地降温程度等。此外,未来还可基于此进一步探讨更多时相以及不同城市的对比分析,特别是对不同城市类型如带状城市,多中心城市及中心城市等的研究。

关键词:温度反演;不透水面;混合像元分解;热点分析;热岛效应;福州市

1 引言

随着城市扩张造成土地覆盖类型的变化,以植被覆盖为主的自然景观被不透水面(Imperious Surface Area, ISA)所替代。这一变化造成的负面影响之一是增强了城市热岛效应^[1]。热岛效应不仅增加了城市能源消耗,也严重影响了城市环境质量,危害到人类的健康^[2]。而通过探究LST空间分布和变化可有效分析城市土地覆盖变化带来的热岛效应^[3-5]。因此,分析LST的时空变化情况可进而探讨城市化带来的热环境影响^[6]。

国内外学者通常采用空间自相关分析与ISA和植被覆盖指数(Normal Differential Vegetation Index, NDVI)等结合探究城市土地覆盖对LST的影响。例如,江颖慧等^[7]基于LST利用Moran's I指数(Local Moran's I Index)分析其与NDVI的空间相关性,进而对LST定性研究;Jun-Hyun等^[8]将住宅间ISA和植被覆盖度结合空间自相关分析研究景观格局变化对LST的影响,进而探讨如何缓解城市热岛效应。也有学者利用Moran's I指数等空间分析手段与其他分析指标结合对LST进行研究。例如,Zheng等^[9]在LST的基础上,利用Moran's I指数研究建筑物的组成和空间格局对美国亚利桑那州的热集聚影响;。纵观国内外参看文献,很少有学者将LST和热点分析结合,研究城市LST的热集聚变化进而分析城市土地覆盖变化带来的热环境影

响。例如,Feyisa等^[10]通过热点分析比较城市中心与郊区间LST差异。与Moran's I指数等空间自相关分析方法相比,基于LST的热点分析中的高值(低值)依赖于区域内相邻点的高值(低值)。因此热点分析对空间关系(高值(低值)的聚集或分散)的敏感度更高,能更准确直观的地表示出LST聚集情况。且相较于其他基于LST的热点分析研究,本研究还分析了热集聚区内各点与城市中心的距离的关系及各点与土地覆盖类型的关系。为了更精确分析城市土地覆盖模式变化对城市热集聚的影响,本文利用两期遥感影像,获取福州市的土地覆盖信息并进行精度验证,之后在LST反演基础上通过热点分析,结合不透水面盖度(Imperious Surface Coverage, ISC)信息探究福州市16年来城市化过程中LST的时空变化和空间集聚特性。

2 研究区概况、数据源与研究方法

2.1 研究区概况

福州市地处福建省东部,最为中国较早开放的沿海城市之一。本次研究区范围以其中心城区为主(119°11' E-119°26' E, 25°64' N-26°10' N),主要包括鼓楼区、台江区、仓山区、晋安区和马尾区。福州市地貌以山地丘陵为主,地势从西北向东南倾斜,从中山逐步降为低山、丘陵、台地,终到沿海平原。福州市是最典型的河口盆地,城区位于盆区中

央。因地形闭塞,不利于气流流动,热岛效应明显。近二十年来,福州市加快了城市化的步伐,导致土地覆盖类型的明显变化和城市热岛面积的扩大。根据各城市夏季炎热程度对比,福州市已连续几年成为全国三大火炉之一(<http://www.txqs8.com/dazahui/2017-07-13/3194.html>),因此选择福州市来分析城市土地覆盖及其变化与LST关系的研究具有代表性意义。

2.2 数据源

本研究采用福州市2000年5月4日的Landsat ETM+和2016年7月27日获取的Landsat OLI遥感影像。可见光近红外波段的空间分辨率为30 m, ETM+和OLI的热红外波段的空间分辨率分别为60 m和100 m。此外,还利用2000年和2016年的google影像对Landsat ETM+/OLI分类精度进行验证。所有影像数据均基于通用横轴墨卡托(Universal Transverse Mercator, UTM)坐标系统。Landsat数据以Google Earth影像为基准进行配准,误差控制在0.5个像元(15 m)以内。图1为福州市2016年7月27日假彩色合成的Landsat OLI影像以及精度评估的测试区位置。

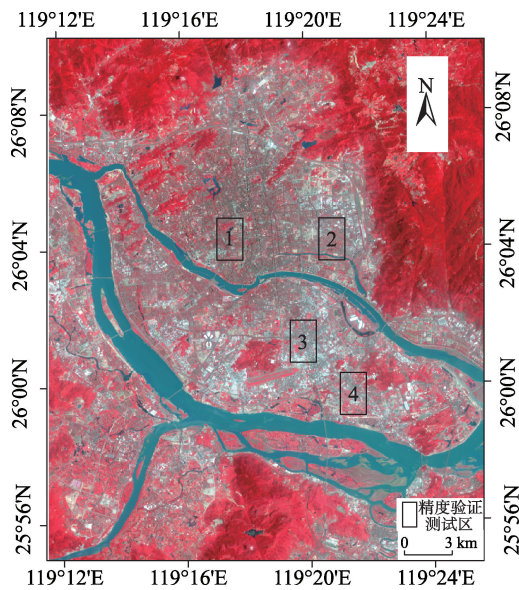


图1 福州市2016年7月Landsat8遥感影像

Fig. 1 Landsat 8 imagery of Fuzhou City, acquired in July 2016

2.3 研究方法

2.3.1 LST反演及归一化

本次研究所采用的数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),两期影像已经过几何

校正,辐射定标和FLAASH大气校正处理。

研究采用普适性单通道算法(single channel method, SC)的改进版^[11]反演LST,该方法由Jiménez-Muñoz和Sobrino于2009年提出,与2003年提出的SC算法^[12]相比,增加了5组针对ETM+ 6波段的大气参数,避免了ETM+ 6波段因采用TM 6的大气参数而可能产生的误差。其主要公式如下:

$$LST = Y \left[\frac{1}{\varepsilon} (\varphi_1 \times L_{\text{sensor}} + \varphi_2) + \varphi_3 \right] + \delta \quad (1)$$

$$Y \approx \frac{T_{\text{scn}}^2}{b_7 L_{\text{sensor}}} \quad (2)$$

$$\delta \approx T_{\text{scn}} - \frac{T_{\text{sensor}}^2}{b_7} \quad (3)$$

$$T_{\text{sensor}} = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{c_1}{\lambda^5 L_{\text{sensor}}} + 1 \right)} \quad (4)$$

式中: T_{sensor} 为亮度温度; L_{sensor} 为传感器高度辐射亮度值; c_1 、 c_2 为Plank辐射常数, $c_1 = 1.19104 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $c_2 = 1.43877 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; λ 为有效作用波长,对于Landsat 7第6波段和Landsat 8第10波段, $\lambda = 11.45 \mu\text{m}$; Landsat 7数据的 b_7 为1277^[13], Landsat 8数据的 b_7 为1321.08^[14]; φ_1 、 φ_2 和 φ_3 是大气水汽含量 ω 的函数,具体公式参见文献[16]。 ω 可直接从美国宇航局NASA提供的全球大气参数库^[15] (<http://atm-corr.gsfc.nasa.gov>) 中获得,两期影像的大气水汽含量分别为 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^2$ 和 $2.5 \text{ g}/\text{cm}^2$; ε 为地表比辐射率,由于本次LST反演采用的是Jiménez-Muñoz和Sobrino的单通道算法,因此对于ETM+影像, ε 的计算同样采用他们提出的植被覆盖度的算法^[16]。由于Landsat 8拥有独立的热红外多波段传感器TIRS,因此采用MODIS、ASTER光谱库(<http://speclib.jpl.nasa.gov>) 和Nichol的研究数据^[17-18]来确定 ε 。得到ETM+ 6波段植被、裸土、ISA和水体的地表比射率分别为0.986、0.970、0.920和0.995; TIRS 10波段植被、裸土、ISA和水体的地表比射率分别为0.9816、0.9722、0.9212和0.9908; TIRS 11波段植被、裸土、ISA和水体的地表比射率分别为0.9842、0.9763、0.9337、0.9902。根据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)的建议,目前Landsat 8的第11波段在LST获取中有很大的不稳定性,因此本次研究中,采用Landsat 8数据中的第10波段反演LST。

LST反演结果如图2所示。结果显示福州市在2000年5月和2016年7月的LST分别达到 $22.9 \sim 39.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $29.3 \sim 45.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

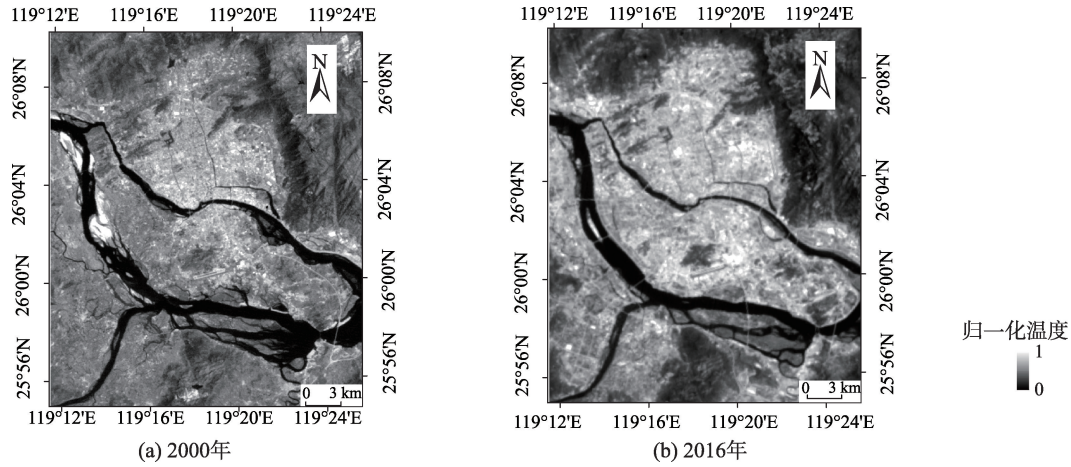


图2 2000年和2016年福州市归一化地表温度

Fig. 2 Normalized land surface temperature in Fuzhou City in 2000 and 2016

为了消除由于两期影像时相的不同对LST的影响,对LST进行归一化^[19],得到归一化地表温度(Normalized Land Surface Temperature, NLST)归一化计算公式如下:

$$NLST = \frac{(LST - LST_{\min})}{(LST_{\max} - LST_{\min})} \quad (5)$$

2.3.2 ISC 计算及其精度验证

本研究是利用完全约束最小二乘法(Fully Constrained Least Squares Method, FCLS)从陆地卫星图像中提取部分土地覆盖。该模型表示的是遥感影像中一个像元内各地物的类型、比例以及地物光谱间的线性关系,基本假定组成混合像元的几种不同地物的光谱是以线性的方式组合成的^[20],其数学表达式如下:

$$P'_{i\lambda} = \sum_{k=1}^N f_{ki} \times P_{k\lambda} + e_{i\lambda} \quad (6)$$

式中: $P'_{i\lambda}$ 为 i 像元在波段 λ 的反射率; N 为组分的个数; f_{ki} 为第 k 组分在 i 像元中所占比例(丰度); $P_{k\lambda}$ 为第 k 个组分在波段 λ 的反射率; $e_{i\lambda}$ 为残差项,表示像元光谱测量值与建模值之间的不一致性。

在FCLS模型中,端元数目的确定及选择至关重要的^[21]。通过纯像元指数(Pixel Purity Index, PPI)计算,本研究端元的选择过程有4个关键步骤:①对反射率影像进行最小噪声分离(Minimum Noise Fraction, MNF)变换,获取多个分量影像;②使用信噪比较高的几个分量计算像元纯净指数PPI^[22],提取出影像中的纯净像元,得到一副像元纯度影像,以提高端元选取的精度;③从像元纯度影像上设置一个确定的纯像素的感兴趣区域,综合利用MNF中信噪比较高的分量组成 n 维散点图,在点云的边

缘选取像素点作为纯像素点,提取出所用的端元。城市土地覆盖类型主要由水体、植被、人造地表和裸地组成^[23]。由于高反射率和低反射率人造地表的光谱存在差异,所以用2个端元类型来确定高低反射率的人造地表。由于水体光谱特征类似于低反射率的人造地表,所以在进行光谱混合分析之前将水体掩模。因此,本次研究中,土地覆盖类型分为3类,分别为植被、裸地以及人造地表(高反射率和低反射率)。高反射率的人造地表主要是具有高光谱反射率(如水泥地面等)的亮人造地表;低反射率的人造地表主要是低光谱反射率(如沥青、瓦片等)的暗人造地表。

为分析亚像元信息获取的精度,本研究采用高分辨率Google影像作为地表真实土地覆盖的参考数据,评估亚像元土地覆盖分类的准确性。Google影像与Landsat ETM+/OLI均基于UTM坐标系统,在影像配准基础上,对Google影像进行基于eCognition的图像分割获取福州市土地覆盖数据。任意选择4个测试区域(图1),分析测试区内Landsat影像混合像元分解后ISA和植被面积并与google影像eCognition软件分类后ISA和植被面积对比来评估亚像元信息获取的准确性。各测试区混合像元分解后ISA和植被面积由各像元ISA和植被百分比值 $\times 900 \text{ m}^2$ (分辨率为30 m)并累加,参考数据面积是各测试区内同一土地覆盖类型像元面积累加。由于两期Google影像与Landsat ETM+/OLI影像数据几乎是在相同日期获取的,因此Landsat影像和作为精度验证的高分辨率影像间土地覆盖类型没有变化,可较准确评价亚像元信息获取的精度。

2.3.3 热点分析(Getis Ord Gi*统计)

根据 Stewart 和 Oke 提出的“局部气候区”概念可知^[24], 仅仅利用地区之间的大气和 LST 差异, 作为量化城市扩张强度存在一定缺陷。因此, 本研究基于“局部气候区”的概念, 引入距城市中心的距离这一物理变量对城市 LST 的时相变化进行热点分析。热点分析这一方法早已被广泛应用于自然灾害监测, 犯罪分析^[25]等研究领域。该分析是通过观察其相邻点的所有值来描述在整个区域内存在的热点(高聚集值)和冷点(低聚集值)^[26], 即在热点分析中, 一个具有高值的点不一定是具有统计学意义的热点, 而是在本身为高值的情况下应该被其他高值点包围^[27]。本文通过利用热点分析方法, 度量每个要素对空间依赖程度, 并指出该要素附近值的相对大小, 从而对遥感图像的空间自相关性进行表征和量化^[28], 直观的了解高值(低值)发生聚集的位置以及聚集的密集程度。而且不同于一般的热点分析研究内容, 本研究是通过 LST 结合 ISA 信息利用热点分析评估热聚集区内各点与城市中心的距离和土地覆盖类型的动态关系, 并对热聚类环境的空间格局和统计意义进行评价。同时, 因其具有热聚集的空间统计意义, 可有效分析城市 LST 时相变化。热点分析是对数据集中的每一个要素计算 Getis Ord Gi*统计, 结果输出 z 得分和 p 值。 z 得分能反映一个数据集的离散程度, p 值代表数据来源的可信度。Getis Ord Gi*统计公式如下所示^[29]:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n \omega_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n \omega_{ij}\right)^2}{n-1}}} \quad (7)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (8)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - \bar{X}^2} \quad (9)$$

式中: i, j 为不同空间单元代号; n 为空间单元个数/网格总数; x 为空间单元属性值/网格属性值; \bar{X} 为属性值的平均值; $\omega_{i,j}$ 为 i, j 空间单元间的空间权值矩阵。计算出的 G_i^* 为 z 得分。 z 得分和 p 值将聚类结果分为 7 个级别^[10], z 得分可作为聚类显著性的诊断工具来检测不同类型的异常值与全局自相关的关系(90%显著性: (1.65, 1.96) 或 (-1.96, -1.65); 95%显著性: [1.96, 2.58] 或 [-2.58, -1.96]; 99%显著性: (2.58, +∞) 或 (-∞, -2.58)。 z 得分必须小于 -1.65 或大于 1.65 才具有统计意义。统计结果可分为多个集聚区, 分别为热点、较热点、温暖点、无统计意义点、凉爽点、较冷点以及冷点。本研究中的热点区和冷点区为显著性在 99% 及以上的区域。

3 结果与分析

3.1 精度验证

本研究采用高分辨率 Google 影像作为参考影像, 评估土地覆盖分类的准确性(表 1)。表 1 表明, 在测试区中, Landsat 影像与 Google 影像的 ISA 和植被的面积具有较好的一致性, 其中 ISA 分类误差低于 9%, 植被覆盖分类误差低于 5%, 这是由于植被光谱相对于 ISA 等其他土地覆盖类型较容易被区分, 因此植被的分类误差较小。误差的原因主要是影像本身的分类误差和高分影像与 Landsat 影像

表 1 2000 年和 2016 年福州市土地覆盖分类精度验证

Tab. 1 Accuracy verification of the land cover classification in Fuzhou city in 2000 and 2016

测试区	年份	ETM+/OLI 影像面积/km ²		Google 影像面积/km ²		平均差异/% ([ETM+/OLI-google]/google)	
		ISA	植被	ISA	植被	ISA	植被
测试区 1	2000	0.074	0.034	0.076	0.033	-2.6	3.0
	2016	0.082	0.014	0.079	0.013	3.8	7.2
测试区 2	2000	0.406	0.020	0.377	0.021	7.7	-4.8
	2016	0.113	0.077	0.110	0.074	2.7	3.9
测试区 3	2000	0.106	0.089	0.110	0.091	-3.6	-2.2
	2016	0.387	0.046	0.356	0.048	8.7	-4.2
测试区 4	2000	0.207	0.122	0.215	0.129	-3.7	-5.4
	2016	0.224	0.093	0.239	0.098	-6.3	-5.1
总计	2000	0.793	0.265	0.778	0.274	1.9	-3.3
	2016	0.806	0.230	0.784	0.233	2.8	-1.3

空间分辨率不同导致信息获取的尺度效应差异。

3.2 不同集聚区内 LST 与土地覆盖变化的关系

图 3(a)、(b)是福州市 2000 年、2016 年 ISA 分布情况,图 3(c)是 2000 年和 2016 年 ISC 大于 95% 的 ISA 分布图,该图显示,福州市从 2000 年到 2016 年 ISA 范围在北部,中部和西南部明显扩大,除了受山体地形影响,城市扩张在福州市各方向均明显。尽管 2016 年影像有零星分布的植被,但福州市 ISA 面积仍显著增加。

为了直接对比分析两期影像土地覆盖变化对 LST 的影响,将福州市 LST 进行归一化处理并统计

每种土地覆盖类型的平均归一化地表温度 (Mean Normalized Land Surface Temperature, MNLST),进而最小化时相差异对 LST 造成的影响。并利用热点分析生成两时相的热点图(图 4)。如图 4 所示,热集聚区域围绕着河流向两侧扩大,2000 年热集聚多发生在福州市中部,主要由于住宅区、工业区、中央商务区等城市用地大多集中于福州市中部,其他地区仍是农用地。随着城市扩张,2016 年热集聚已经遍布福州市北部和中部(图 3(b))。如图 3(b)表明,2016 年福州市河流沿岸大量农用地已转变为工业区,高密度居民区以及商务中心等。在市中心,主干道以及工业区,热集聚高度集中,冷集聚区域大

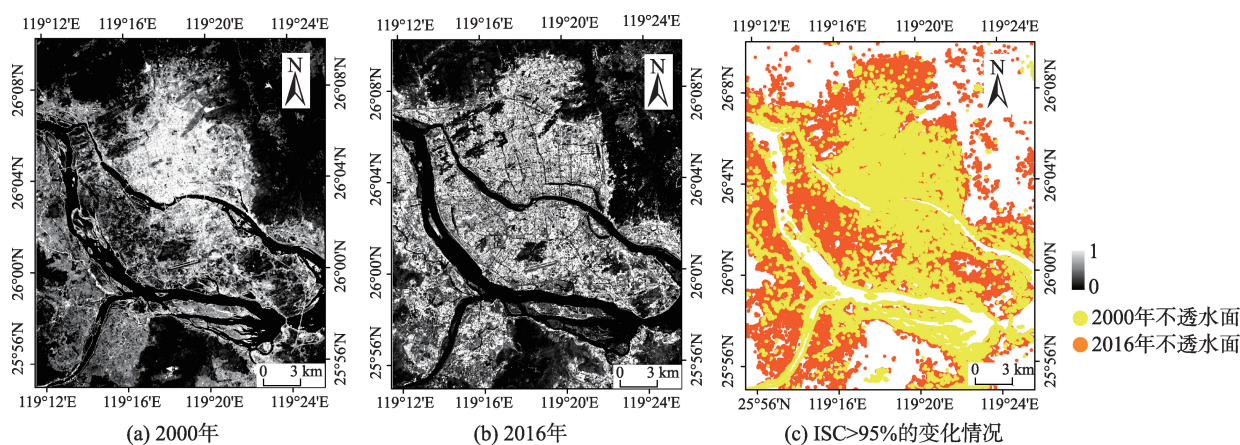


图3 2000和2016年福州市内ISC>95%的变化情况

Fig. 3 Impervious surface coverage (ISC) in the study area in 2000 and 2016, and areas with ISC changed over 95%

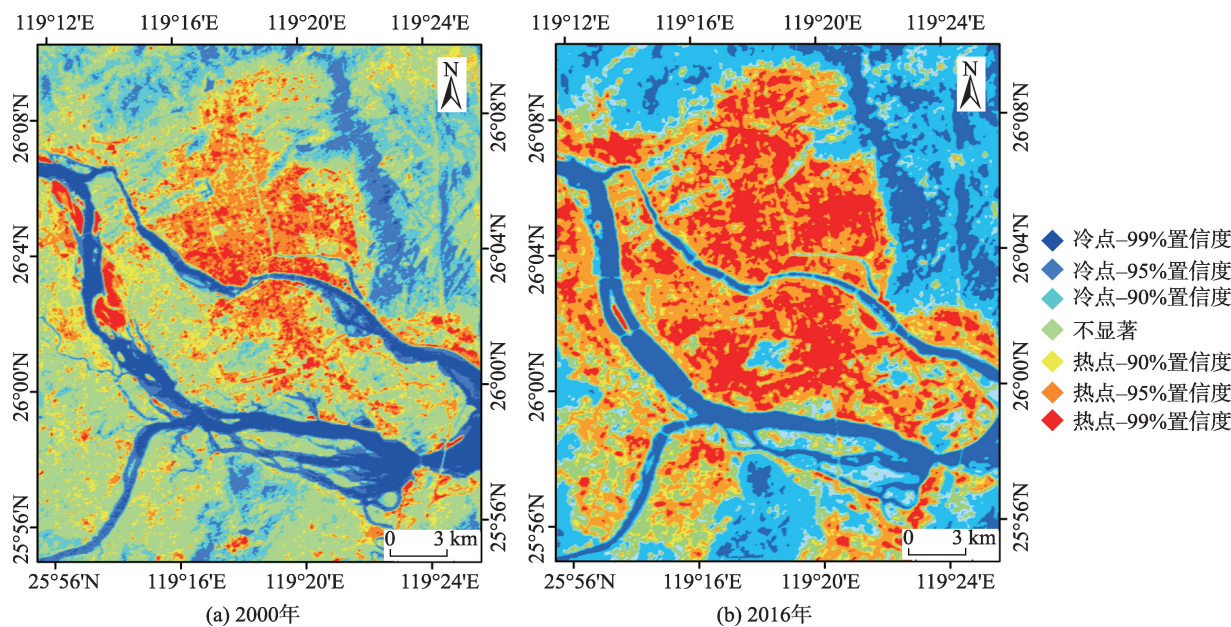


图4 2000年和2016年福州市热点分布

Fig. 4 Urban hotspot distribution in Fuzhou city in 2000 and 2016

部分为植被、河流和湖泊。为了量化分析热点区和冷点区对城市热集聚的影响,分别计算不同区域内的平均NDVI、MNLST以及平均ISA百分比(图5)。图5表明福州市平均ISA百分比和MNLST从热点区到冷点区总体呈下降趋势,平均NDVI呈上升趋势。比较2000年和2016年平均ISA百分比情况,发现受福州市城市扩张和城市规划整治的影响,热点区和冷点区的平均ISA百分比均有所上升,热点区从2000年的61.7%上升至2016年的71.5%;冷点区从30.5%上升至34.7%。受ISA百分比变化的影响,热点区的MNLST从0.65增长至0.77;冷点区从0.28增长至0.30。热点区的平均NDVI从2000年的0.312下降至2016年的0.143。造成这一现象的原因为,随着热点区ISA面积增加,其NDVI对区域内平均NDVI影响增大;城市ISA的扩张使得植被覆盖面积减少,同时导致冷点区的平均NDVI从0.713下降至0.621。

自2000–2016年,福州市中大量植被和耕地转变为城市ISA,从而导致热点区域随着时间而扩大。热点分析结果显示,热集聚区多位于城市用地覆盖地区,而冷集聚区多为水体和植被覆盖区域。特别是水体占冷点区域面积比最大,所占比例达到50%以上。因此,合理的城市规划和管理能有效的减少热岛效应。

3.3 热点区的时空变化发展

图6为2000年和2016年热集聚分布及热点辐射范围。图6表明,2000–2016年福州市城市热集聚程度明显提高,通过对两时相热集聚分布情况进

行统计显示,从2000–2016年福州市内热集聚区(热点区和较热区)总面积在此期间从15.7%增至47.3%;热点区从3个增加至5个,且热点分布更为分散;热点的辐射半径从2000年的0.97、1.03、0.95增大至2016年的1.89、2.01、2.10、2.05、2.13 km。可以看出,从2000–2016年热点辐射范围明显增大,热点区位置发生变化以及热点中心数量增加,其原因是随着社会经济的发展和城市化的推进,福州市内近十几年间房屋建筑、水利设施以及交通道路等的建设占用了大量的耕地;同时由于晋安区,鼓楼区,仓山区、马尾区和闽侯县内的大学城和海西高新科技产业园的快速发展,导致福州市西南部和东部的热集聚程度明显加剧。

为了更好地研究热点区与LST和ISC之间的关系,以图6(a)中的热点区2和6(b)中的热点区4为例,分析当距热点中心距离不同时,MNLST和平均ISC的变化情况(图7)。图7表明,距离热点中心越远,平均ISC和MNLST越小,大致呈负相关关系。且图7(a)显示在距热点中心约0.91 km时,MNLST发生明显变化,在0.87 km处左右,平均ISC形成明显减幅(热点区2半径约为1.03 km);图7(b)中,在距热点中心约2.17 km位置平均ISC发生明显变化,但约在2.20 km处,MNLST骤减(热点区4半径约为2.05 km)。这是由于热点区是由相邻高值点组成的区域,导致区域内的LST总是比区域外的高。如图7所示,平均ISC与MNLST的变化有较好的一致性,均在热点区内外表现出较大的差异性。

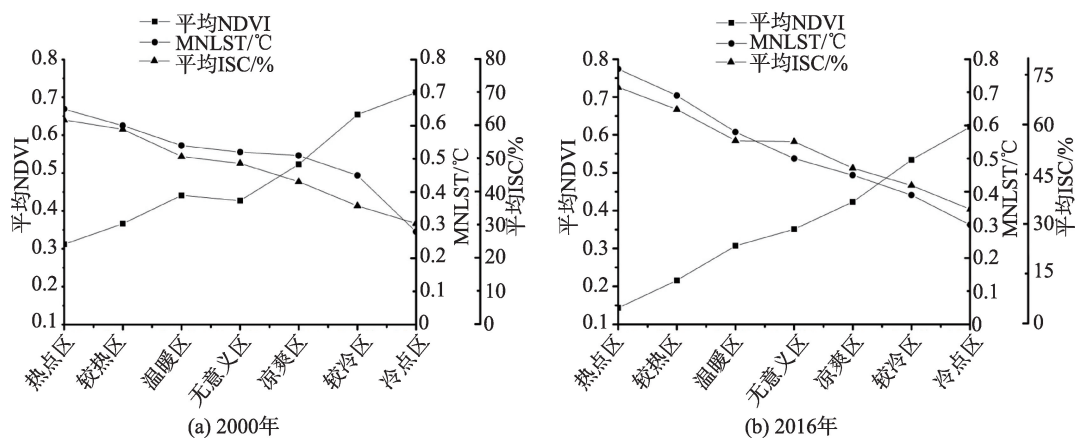


图5 2000年和2016年福州市平均NDVI、MNLST和平均ISC变化情况

Fig. 5 Changes in the mean normal differential vegetation index (NDVI), mean normalized land surface temperature (MNLST), and mean ISA in Fuzhou City in 2000 and 2016

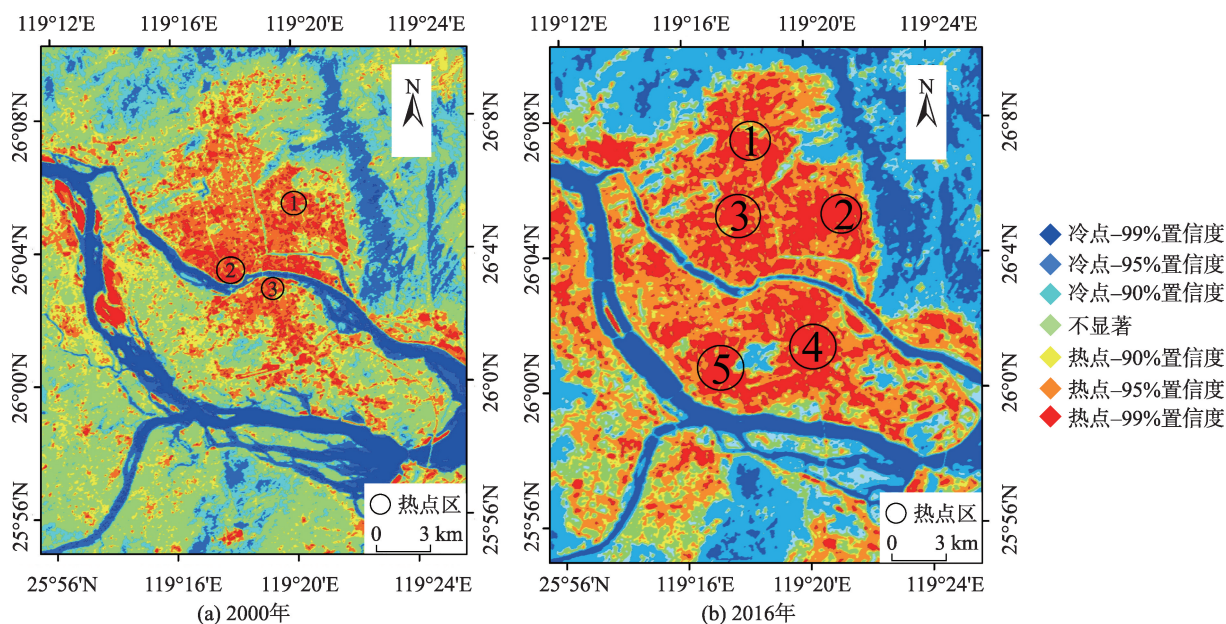


图6 2000年和2016年福州市热点分布

Fig. 6 Urban hotspot distribution in Fuzhou city in 2000 and 2016

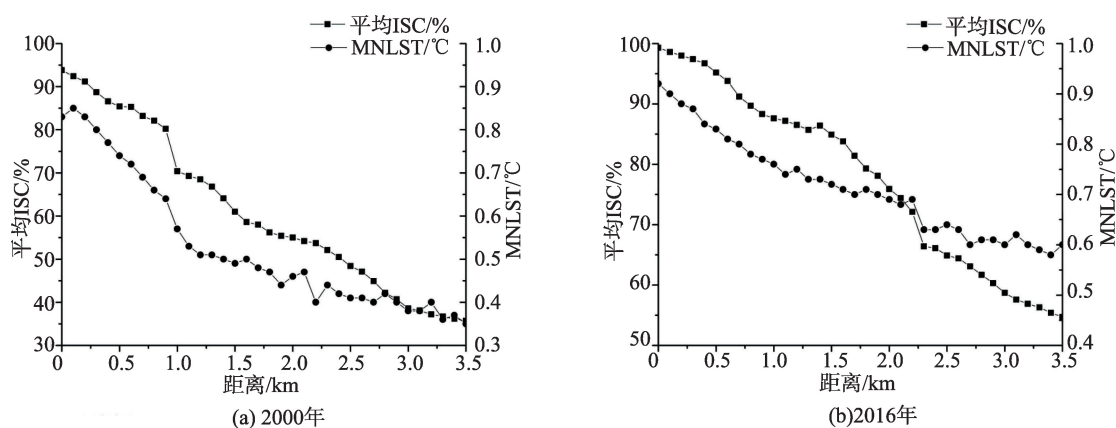


图7 2000年和2016年距热点中心不同距离时MNLST和平均ISC变化情况

Fig. 7 Changes in the mean normalized land surface temperature (MNLST) and mean ISC at different distances from the hot spot center in 2000 and 2016

说明ISC较大的地区,往往存在着成片的高温;而离热点中心越远,ISC越小,LST越低;同时,对比两期影像的热点图发现,ISC的变化导致热点中心的位置,数量及其辐射半径发生了变化。由此可得出,LST空间格局受到土地覆盖类型结构的高度影响。

4 结论

本研究以福州市为研究区,利用2000年和2016年Landsat遥感影像获取的ISC信息和LST数据,利用基于LST的热点分析将两期影像的热集聚情况

根据 z 得分分为7个集聚区,并结合ISA信息对城市内部热强度变化进行定量分析。主要结论如下:

(1) 2000–2016年随着城市化进程的加快和建成区的不断扩张,福州由一个非“火炉”城市变为“三大火炉”之一。ISA面积大幅增加,而植被和水体面积则显著降低。虽然热点分析结果显示福州市局部地区热岛效应有所缓解,但大部分城区的LST仍有不同程度的上升,城市整体热环境形势越发严峻。

(2) 基于空间自相关的热点分析方法能准确识别在城市建设用地和裸地等形成的热集聚区;大面积水体和植被形成的冷集聚区。与实际土地覆盖

类型分布较相符,能较好地反映实际情况。且由于热点图中的热点区和冷点区的形成不单取决于LST的高低,因此热点分析与空间自相关分析方法相比,能更科学地表明土地覆盖变化对LST的影响,了解城市内部热强度变化的细节。

(3) 从热点图中能更直观的看出,ISA密度的增加对热点的数量、分布以及热点中心辐射范围产生了强烈影响。且离热点中心越近,ISA密度越高,LST越高,热岛效应越明显。

因此,利用热点分析对界定城市热岛范围具有明确的统计学意义,能为进行进一步城市热岛的定量研究提供更具说服性的数据支持。

参考文献(References):

- [1] 彭少麟,周凯,叶有华,等.城市热岛效应研究进展[J].生态环境学报,2005,14(4):574-579. [Peng S L, Zhou K, Ye Y H, et al. Research progress in urban heat island[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2005,14(4):574-579.]
- [2] 肖荣波,欧阳志云,李伟峰,等.城市热岛的生态环境效应[J].生态学报,2005,25(8):2055-2060. [Xiao R B, OuYang Z Y, Li W F, et al. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(8):2055-2060.]
- [3] 陈云浩,李晓兵,史培军,等.上海城市热环境的空间格局分析[J].地理科学,2002,22(3):317-323. [Chen Y H, Li X B, Shi P J, et al. Study on spatial pattern of urban heat environment in Shanghai city[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002,22(3):317-323.]
- [4] 苏伟忠,杨英宝,杨桂山.南京市热场分布特征及其与土地利用/覆被关系研究[J].地理科学,2005,25(6):697-703. [Su W Z, Yang Y B, Yang G S, et al. Distributional characteristics of urban thermal space and relations with Land Use/Cover of Nanjing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005,25(6):697-703.]
- [5] 赵云升,杜嘉,宋开山,等.基于卫星遥感的夏季长春市城区热场分析[J].地理科学,2006,26(1):70-74. [Zhao Y S, Du J, Song K S, et al. A study on urban thermal field of Changchun city in Summer based on satellite remote sensing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006,26(1):70-74.]
- [6] 卢爱刚,庞德谦,何元庆,等.全球升温对中国区域温度纬向梯度的影响[J].地理科学,2006,26(3):345-350. [Lu A G, Pang D Q, He Y Q, et al. Impact of global warming on latitudinal temperature gradients in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006,26(3):345-350.]
- [7] 江颖慧,焦利民,张博恩.城市地表温度与NDVI空间相关性的尺度效应[J].地理科学进展,2018,37(10):1362-1370. [Jiang Y H, Jiao L M, Zhang B E. Scale effect of the spatial correlation between urban land surface temperature and NDVI[J]. Progress in Geography, 2018,37(10):1362-1370.]
- [8] Jun-Hyun K, Gu D, Wonmin S, et al. Neighborhood landscape spatial patterns and land surface temperature: An empirical study on single-family residential areas in Austin, Texas[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2016,13(9):880-885.
- [9] Zheng B, Myint S W, Fan C. Spatial configuration of anthropogenic land cover impacts on urban warming[J]. Landscape and Urban Planning, 2014,130:104-111.
- [10] Feyisa G L, Meilby H, Jenerette G D, et al. Locally optimized separability enhancement indices for urban land cover mapping: Exploring thermal environmental consequences of rapid urbanization in Addis Ababa, Ethiopia [J]. Remote Sensing of Environment, 2016,175:14-31.
- [11] Jimenez-Munoz J C, Cristobal 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.
- [12] Jimenez-Munoz J C, Cristobal J, 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.
- [13] 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,2013,40(4):487-492. [Xu H Q, Lin Z L, Pan W H. Some issues in land surface temperature retrieval of landsat thermal date with the single-channel algorithm[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2013,40(4):487-492.]
- [14] 孙静,何菁. Landsat 8数据地表温度反演算法对比研究——以南京市为例[J].淮海工学院学报(自然科学版), 2016,25(3):66-71. [Sun J, He J. Comparison of algorithms of inverting land surface temperature with Landsat 8 Satellite: Taking Nanjing as an example[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2016,25(3):66-71.]
- [15] 侯浩然,丁凤,黎勤生.近20年来福州城市热环境变化遥感分析[J].地球信息科学学报,2018,20(3):385-395. [Hou H R, Ding F, Li Q S. Remote sensing analysis of changes of urban thermal environment of Fuzhou City in the Past 20 Years[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(3):385-395.]
- [16] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Soria G, et al. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote

- Sensing, 2008,46(2):316-327.
- [17] ICES. MODIS UCSB Emissivity Library[OL]. <http://www.ices.ucs.edu/modis/EMIS/html/em.html>, 2013
- [18] Nichol, Janet. An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2009,75(5):547-556.
- [19] Haashemi S, Weng Q, Darvishi A, et al. Seasonal variations of the surface urban heat island in a semi-arid city [J]. Remote Sensing, 2016,8(4):352.
- [20] 李桢,谭永滨,李霖,等.基于线性光谱混合分析的武汉市地表组分研究[J].遥感技术与应用,2013,28(5):780-784. [Li Z, Tan Y B, Li L, et al. Study of land surface composition of Wuhan city based on linear spectral mixture analysis[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(5):780-784.]
- [21] Boardman J W, Kruse F A. Analysis of imaging spectrometer data using N - dimensional geometry and a mixture-tuned matched filtering approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011,49(11):4138-4152.
- [22] 王立辉,黄进良,孙俊英.基于线性光谱混合模型的油菜种植面积遥感监测方法研究[J].遥感信息,2010,2010(3): 55-59. [Wang L H, Huang J L, Sun J Y. Study on remote monitoring of rape acreage based on linear spectral mixture model[J]. Remote Sensing Information, 2010(3):55-59.]
- [23] M. K. Ridd. Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995,16(12):2165-2185.
- [24] 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.
- [25] Craglia M, Haining R, Wiles P. A comparative evaluation of approaches to urban crime pattern analysis[J]. Urban Studies, 2000,37(4):711-729.
- [26] Ord J K, Getis A. Testing for local spatial autocorrelation in the presence of global autocorrelation[J]. Journal of Regional Science, 2001,41(3):411-432.
- [27] Majumdar D D, Biswas A. Quantifying land surface temperature change from LISA clusters: An alternative approach to identifying urban land use transformation[J]. Landscape & Urban Planning, 2016,153:51-65.
- [28] Wulder M, Boots B. Local spatial autocorrelation characteristics of remotely sensed imagery assessed with the Getis statistic[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(11):2223-2231.
- [29] Tran D X, Pla F, Latorre-Carmona P, et al. Characterizing the relationship between land use land cover change and land surface temperature[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2017, 124:119-132.