

快速城市化下福州市的热环境变迁

王琳^{1,2,3}, 徐涵秋^{1,2,3}

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2. 福州大学 遥感信息工程研究所, 福建 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, 福建 福州 350116)

摘要: 福建省是国务院提出建设实施的首个“国家生态文明试验区”, 福州作为福建省省会, 其良好的生态环境有着举足轻重的作用. 针对福州在发展过程中由非“火炉”城市一跃成为中国新三大“火炉”之首的现象, 利用遥感技术反演和提取地表温度及其他城市生态参数, 分析它们在 1989—2013 年间的变化以及“火炉”形成的原因和驱动力. 研究发现, 在 24 年间福州的城市热岛效应显著加剧, 反映此变化的城市热岛比例指数(URI)从 0.29 上升到 0.53. 热场剖面和时空变化分析显示, 城市热场的空间结构很大程度上被土地覆盖类型的空间格局所左右. 总的看来, 城市不透水面面积增大, 斑块集聚, 植被和水体面积减少且斑块趋于破碎, 加上城市通风廊道受阻, 导致了福州逐渐演化成为“火炉”城市. 该研究为现代城市缓解热岛效应, 实现健康可持续发展提供了借鉴和支持.

关键词: 城市热岛; 城市热环境; 不透水面; 遥感; 福州市
中图分类号: X87, X821, P237, TP79 **文献标志码:** A

Thermal Environment Change of Fuzhou City with Rapid Urbanization

WANG Lin^{1,2,3}, XU Hanqiu^{1,2,3}

(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 of Soil Erosion and Disaster Protection, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Fujian Province is the first “National Ecological Civilization Experimental Zone” approved by the State Council of China. As the provincial capital, a good ecological environment for Fuzhou City is always expected. During the progress of urbanization, Fuzhou has witnessed a significant urban thermal environment (UTE) change, leading the city to be reputed by media as the top one of the three new “furnace cities” in China. To investigate the process of the city from a

non-furnace city to a top furnace city in China, the dynamics of urban biophysical components of Fuzhou and the associated UTE between 1989 and 2013 have been analyzed by remote sensing technology. The result shows that the urban heat island (UHI) effect in Fuzhou greatly aggravates as the UHI Ratio Index (URI) of the city increases from 0.29 to 0.53 in the past 24 years. The spatiotemporal variation analysis on the basis of the thermal profiles reveals that the spatial structure of the UTE is greatly influenced by the spatial pattern of land cover types. On the whole, the increase and amalgamation of impervious surface patches, reduction and fragmentation of vegetation and water covers, and the blockage of the urban ventilation are the main factors contributing to the formation of the “furnace city” of Fuzhou. The study provides a guidance and support for the mitigation of the UHI effect and the achievement of city’s healthy sustainable development.

Key words: urban heat island; urban thermal environment; impervious surface; remote sensing; Fuzhou City

随着城市的快速发展, 显著扩张的建成区范围, 大量减少的植被和水体, 都使得城市热环境状况不断恶化, 宜居程度下降, 随之而来的城市热岛效应也越发严重. 据 2013 年 7 月国家气候中心发布的 30 年来全国夏季炎热城市情况研究报告, 作为首个“国家生态文明试验区”福建省的省会福州超过重庆成为新“三大火炉”之首, 热岛效应影响程度可见一斑. 因此, 详细剖析福州从非“火炉”变为“火炉”之首的原因和驱动力, 能为福州乃至当代城市合理进行规划和改造, 缓解热岛效应, 实现健康可持续发展提供借鉴和支持.

从国内外研究情况来看, 城市热环境研究已经由过去的定性分析逐步发展到现在的定量评价, 其

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAC08B01-05); 国家自然科学基金(41501469)

第一作者: 王琳(1981—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为环境与资源遥感. E-mail: wanglin@fzu.edu.cn

通讯作者: 徐涵秋(1955—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为环境与资源遥感. E-mail: hxu@fzu.edu.cn

监测评价方法也由传统的依赖有限零星分布的地面气象站资料的“点观测”,发展成为以遥感和地理信息系统为代表的空间信息技术支撑下的“面评价”,这也是该研究领域的一种必然趋势. XU等提出了三维城市热岛模型和城市热岛比例指数用于定量对比厦门市不同年份间的城市热岛效应,并发现厦门市在1989—2000年间的城市热岛效应有了明显的减弱^[1]; GOBAKIS等利用人工神经网络技术尝试制作了城市热岛强度的预测模型并将其应用在希腊雅典^[2]; SOBRINO等以西班牙马德里为研究区,结果表明空间分辨率为50m的影像数据更加适合于地区级层面SUHI估算,若空间分辨率低于50m则会低估SUHI效应,且难以区分城市内部子区域^[3]. COSEO等利用遥感数据和城市气象数据探讨了土地利用覆盖,建筑配置和临近热源对美国芝加哥城市热岛效应的影响^[4]; LI等研究了深圳和香港在1968—2013年间快速城市化后对区域气候的影响^[5]; JIN等研究了快速城市化对区域温度变化的影响,表明城市化对区域温度的升高有明显的作用^[6].

由此可知遥感技术在分析和监测城市热环境变化方面有着不可比拟的优势,但总的看来,已有研究

主要集中于城市热岛本身的变化分析,而从城市规划角度对热岛成因进行长时序、多因子分析的研究还比较少见. 因此,本文拟利用遥感技术全面分析福州市1989—2013年间城市下垫面多种生态环境参数的变化对城市热环境的综合影响,从城市规划的角度对热岛效应的成因进行剖析并提出改善措施. 这一研究可为现代城市发展中带来的城市热岛效应的缓解及健康可持续发展城市的建设提供借鉴和支持.

1 研究方法

1.1 研究区概况及数据源

福州位于中国东南沿海,东濒东海,与台湾隔海相望. 福州地貌属典型的河口盆地,周围被鼓山、旗山、五虎山和莲花峰等群山所环抱. 境内有闽江和乌龙江两条河流,随地势自西向东横穿城区汇入东海. 福州属典型的亚热带季风气候,夏季主导风向为东南风,城市热岛效应显著,被评为“新三大火炉”之首. 研究的范围以福州盆地为主,覆盖了福州市区及其毗邻地区,面积1 135.27 km²(见图1).

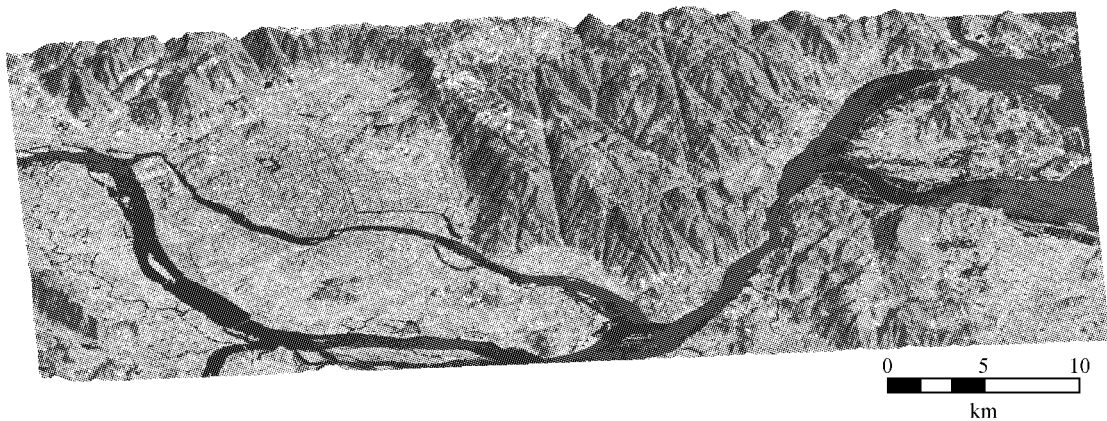


图1 福州盆地三维示意图

Fig.1 The Fuzhou Basin from 3D-perspective view

研究选用的遥感数据分别是成像时间为1989年6月15日的Landsat TM影像和2013年8月4日的Landsat OLI/TIRS影像. 为了描述简练,下文所指的1989年和2013年均指这两个日期. 影像的辐射校正分别采用Chander等^[7]和Landsat 8官方手册的参数模型,以及Chavez的COST大气校正模型^[8],将2幅影像的灰度值(DN)转换成传感器处反射率(at-sensor reflectance),以降低影像由于获取时相的不同导致的地形、光照和大气等方面的差异.

1.2 地表温度的反演

地表温度(land surface temperature, LST)是衡量区域热环境的重要参数之一^[9]. 目前利用遥感影像反演LST的算法大致分为辐射传导方程法(radiative transfer equation, RTE)^[10],单通道算法(single-channel method, SC)^[11-13],劈窗算法(split-window method, SW)^[14-16],以及基于影像的反演算法(image-based method, IB)^[17-18]. 由于1989年的TM影像尚无法获取当时的大气剖面数据,不具备使用RTE, SC和SW算法的先决条件,因此,本文

统一采用 IB 算法进行 LST 反演. 求算过程如下: 先将热红外波段的 DN 值转换成传感器处光谱辐射值^[19-20], 再转换成传感器处温度, 最后根据不同地物比辐射率将传感器处温度反演成 LST.

对于卫星 Landsat 5 TM 有

$$L_{\lambda} = G_{\text{rescale}} Q_{\lambda} + B_{\text{rescale}}$$

对于卫星 Landsat 8 OLI 有

$$L_{\lambda} = M_L Q_{\lambda} + A_L$$

$$T_{\lambda} = \frac{K_2}{\ln(K_1/L_{\lambda} + 1)}$$

$$T_{\text{LS}} = \frac{T_{\lambda}}{1 + (\lambda T_{\lambda}/\rho) \ln \epsilon}$$

式中: L_{λ} 为热红外波段的像元在传感器处的光谱辐射值, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; G_{rescale} 为对应波段的增益值; B_{rescale} 为对应波段的偏置值; Q_{λ} 为像元对应 DN 值; T_{λ} 是传感器处温度值, 单位为 K; T_{LS} 为 LST, 单位为 K; λ 为热红外波段的中心波长或有效波长, 对于 Landsat 5, $\lambda = 11.45 \mu\text{m}$, 对于 Landsat 8 TIRS 的第 10 波段 $\lambda = 10.90 \mu\text{m}$; $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$; K_1 和 K_2 分别为定标参数, 对于 Landsat 5, $K_1 = 607.76 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1260.56 \text{K}$; 对于 Landsat 8 TIRS 的第 10 波段, $K_1 = 774.89 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1321.08 \text{K}$; M_L 和 A_L 分别为头文件中该波段的乘法调整系数和加法调整系数. 根据 USGS 的官方公告^[21], TIRS 11 波段的温度定标误差较大, 因此本次研究采用 TIRS 的第 10 波段来进行地表温度的反演. ϵ 为比辐射率, 取值见文献^[22].

1.3 不同时相的城市热岛效应比较

根据上述方法, 可以得到研究区不同时相的 LST 反演成果, 但由于 2 幅影像获取年月份不同, 不宜直接使用温度绝对值来对比城市热岛效应的变化. 如前所述, 城市热岛研究侧重的是温度的相对强弱在下垫面的空间分布特征, 故采用温度正规化的方法来消除季相差异^[23-25], 将不同时相的温度值统一到 0—1 之间, 接着利用密度分割技术将正规化后的 LST 平均划分为 7 个等级, 分别为低温、较低温、次中温、中温、次高温、高温和特高温^[26], 其中次高温、高温和特高温主要分布在城市区域, 构成主要的热岛斑块. 接着引入城市热岛比例指数 (URI)^[27], 该指数通过计算热岛与建成区面积的比例, 并赋权重来表征热岛发育程度, 能更加科学地对比不同年份之间城市热岛的变化. 指数值越大, 热岛效应越严重. 该指数先后被环境保护部和住房城乡建设部用作评价城市生态环境和评估城市环境绩效的指标^[28-29], 得到了权威认可, 被广泛应用于城市热环境

变化的研究中^[30-35]. URI 可用以下公式计算, 即

$$I_{\text{URI}} = \frac{1}{100m} \sum_{i=1}^n w_i p_i$$

式中: I_{URI} 为城市热岛比例指数; m 为正规化等级指数; i 为城区高于郊区的温度等级; n 为城区高于郊区的温度等级数; w 为权重值, 取第 i 级的级值; p 为第 i 级的百分比. 研究中 LST 分为 7 级, 所以 m 为 7. 次高温以上区域基本代表了城市区域, 因此 n 为 3.

1.4 城市下垫面主要地类信息提取

针对与城市热环境关系最为密切的城市不透水面、植被和水体等地类信息, 利用基于指数的分层分类方法进行提取, 在原有的多光谱波段上 (取 TM 影像的 4、5 波段以及 OLI 影像的 5、6 波段) 增加了土壤调节植被指数 (soil adjust vegetation index, SAVI)^[36], 改进的归一化差值水体指数 (modified normalized difference water index, MNDWI)^[37] 以及基于指数的建筑用地指数 (index-based build-up index, IBI)^[38], 参与分类以提高精度. 它们的公式分别如下:

$$I_{\text{SAVI}} = \frac{(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}})(1 + l)}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}} + l}$$

$$I_{\text{MNDWI}} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{MIR}}}$$

$$I_{\text{IBI}} = \frac{I_{\text{NDBI}} - (I_{\text{SAVI}} + I_{\text{MNDWI}})/2}{I_{\text{NDBI}} + (I_{\text{SAVI}} + I_{\text{MNDWI}})/2}$$

式中: ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率; ρ_{Red} 为红光波段的反射率; l 为土壤调节系数, 取值范围 0—1; ρ_{Green} 为蓝光波段的反射率; ρ_{MIR} 为中红外波段的反射率; I_{NDBI} 为 NDBI 指数值^[39].

2 结果与分析

2.1 研究区下垫面热场剖面特征

为了分析 LST 和下垫面土地覆盖类型之间的关系, 进行了下垫面热场剖面分析. 剖面 A-A 大致垂直于闽江从城市自北向南, 由北峰国家森林公园穿过福州中心城区直到闽侯南通, 贯穿绝大部分下垫面类型, 能从空间上体现福州城市热岛全貌; 剖面 B-B 大致平行于闽江从城市自西向东, 由福州大学新区横穿南台岛 (金山新区) 经马尾新城直到长乐, 基本贯穿福州 20 多年来开发的各个主要新区, 能从时间上反映福州城市热岛的变迁 (图 2).

从图 2 可以看出, 不同土地覆盖类型之间的温度存在较大差异, 代表高温的红色区域主要集中于

各个时相的工业、居住及开发用地等处,代表低温的蓝色区域则分布在各个时相的水体及植被覆盖区,如山体、农田等处,其值明显低于周围非水体和少植被覆盖区.该变化趋势反映在图 3 的 A-A 热场剖面中更为明显:市中心呈显著高温位值,“三坊七巷”、“苍霞”、“上渡”等片区成为峰顶,而市郊的国家森林公园,市内的绿地、山体及水体呈低温位值,整个剖面呈现出多个典型的“中间高两端低”的城市热岛特征.

从 2 个时相的 B-B 热场剖面对比(见图 3)可以看出,随着福州大学新区、金山新区和马尾新城以及长乐市的建设发展,福州市建成区面积不断扩大,剖面温度均值和极值不断升高,甚至出现多个从谷底到峰顶的爆发式升温(如浦下洲湿地、马尾新城和长乐等处).而在这些高温热岛包围圈中,闽江和乌龙江所在区域均为温度“谷底”,降温趋势特别明显,可见较大型水体可以很好地分割城市热场.

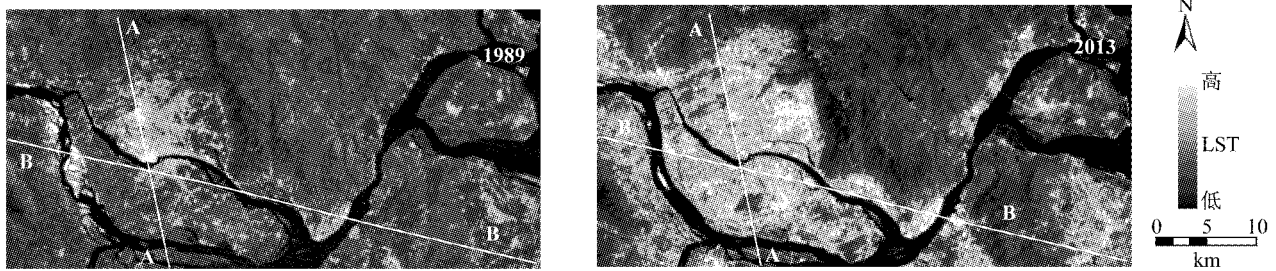


图 2 研究区下垫面 LST 分布及剖面位置
Fig.2 Positions of LST profiles across the study area

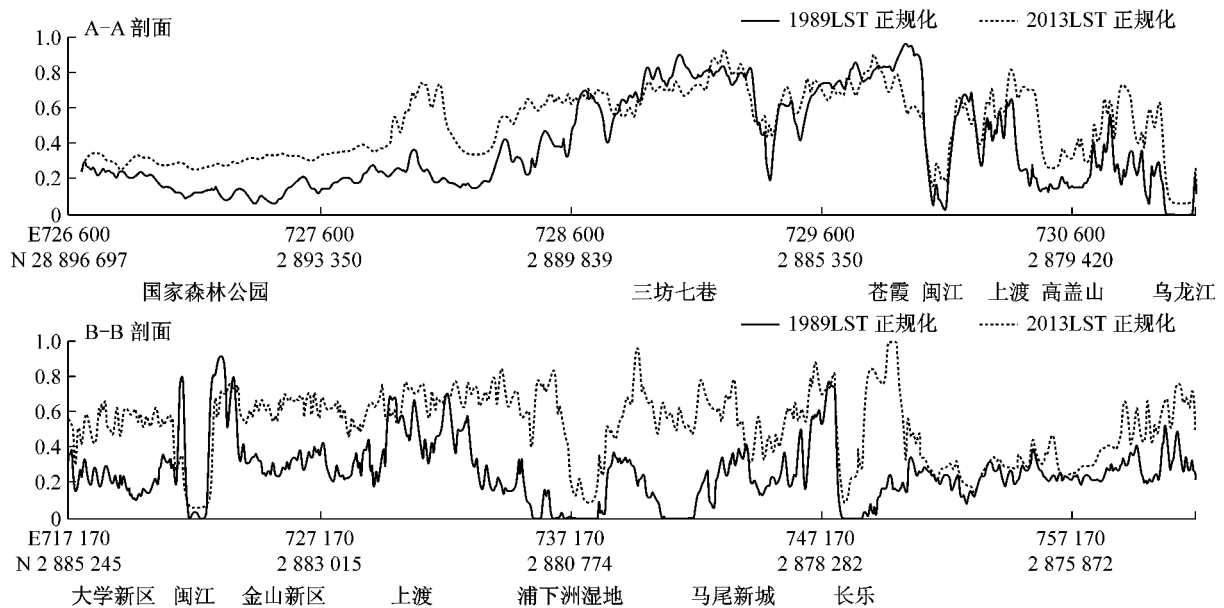


图 3 研究区下垫面热场剖面
Fig.3 LST profiles responding to land covers in the study area

由此可见,LST 和下垫面土地覆盖类型有着密切的联系,热场的空间结构在很大程度上被土地覆盖类型的空间格局所左右.一般来说,城市建成区主要由沥青、水泥、钢筋、混凝土等不透水建筑材料所覆盖,这些材料会阻断自然地表的蒸散作用,破坏地表热平衡^[40],且建筑、道路也是城市主要活动的功能用地,其人口密度高,建筑密度大,机动车保有量与日俱增,人为排放热量居高不下,因此城市建成区 LST 整体均值、极值都比较高.对于植被覆盖区,植物叶片通过蒸散作用可以带走下垫面的热量,且能

通过冠层阻挡太阳的直接辐射热和来自墙体、路面的反射热,由此形成的降温效果也就较为明显.而水体,尤其是中大型水体的蒸发作用可以大量吸收并消耗环境热能,能有效缓解城市热量的集聚,降低环境温度.

2.2 主城区下垫面主要热环境参数变化

为了集中研究城市的热岛效应并定量比较和评价其在 24 年间的强度变化,通过利用 2 时相的福州主城区矢量边界分别对研究区 LST 等级分布及下垫面主要地类信息分布图进行叠加掩膜运算,集中

统计出主城区内各温区等级的面积以及下垫面主要覆被类型信息。根据图 4、5 和表 1 可知,福州主城区下垫面各参数在 24 年间发生了很大变化,主要表现为建成区面积和不透水面积大幅度增加,水体和植

被面积相应减少,LST 次高温以上区域大面积扩张,中温以下区域显著减少。

(1)主城区范围扩大:福州市主城区范围在 24 年间不断扩张,面积从 1989 年的 58.09 km² 增加到 2013 年的 231.46 km²,增加近 3 倍之多。

(2)不透水面变化:不透水面覆盖面积大幅度增加,从 1989 年的 32.31 km² 到 2013 年的 180.65 km²,净增 4.6 倍。而不透水面覆盖比例从 55.62% 增加到 78.05%,增加 22.43%。

(3)植被及水体变化:随着主城区面积扩大,植被覆盖面积占总面积的比例不断降低,1989 年覆盖面积比例为 38.80%,到 2013 年只剩 15.90%,下降近 23 个百分点。主城区水体覆盖面积比例有一定程度减少,占比下降了 0.5%。

(4)URI 及 LST 等级变化:在研究期内,福州市的 URI 从 1989 年的 0.29 升高到 2013 年的 0.53,几乎翻倍,可见福州城市热岛效应的变化显著。而从 LST 等级分布图上可以看出,1989 年主要以中温和次高温为主(合计占总面积 67.5%),而高温和特高温则集中在鼓楼区的“三坊七巷”、东街口片区以及台江区的苍霞片区和闽江沿岸。

与之相比,2013 年则以次高温和高温为主(合计占总面积的 67.8%),特高温区也明显增多;相应的,中温区则有较大幅度的降低,降幅达 18.2%,次中温区和较低温区也均有不同程度的减少。“三坊七巷”片区作为高温-特高温区仍然存在但面积减小;而苍霞片区的高温、特高温区已基本消失,转为次高温和中温区覆盖;东部化工路、福新路一带以及南台岛上的金山新区在短短几年时间里发展迅猛,基本被次高温以上区域覆盖;马尾开发区的高温区和特高温区面积大大扩张。

2.3 主城区城市热岛时空变化分析

为了进一步分析福州市 1989—2013 年之间城市热岛的时空变化,将不同时相的 LST 等级分布图作叠加处理并进行差值运算,制成热岛变化差值影像图(图 6)及 LST 等级变化表(表 2)。

图 6 中红黄色调代表温度等级升高的区域,而蓝绿色调代表温度降低的区域。从表 2 可以看出,温度等级升高的区域占到了 84.05% 的面积,而温度降低的区域只占了 3.04%,可见在这 24 年间,城市总体处于升温趋势,并且,这种变化的分布并不均匀,带有明显的区域性。从图中可以看出,蓝绿色调区域主要集中在以八一七路为轴线的城市中心区以及苍霞片区等处,而红黄色调基本分布在周边地区,这表

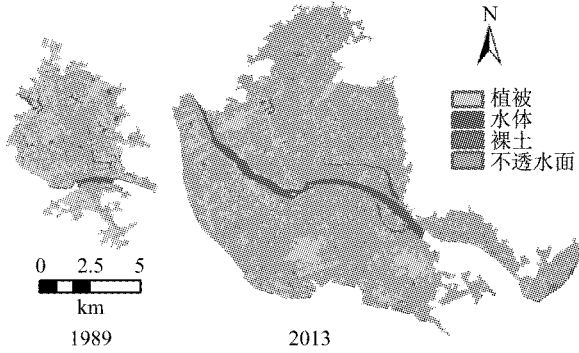


图 4 主城区下垫面主要地类信息分布

Fig.4 Main land cover types in the urban built-up areas of 1989 and 2013

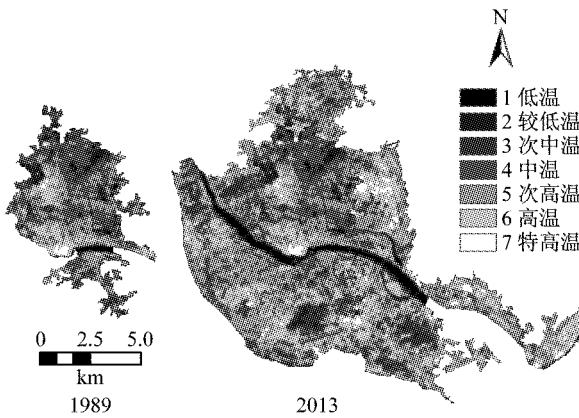


图 5 主城区 LST 等级分布

Fig.5 Levelled LST maps of the urban built-up areas of 1989 and 2013

表 1 各专题信息统计

Tab.1 Various thematic information of biophysical components

项目	1989		2013		比例变化/%	
	面积/km ²	%	面积/km ²	%		
不透水面	32.31	55.62	180.65	78.05	22.43	
植被	22.54	38.80	36.8	15.90	-22.90	
水体	3.28	5.65	11.92	5.15	-0.50	
LST 等级	低温(1)	0.83	1.43	4.16	1.80	0.37
	较低温(2)	3.51	6.04	5.26	2.27	-3.77
	次中温(3)	9.05	15.58	14.87	6.42	-9.15
	中温(4)	22.18	38.18	46.26	19.99	-18.20
	次高温(5)	17.03	29.32	107.96	46.64	17.33
	高温(6)	4.97	8.56	49	21.17	12.61
	特高温(7)	0.53	0.91	3.96	1.71	0.80
主城区面积	58.09		231.46		—	
研究区面积	1 135.27		—		—	
URI	0.29		0.53		—	

注:括号内数字为 LST 等级级值。

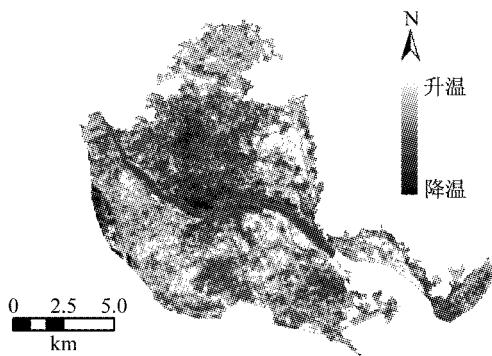


图 6 主城区热岛变化差值影像(1989-2013)

Fig.6 Difference image of LST in the urban built-up areas between 1989 and 2013

表 2 1989-2013 年 LST 等级变化表

Tab.2 LST level variations between 1989 and 2013

温度	变化等级	面积/km ²	比例/%	总比例/%
降低	-3	0.55	0.24	3.04
	-2	1.01	0.44	
	-1	5.48	2.37	
不变	0	29.87	12.91	12.93
	1	62.51	27.01	
	2	62.97	27.20	
	3	46.44	20.06	
	4	18.89	8.16	
	5	3.51	1.52	
升高	6	0.23	0.10	84.05
	合计	-	231.46	

明,随着福州城市的扩展,围绕老城区四周都出现了成片的热岛,但是中心区的温度等级却有所下降,这与福州市所推行的旧城改造效果密不可分。

而对比周边的新建成区,如南台岛,化工路一带以及马尾开发区,LST 等级都有较为明显地增加。南台岛最为突出,过半区域上升 2 级以上。1989 年时除了较早发展起来的仓山老城区以及闽江沿岸以外,大部分属植被覆盖区,而到了 2013 年,随着三县洲、金山大桥等闽江大桥的通车,金山工业区和生活区等一批新区的兴建,南台岛的不透水面大量增加,植被面积显著减少,导致 LST 等级大幅上升,可见不透水面和植被对于城市热岛效应的重要影响。从福州城市热岛空间变化的 2 个典型区域可以更为明显地表现出这种影响。图 7a、7b 和 7c、7d 分别为福州苍霞片区和浦下洲湿地在 2 个时相的局部放大图(以标准假彩色合成),这 2 个典型区域在 24 年间均发展迅速,土地覆盖变化对比强烈。

由图 7a 可以看出,1989 年苍霞片区作为当时福州城市热岛最为严重的区域之一,被连片低矮高密度的棚屋区所覆盖,植被稀少。后得益于福州市的棚屋区改造,到 2013 年(图 7b),该区域出现了大量代

表植被的红色斑块,且区域内通风廊道明显增多,建筑密度降低,使得地表温度等级显著下降(见图 7e),城市热岛效应明显缓解。

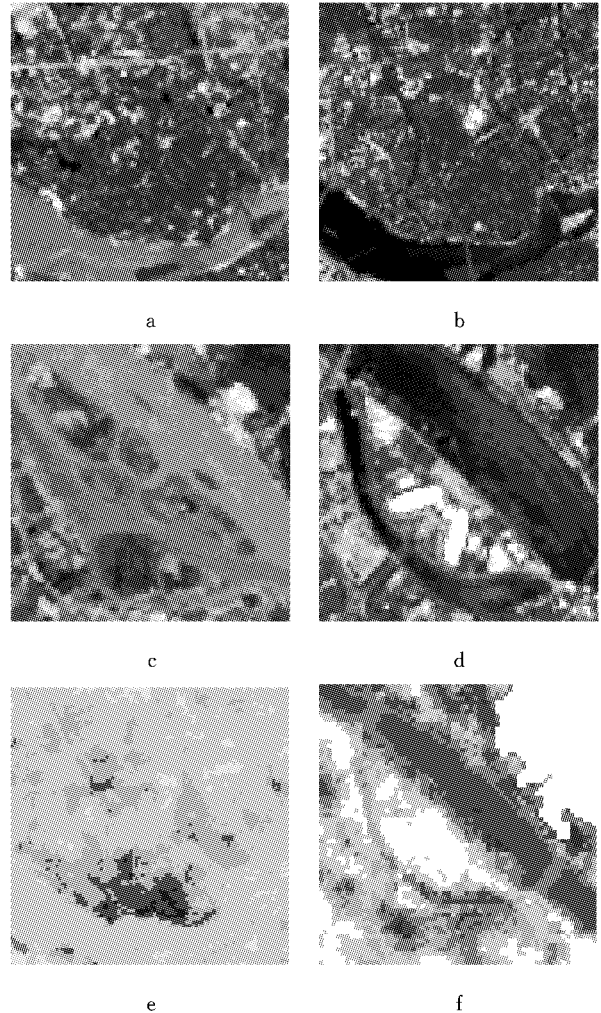


图 7 典型城市热岛效应变化区域

Fig.7 Areas showing typical UHI change

反观图 7c,该处为位于福州闽江口的浦下洲湿地,1989 年以水体、植被和滩涂为主,生态环境良好。但此处却被规划为“海峡国际会展中心”并于 2010 年竣工投入使用,由图 7d 可见,至 2013 年曾经的湿地已消失殆尽,地表被水泥广场和高反射建筑材料等大量不透水面所覆盖,使得地表温度等级大幅度上升(见图 7f),该区域也从非热岛区变为显著热岛区。

3 城市热岛变迁的成因及对策分析

根据以上分析,可对福州市城市热岛效应变迁的主要成因进行分析:

(1)城市下垫面类型和性质的根本性转变。城市

下垫面类型与性质是影响城市热岛强度的重要因素,不同覆被情况的土地对太阳辐射的吸收、反射及透过率不同,导致对城市热岛强度贡献的显著区别^[41-42].研究表明,不透水面和地表温度之间存在指数函数关系,若不透水面比例越高,地表温度上升就越快^[43].在研究期的 24 年间,福州城市下垫面类型和性质发生了根本性转变,不透水面占比从 55.62% 升高到 78.06%,植被从 38.80% 降低到 15.9%,水体也有不同程度降低.不透水面的增加大量侵占了本属于植被和水体的面积,严重削弱了植被和水体对于区域热环境的调节作用,使热量更多地表现为显热交换形式^[44],此消彼长之下导致了地表温度的不断攀升及城市热岛效应的步步加剧.

(2)城市下垫面景观格局的显著变化:城市下垫面的景观格局,是下垫面热环境相关参数的所有斑块在空间上的组合及分布特征,反映了不同的土地利用状况、人类活动及经济发展对地表温度的影响.福州城市下垫面的景观格局在 24 年间发生了巨大的变化(表 3),不透水面面积在主城区占比大幅升高的同时,斑块数目不断减少,斑块平均面积增加近 7 倍,破碎度显著降低,斑块趋于集聚;而植被和水体面积在主城区的占比则不断减少,特别是植被的斑块数目显著增多,平均面积迅速下降,斑块破碎度升高.这些最终导致了构成热岛的斑块数目激增,平均面积增大,热岛斑块不断地扩大和集聚,形成了显著的城市热岛效应(图 6).

表 3 主城区下垫面各参数景观特征

Tab.3 Characteristics of urban biophysical components in the main urban area

地表类型	景观特征	1989	2013
不透水面	占主城区比/%	55.58	78.06
	斑块数/个	243	173
	破碎度	4.180	0.748
	平均面积/km ²	13.297	104.420
热岛斑块	URI	0.29	0.53
	斑块数/个	156	511
	破碎度	6.922	3.170
	平均面积/km ²	14.446	31.548
植被	占主城区比/%	38.80	15.9
	斑块数/个	402	1795
	破碎度	6.915	7.756
	平均面积/km ²	5.607	2.050
水体	占主城区比/%	5.64	5.15
	斑块数/个	147	246
	破碎度	2.529	1.063
	平均面积/km ²	2.231	4.846

(3)城市通风廊道受阻:福州地貌为典型河口盆地,四周被群山环抱,东西南北分别为鼓山、旗山、五

虎山和莲花峰,不利于气流流动,易造成盆地内温度升高.海风的主要进风口位于盆地东南角的闽江沿岸,但该区域却是房地产开发的热门板块——“江滨板块”所在地,近年来不断兴建大量高层住宅,其密集程度犹如一面屏风挡住了这个福州的主要进风口.而高层写字楼最密集的五一路——五四路一线,呈北 10°西走向,大致与福州夏季主导风向东南风相垂直,进一步削弱了本就所剩无几的风力.至于高层建筑群(带)与高层建筑群(带)之间,则多形成静风热量积聚环境^[45].另外,城市的通风廊道以城市道路为主要载体,但低于全国平均水平的福州道路网建设规模以及较弱的道路贯通性,都加剧了城市的热岛效应.

针对以上存在的问题,可以采取相应措施来改善福州城市热环境:

(1)优化城市下垫面类型配比:大面积的绿地和水体对其所在地及周边范围的下垫面均具有较为明显的降温作用.在制定城市规划时,不仅要考虑每年扩绿、扩水面积,还应考虑绿地及水体的分布和“连散成片”的规模效应,降低破碎度.对于福州市目前的下垫面格局,除了定期保持城市中大型水体如西湖,左海的清淤工作,还可以对有条件扩张的水体进行扩容,如五四路北段的琴亭湖.对于城市绿地面积尚无法成规模增加的现状下,应“以点带面”,提倡推广垂直绿化和屋顶绿化,大力发展街道绿化.

(2)改善城市通风廊道:适当增加城市道路网建设规模,根据地理环境(如地形、风向、风速等条件)确定道路网的方位、宽度;限制闽江沿岸高层建筑高度,降低该区域建筑密度,留出通风空间;开辟一定宽度的东南方向城市风道,引风入城,适当分散高层建筑,并对新规划、新开发建筑使用低表面粗糙度的外墙材料.

4 结语

24 年间,随着城市化进程的加快和建成区的不断扩展,福州由一个非“火炉”城市变为“三大火炉”之首.城市不透水面面积大幅增加了 22.5%,植被和水体面积则显著降低,城市主要风道被大量高层建筑遮挡,城市热岛比例指数(URI)从 0.29 到 0.53,近乎翻番,以此为标志的城市热岛效应不断加剧.虽然局部区域热岛效应有所缓解,但仍有高达 84.05% 的城区面积温度等级有不同程度的上升,城市整体热环境形势越发严峻.

为缓解福州城市热岛效应,改善城市热环境,在城市规划和改造进程中要有意识的从整体上降低不透水面覆盖率,保证连片、成规模的绿地和水体稳步增长,有针对性地增加老城区及CBD等高建筑用地比例地区的植被覆盖,更好地改善城市下垫面的热环境状况。另外,要着重保证城市风道的通畅,降低闽江沿岸的建筑高度和建筑密度,增加城市道路路网建设规模,尽可能地开辟新的通风廊道,以降低福州的城市热岛效应,促进城市的健康可持续发展。

参考文献:

- [1] XU H Q, CHEN B Q. Remote sensing of the urban island and its changes in Xiamen City of SE China [J]. *Journal of Environment Sciences*, 2004, 16(2): 276.
- [2] GOBAKIS K, Kolokotsa D, Synnefa A, *et al.* Development of a model for urban heat island prediction using neural network techniques [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2011, 1(2):104.
- [3] SOBRINO J A, Oltra-Carrió R, Soria G, *et al.* Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 117: 50.
- [4] COSEO P, Larsen L. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 117.
- [5] LI L, CHAN P W, WANG D, *et al.* Rapid urbanization effect on local climate: intercomparison of climate trends in Shenzhen and Hong Kong, 1968—2013 [J]. *Climate Research*, 2015, 63(2): 145.
- [6] JIN K, WANG F, CHEN D, *et al.* Assessment of urban effect on observed warming trends during 1955—2012 over China: A case of 45 cities [J]. *Climatic Change*, 2015, 132(4): 631.
- [7] 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.
- [8] JR CHAVEZ P S. Image-based atmospheric corrections-Revisited and revisited [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, 62(9): 1025.
- [9] GEORGESCU M, MOUSTAOU M, MAHALOV A, *et al.* Summer-time climate impacts of projected megapolitan expansion in Arizona [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 37.
- [10] SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434.
- [11] 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.
- [12] JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, SOBRINO C J, SORIA 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.
- [13] QIN Z, KARNIELI A, BERLINER P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel—Egypt border region [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18): 3719.
- [14] QIN Z H, ZHANG M, ARNON K. Split window algorithms for retrieving land surface temperature from NOAA-AVHRR data [J]. *Remote Sensing for Land Resources*, 2001(48): 33.
- [15] WAN Z, 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.
- [16] 毛克彪, 覃志豪, 施建成, 等. 针对 MODIS 影像的劈窗算法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(8): 703.
MAO K, QIN Z, SHI J, *et al.* The research of split-window algorithm on the MODIS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(8): 703.
- [17] ARTIS D A, CARNAHAN W H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, 12(4): 313.
- [18] WENG Q H, LU D, SCHUBRING J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 467.
- [19] CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893.
- [20] 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.
XU Hanqiu. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3):741.
- [21] USGS. Using the USGS Landsat 8 Product [EB/OL]. [2015-10-12]. http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php.
- [22] NICHOL J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2005, 71(5): 613.
- [23] CARLSON T N, Arthur S T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective [J]. *Global & Planetary Change*, 2000, 25(1):49.
- [24] MELESSE A M. Spatiotemporal Dynamics of land surface parameters in the Red River of the North Basin [J]. *Physics & Chemistry of the Earth*, 2004, 29(11):795.
- [25] 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.
XU Hanqiu. Analysis on urban heat island effect based on the dynamics of urban surface biophysical descriptors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(14): 3890.
- [26] QUATTROCHL D A, LUVALL D A, RICKMAN D L, *et al.* A decision support information system for urban landscape

- management using thermal infrared data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000, 66(10):1195.
- [27] XU H Q, DING F, WEN X L. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 2(2), 74.
- [28] 中华人民共和国国家环保部. 中华人民共和国环境保护行业标准(试行):HJ/T192—2015[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China. Technical criterion for ecosystem status evaluation: HJ/T192—2015 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市生态建设环境绩效评估导则(试行)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural of People's Republic of China. Environmental performance evaluation of urban ecological construction [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [30] 唐菲, 徐涵秋. 旧城改造与城市热岛效应关系的遥感研究——以福州市苍霞片区为例[J]. *地理科学*, 2011, 31(10):1228.
TANG Fei, XU Hanqiu. The relationship between urban reconstruction and urban heat island effect based on remote sensing technology: Cangxia District of Fuzhou City, China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(10):1228.
- [31] QIAO Z, TIAN G, ZHANG L, *et al.* Influences of urban expansion on urban heat island in Beijing during 1989—2010 [J]. *Advances in Meteorology*, 2014(2014): 1.
- [32] Pan J. Area delineation and spatial-temporal dynamics of urban heat island in Lanzhou City, China using remote sensing imagery [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016, 44(1): 111.
- [33] 高歆, 吴国玺, 杜根远, 等. 面向城市热环境格局时空演变的多重分形模式——以郑州市为例[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6774.
GAO X, WU G X, DU G Y, *et al.* A Spatio-temporal changes of thermal landscape pattern based on a multifractal model: a case study of Zhengzhou City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6774.
- [34] 苏雅丽, 张艳芳. 基于 Landsat TM/ETM+ 的西安市城市热岛效应时空演变[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 230.
SU Y L, ZHANG Y F. Spatio-temporal characteristics of urban heat island effect of Xi'an city based on Landsat TM/ ETM+ [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(5): 230.
- [35] 李乐, 徐涵秋. 杭州市城市空间扩展及其热环境变化[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(2):264.
LI Le, XU Hanqiu. Urban expansion and thermal environment changes in Hangzhou city of east China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(2):264.
- [36] HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295.
- [37] XU H. Modification of the normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025.
- [38] XU H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269.
- [39] ZHA Y, GAO J, NI S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 583.
- [40] 徐涵秋, 王美雅. 地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1270.
XU Hanqiu, WANG Meiya. Remote sensing-based retrieval of ground impervious surfaces [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1270.
- [41] HIROYUKI Kusaka, MOTOKI Nishimori, TETSUZO Yasunari. Estimation of the increasing rate of surface air temperature associated with urbanization by use of seasonal variations of maximum/minimum temperature anomaly [J]. *Weather*, 1998(5), 31.
- [42] XIAN G, CRANE M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(2): 147.
- [43] 徐涵秋. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J]. *生态学报*, 2009, 29(5): 2456.
XU Hanqiu. Quantitative analysis on the relationship of urban impervious surface with other components of the urban ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2456.
- [44] WILSON J S, CLAY M, MARTIN E, *et al.* Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 303.
- [45] 郑朝洪, 张安, 邓娴芬, 等. 福州市热岛效应的监测与探讨[J]. *城市管理与科技*, 2004, 6(3):103.
ZHENG Chaohong, ZHANG An, DENG Xianfen, *et al.* Monitoring and analysis of urban heat island of Fuzhou [J]. *Urban Management Science & Technology*, 2004, 6(3):103.