

DOI: 10.5846/stxb201607251516

林荣平, 祁新华, 叶士琳. 沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制研究——以福州市为例. 生态学报, 2017, 37(1): - .

Lin R P, Qi X H, Ye S L. Spatial-temporal Characteristics of Urban Heat Islands and Driving Mechanisms in a Coastal Valley-basin City: A Case Study of Fuzhou City. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制研究 ——以福州市为例

林荣平¹, 祁新华^{2,*}, 叶士琳³

1 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

3 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

摘要: 针对以往热岛研究中缺少自然-人文多维因子组合作用的成因分析, 本文基于 landsat TM/OLI 遥感影像反演福州市 1991、2000 及 2013 年河谷盆地亮温热场, 并利用主成分多元回归方法探讨 DMSP/OLS 夜间灯光、交通密度、地表非渗透面、地面高程、地表植被、水体等多维因素对城市热岛的综合影响及联动关系。研究发现: ①1991—2013 年盆地热岛辐射范围不断蔓延, 老城区成为热岛核心区, 呈中心向外辐射并沿江扩展态势, 盆地“溢出”现象显著; ②盆地内平原-山地温差达 10—14℃, 热岛面积出现两极分化, 23 年间热岛面积共增加 226.9 km², 其中高温区面积增长四倍, 年增长率最大 (7.50%); ③夜间灯光、交通路网密度、地表非渗透面、地表植被、地面高程及水体每变化 1 个单位, 温度将分别变化 0.430、0.418、0.103、-0.031、-0.469 及 -0.096; ④人文促进作用大于自然抑制作用, 综合作用下盆地升温 0.35 个单位; ⑤相比地表非渗透面, 夜间灯光与交通密度对热岛的增温贡献更为显著; 地面高程主导降温作用, 其次为水体与地表植被, 后两者作用之和仅为地面高程的 27%。福州盆地当前的生态环境并不足以缓解城市未来进一步发展而导致的热岛加剧, 当保持城市现有发展规模且自然作用进一步增加 60% 时, 降温抑制作用才会明显。

关键词: 城市热岛; 多维因子; 组合影响; 河谷盆地; 福州

Spatial-temporal Characteristics of Urban Heat Islands and Driving Mechanisms in a Coastal Valley-basin City: A Case Study of Fuzhou City

LIN Rongping¹, QI Xinhua^{2,*}, YE Shilin³

1 School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Previous literature on cause analyses of urban heat islands (UHI) lacks perspective from the combined effects of natural and humanity factors. With this prerequisite, the present study used Landsat TM/OLI remote sensing images to extract urban thermal fields of Fuzhou city, a typical valley basin in China, during 1991, 2000, and 2013. The combined effect and linkage relationship between the multidimensional factor and UHI was also explored using DMSP/OLS, traffic density, and land surface information indexes, including normalized difference building index (NDBI), digital elevation model (DEM), normalized difference vegetation index (NDVI), and modified normalized difference water index (MNDWI), based on GIS and principal component multiple regression. The results revealed that (1) the UHI of the Fuzhou valley basin has spread outward along the Minjiang River while the inner-city has become the core area of the UHI,

基金项目: 国家基础科学人才培养 (J1210067); 福建师范大学优秀青年骨干教师培养基金 (fjsdjk2012071)

收稿日期: 2016-07-25; **修订日期:** 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fjqxh74@163.com

commencing its significant overflow heat phenomenon from the center to outer edge from 1991; (2) the temperature difference between the plain and mountainous areas in the basin reached 10—14 °C, and the UHI area displayed a polarization appearance indicating that both the low and high temperature areas have tendency to increase. Moreover, the high temperature area increased four times to 138.5 km² between 1991 and 2013, with an average annual growth rate of 7.5%; 3) according to the coefficient simulation, the basin temperature changed by 0.430%, 0.418%, 0.103%, -0.0310%, -0.469%, and -0.0963% as the night light intensity, NDBI, traffic density, NDVI, DEM, and MNDWI increased every 1%, respectively; (4) the human promoting effect was greater than the natural inhibition on the UHI, resulting in the basin warming by 0.35 units; and (5) in comparison to the NDBI, night light intensity and traffic density contributed more significantly to the warming of the UHI, and the cooling effect of surface elevation is prominent, followed by water and surface vegetation, with these accounting for only 27% of the surface elevation effect. In addition, the cooling effect was obvious when the natural effect further increased by 60% and Fuzhou city simultaneously remains at the existing developmental scale. This also reveals that the current ecological environment of the Fuzhou basin is not enough to alleviate the UHI caused by future development of the city.

Key Words: urban heat island; multidimensional factor; combined effect; valley basin; Fuzhou

全球变暖已成为当今普遍共识,2013 年联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,1880—2012 年全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势,且随气候持续变暖,高温热浪将变得更加频繁^[1-2]。在此背景下,城市气候问题,尤其是城市热岛效应愈发瞩目。城市热岛是城市化气候效应最显著特征之一^[3-4],近年来影响范围不断扩大,对区域气候变化、城市大气环境格局、能源消耗和居民健康带来的影响日益强烈^[5]。有研究数据表明,欧洲国家夏季气温每上升 1K,电力需求将增加 1.66%^[6],更有法国、美国、日本、墨西哥等国家每年因高温造成数百上千人死亡^[7-8]。

当前城市热岛研究已取得一定成果,学者们对许多城市的热岛成因^[9]、形态特征^[10]、过程演化^[11]及模拟预测^[12]等方面开展了大量工作。在热岛特征方面,不少研究基于城-郊气象站点观测资料或遥感影像指出地区热岛发展的时空特征及年代演变过程^[13-15],原因分析上则侧重将单一因子与热岛温度回归拟合,构建地温与信息指数(如 NDVI、NDBI 等)定量关系^[16,17],由此发现城市化建设过程中的地表覆盖或土地利用变化等人类活动是促成城市热岛效应的重要原因^[18-19]。例如 Schlünzen 等人结合德国汉堡大都市区 45 个气象站点数据资料,指出市区在夏季及冬季的增温现象明显,高密度建成区均温比外围地区高出 1.1K^[20];Jong-Seong 等人对韩国 40 座城市的站点气温数据与城市人口规模进行趋势拟合,结果显示 1975—2005 年人口规模每增长 100 万,气温升高 0.44°C^[21];借由 Landsat 7 遥感影像反演印度孟买及德令哈市两大城市地温,Grover 等人分析热岛空间分布差异并将其与归一化植被指数进行拟合,认为 NDVI 与孟买热岛效应负相关性更为明显^[22];曹爱丽等人利用城郊站点温差数据指出上海 1951—2006 年城郊温差增温率为 0.23°C/10a,并将其分别与人口、建成区面积、房屋竣工面积等指标进行相关分析,发现住宅建设是上海城市热岛最主要原因^[23];徐涵秋针对不透水面与城市生态要素的关系研究表明福州市城市不透水面高比例地区升温效应明显^[24];水体作用同样突出,王美雅等人通过提取遥感影像水体信息发现水体比例每增加 10%,地表温度将会减少 1.70°C^[25]。此外,其他同类研究还发现地区 GDP、产业结构及能源消耗^[26-27]等因素也会对城市热岛效应产生不同程度影响。

实际上,热岛与影响因素并非简单的一维线性关系,仅通过单个因素相关分析或回归模型推断变量与城市热岛之间的因果关系,而不考虑其他因素的互动影响,会使得相关研究成果存在缺陷,忽略各因素在自然-人文多维因子交互、组合影响下的实际作用程度。虽然现有研究试图运用新因素、新方法进行实证分析,例如徐涵秋利用逐步回归方法指出不透水面对地面温度的影响可接近或超过植被和水体之和^[28];戴晓燕等人利用决策树挖掘土地利用程度、人口及工业区密度等多种因素与城市热岛的相互关系^[29],但总体上,城市热岛

多维影响关系的综合定量认知与组合评价仍相对较少,相应机理性分析和案例验证不足。

在研究对象方面,特殊生态系统、特殊地域对全球变化,特别是对气候变化的响应问题逐渐成为科学界热点^[30]。不同于平原地区,河谷盆地因相对封闭的地形地貌和内在多变的人类活动成为高温热浪多发区域,且中国山地丘陵众多、分布广,面积约占国土陆地总面积的 43%^[31],在此基础上形成的河谷型城市具有很强的典型性和区域性^[32]。但在前人研究中,盆地特有地形特征(如地面高程差异)对热岛的影响并未得到详尽阐明^[15,17,33]。

综上,本文尝试以河谷盆地城市为研究对象,通过 GIS 与主成分多元回归方法探讨自然-人文多维因子与盆地热岛的联动关系,以充分认识主要因素对城市热场的组合影响,深化城市热岛驱动机制研究。本文内容将关注以下 3 个方面:①河谷盆地热岛空间如何分布及其影响辐射范围;②量化自然-人文多维度影响因素与热岛互动关系;③以往研究中作用突出的因素能否被其他因素取代或是在组合作用下仍否保持显著作用。

1 研究区域概况

福州市位于中国东南沿海,为福建省会城市,属亚热带季风气候,是典型河口盆地(面积 576 km²)^[34],东、西和北三面为中低山,南面和东南面为丘陵,地势自西向东倾斜,空间上为东南向开口的簸箕状地形,城市建成区、乡镇集镇和农村居民建设用地多集中于此,区内有闽江南北两支横贯市区东流入海。

经多年发展,福州已成为东南沿海重要现代产业基地,产业门类发达,电子信息、机械工业等产业发展迅速,2014 年市辖区城镇化水平超过 97%^①。现今福州是海上丝绸之路重要门户及中国(福建)自由贸易试验区三片区之一。随经济高速发展,福州城市气候问题愈发突出,主要表现为市区气温升高。2003 年福州城区创下 1957 年以来持续高温时间最长纪录(连续 24 天最高气温超过 36℃)^[35],2007 年出现持续高温天数创百年记录^[36]。据 1981—2010 年年均高温日数,福州市以年均 32.6 天超过重庆 29.6 天成为“内地大城市最热城市”^[37]。特别是 20 世纪末以来,福州气温上升趋势明显(见图 2),1980—2012 年气温倾向率达到 0.388℃/10a(1953—2012 年为 0.212℃/10a)。福州市近年来高温频数、强度正逐渐增大。

本文以福州市中心城区作为研究区,相应研究范围依据福州市城市总体规划(2008—2020 年)划分,主要包括福州市 5 区(晋安区除寿山、鼓岭、甘溪、宦溪外),以及闽侯县荆溪镇、琯头镇、南屿镇等地,面积共 1443 平方公里,人口达 306 万人^[38](下文的晋安区、闽侯县等均指中心城区范围内所涉区域)。

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 亮温反演

传统温度数据来源于气象站点观测资料,无法全面反映大、中空间尺度连续性地表温度及其形态结构与扩展态势,故本文采用遥感影像反演地面亮温获取研究区范围内的时空热场。地面亮温为地表温度、地表比辐射率、大气温度以及大气透过率等因素的综合体现,是热环境研究常用手段^[39]。

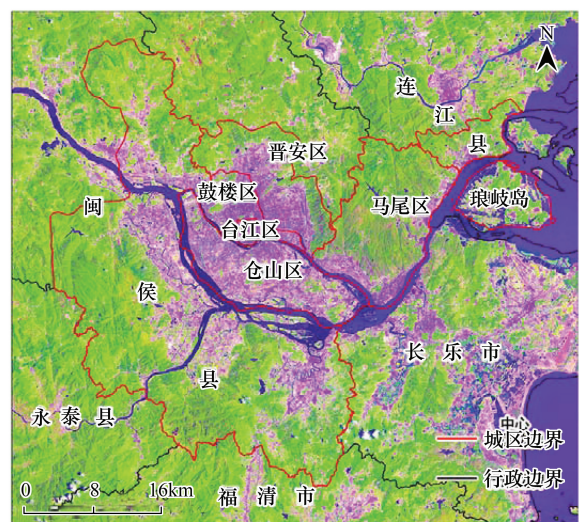


图 1 福州市中心城区范围

Fig.1 The scope of Fuzhou center city

① 数据来源:福建省统计年鉴, <http://www.stats-fj.gov.cn/xxgk/ndsj/>

① 辐射定标

将 Landsat5 TM 遥感影像上 B6 波段 (Landsat8 为 B10 波段) DN 值转换为辐射亮度, 相应定量关系为^[40]:

$$L_{\lambda} = L_{\min(\lambda)} + (L_{\max(\lambda)} - L_{\min(\lambda)}) Q_{dn} / Q_{\max} \quad (1)$$

其中, L_{λ} 为卫星传感器所接收的光谱辐射强度 ($\text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), Q_{dn} 为像元 DN 灰度值, $Q_{\max}$ 为遥感影像上像元最大的 DN 灰度值, 即 $Q_{\max} = 255$, $L_{\max(\lambda)}$ 为传感器最大辐射强度, $L_{\min(\lambda)}$ 为传感器最小辐射强度。式中各参数可分别从影像数据头文件获取。

② 亮温计算

$$T = \frac{K_2}{\ln(1 + K_1/L_{\lambda})} - 273.15 \quad (2)$$

式中, T 为地面亮温 ($^{\circ}\text{C}$), K_1 和 K_2 为系数常量, 对于 Landsat5 TM 影像, $K_1 = 60.776 \text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1260.56 \text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 。对于 Landsat8 OLI 影像, $K_1 = 77.489 \text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$, $K_2 = 1321.08 \text{W m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ 。

2.1.2 地表信息

① 归一化植被指数 (NDVI)^[41]:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}) \quad (3)$$

式中, NIR、Red 分别为 B4、B3 波段, 为 Landsat5 TM 影像相应波段 DN 值, Landsat8 OLI 遥感影像对应为 B5、B4 波段。

② 归一化建筑指数 (NDBI)^[42]:

$$\text{NDBI} = (\text{MIR} - \text{NIR}) / (\text{MIR} + \text{NIR}) \quad (4)$$

式中, NIR 表示近红外波段, MIR 表示中红外波段, 分别为 Landsat5 TM 影像的 B4、B5 波段, Landsat8 OLI 遥感影像对应 B5、B6 波段。

③ 改进归一化差异水体指数 (MNDWI)^[43]:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{MIR}) / (\text{Green} + \text{MIR}) \quad (5)$$

式中, Green 为绿光波段, 对应 Landsat5 TM 影像的 B2 波段, MIR 为中红外波段, 对应 Landsat5 影像 B5 波段。对于 Landsat8 OLI 影像, 两者分别对应 B3、B6 波段。

2.1.3 主成分多元回归

本文从高温热场增减两方面影响机制着手, 选取与盆地热岛变化相关的人文、自然因素进行相关性分析与主成分多元回归分析, 相关方法参见文献^[44]。计算过程均基于 SPSS18.0 及 ArcGIS10.0 平台进行。

2.2 数据来源

本文矢量数据来源于国家地理信息中心, 部分道路数据根据电子地图数字化; DMSP/OLS 夜间灯光数据来源于美国地球物理数据中心 (NGDC)^[45]; 数字地面高程来源于美国空间信息协会 (CGIAR-CSI)^[46]; 遥感影像来源于地理空间数据云^[47]。出于遥感数据质量与可获取性, 选取 1991 年 8 月 24 日、2000 年 6 月 29 日及 2013 年 8 月 4 日遥感影像, 所有影像均在夏季成像。1991、2000 年 Landsat TM 影像数据 B6 波段分辨率为 120m, 2013 年 Landsat OLI 数据 B10 波段分辨率为 100m, 为便于比较, 将 2013 年遥感影像及其他数据重采样成 120 m。

3 结果与分析

3.1 城市热岛空间分布特征

根据前述亮温反演计算方法 (公式 1—2), 经 ArcGIS10.0 软件处理获取福州市中心城区 1991、2000 及

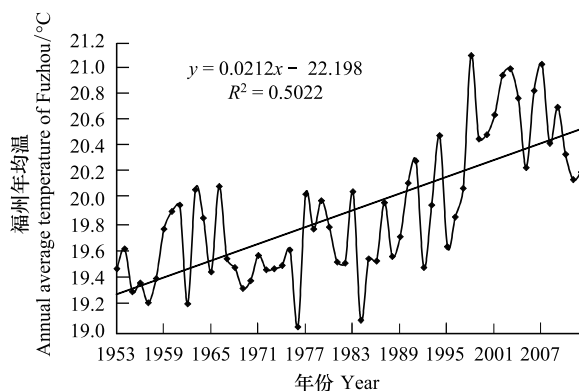


图2 1953—2012 年福州市年均气温

Fig. 2 The annual average temperature of Fuzhou city from 1953—2012

数据来源: 中国气象科学数据共享服务网, <http://cdc.cma.gov.cn/>

2013 年的地面亮温(见表 1、图 3)。城区相应温度范围为 19.34℃—32.73℃、21.60℃—38.35℃ 及 25.30℃—42.06℃,平均值从 1991 年的 26.15℃ 升至 2000 年的 30.15℃,至 2013 年平均温度进一步上升至 32.89℃。由于 1991、2000 年福州老城区以外的部分山地被云层覆盖,故对三期遥感影像进行掩膜处理以保证研究区域一致性。

表 1 福州市中心城区地面亮温统计(℃)

Table 1 The statistics of brightness temperature in Fuzhou center city

时间 Time	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Avg.
1991	19.34	32.73	26.15
2000	21.60	38.35	30.15
2013	25.30	42.06	32.88

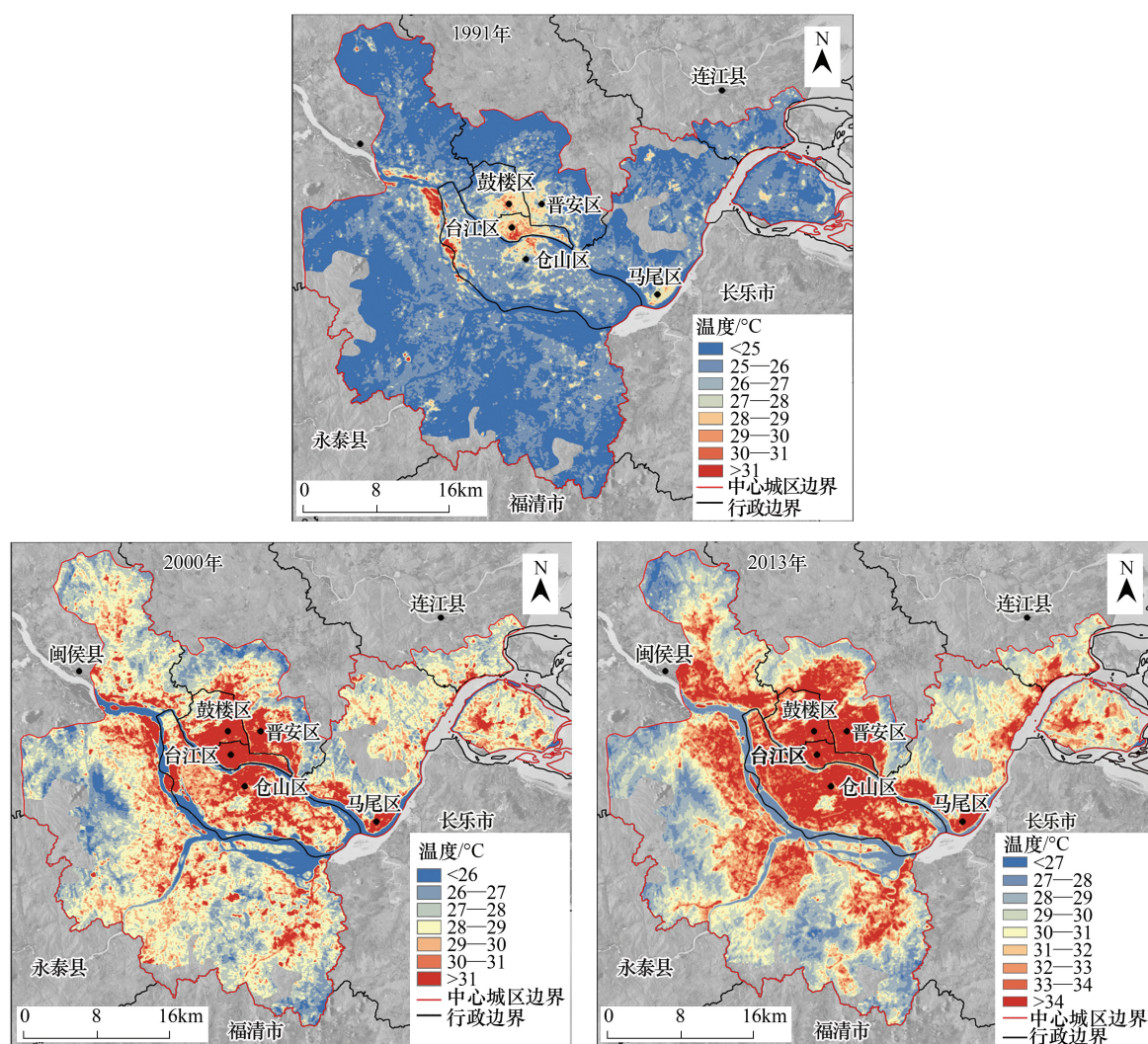


图 3 1991—2013 年福州市中心城区亮温分布

Fig.3 The distribution of brightness temperature in Fuzhou center city from 1991—2013

在 1991 年,福州中心城区热岛辐射影响微弱,城区平均温度为 26.15℃,高温区集中于老城区(鼓楼、台江、仓山及晋安区)以及闽侯县与仓山区交界地带,其中,闽侯县与仓山区交界地带高温区主要为上街镇至乌龙江湿地公园黄土地。老城最高温度达到 32.73℃,周边郊区的山体、水体平均温分别为 22.5℃ 与 24.

25℃,与城区最高温度差异分别为 10.23℃及 8.49℃。2000 年,高温范围在 1991 年基础上扩大,均温较 1991 年增长 4℃。老城区的台江、鼓楼区大部分、晋安区南部及与仓山区中部地区成为热岛覆盖区,研究区平均温度超过 30℃,部分地区最高增至 38.35℃,盆地内的山地丘陵与水体温度增至 27.13℃与 25.12℃,马尾区至台江区沿闽江一带还出现明显的条带状高温集聚区。至 2013 年,中心城区热岛效应进一步加剧,均温上升至 32.88℃。除鼓楼区金牛山、西湖公园,仓山区高盖山等地,以及晋安区金鸡山至寨顶山一带的公园、山地外,老城区已成为福州市热岛核心区。在其周围,西起闽侯荆溪镇、上街镇(大学城),南至南屿镇、南通镇等地,东抵马尾区及闽江出海口两岸,均出现密集高温覆盖区,最高温达 42.06℃,郊区山地、水体均温亦出现小幅度上升,增至 29.96℃、27.24℃,与城内最高温差分别为 12.1℃及 14.82℃。

整体上,1990—2013 年福州城区平均温度及其与地势较高的郊区温差达到 10—14℃。热岛现象呈中心向外及沿江蔓延态势,高温扩展范围与盆地内近年来建设用地扩张方向保持同步性,盆地内建设用地率先成为热岛覆盖区,其余地表类型也出现不同程度升温。未来热岛范围连片发展及“溢出”盆地态势显著。

3.2 城市热岛时间演变特征

为消除时间影响,对各年份亮温进行标准化处理,并采用自然断点分级法划分为低温区、次中温区、中温区、次高温区及高温区五级。不同年份、等级的亮温面积统计见表 2。

表 2 1991—2013 年福州主城区亮温等级面积统计 (km²)

Table 2 The statistics of level area of brightness temperature in Fuzhou center city from 1992 to 2013

时间 Time	低温区 Low temperature	次中温区 Secondary middle temperature	中温区 Middle temperature	次高温区 Sub high temperature	高温 High temperature
1991	107.7	521.1	542.8	106.7	28.2
2000	135.0	524.3	349.9	212.5	84.8
2013	306.8	388.1	249.8	223.3	138.5

由表 2 及图 4 可知,城区热场由中温区、次中温区不断向低温区与高温区转变,出现两极分化。低温区面积比由 1991 年的 8.24% 上升至 2013 年的 23.48%。次高温区与高温区面积比分别由 1991 年的 2.16%、8.17% 增至 2013 年的 10.60% 与 17.09%。而中温区与次中温区所占比例表现出递减趋势,分别由 1991 年的 41.55%、39.89% 降至 2013 年的 19.12% 及 29.71%,减幅明显。

在 1991—2013 年的 22a 间,热岛面积(次高温区、高温区)由 1991 年的 134.9km² 增加至 2013 年的 361.8 km²,占盆地面积的 62.81%,热岛面积共增加 226.9km²。其中,高温区变化最快,2013 年约为 1991 年的四倍(增长 391.13%),年均增长 7.50%,低温区、次中温区、中温区及次高温区面积增长率则分别为 4.87%、-1.33%、-3.47% 及 3.41%。福州盆地热岛效应影响差异愈发明显。

3.3 城市高温驱动机制

3.3.1 影响因素

结合上述盆地热环境的空间分布特征分析,自然地貌环境和城市发展建设等均会形成不同高温热场。鉴于数据可量化性及对比高温环境增、减机制影响程度,本文将福州市盆地高温环境的影响因素分为人文、自然

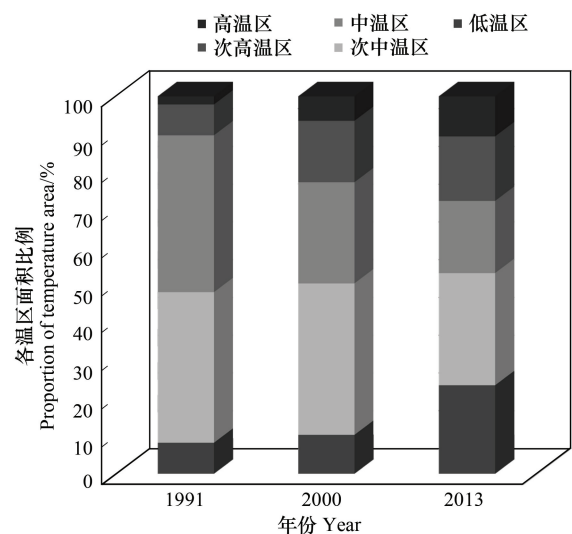


图 4 1991—2013 年福州主城区亮温等级面积

Fig.4 The statistics of level area of brightness temperature in Fuzhou center city from 1992—2013

两方面,具体指标见表 3 与图 5。其中人文因素包括人口规模、地表非渗透面、交通密度,自然因素为生态环境(植被、水体)与地形地貌。人口规模主要反应人类活动强度及其空间分布对热岛影响,由夜间灯光强度表示;交通密度主要测度机动车二氧化碳排放影响;地表非渗透面为能源辐射和热传导,由 NDBI 指数表征;植被指数、水体指数及 DEM 主要反应盆地自然生态环境的降温作用。

表 3 福州市中心城区高温环境影响因素指标

Table 3 The indicator of factors for heat environment in Fuzhou center city

一级指标 First-class index	二级指标 Secondary index	三级指标 Third-class index
人文因素 Humanistic factors	人口规模	DMS/OLS 夜间灯光强度
	交通密度	交通路网密度
	地表非渗透面	NDBI(归一化建筑指数)
自然因素 Natural factors	生态环境	NDVI(归一化植被指数)
		MNDWI(改进归一化差异水体指数)
	地形地貌	DEM(数字地面高程)

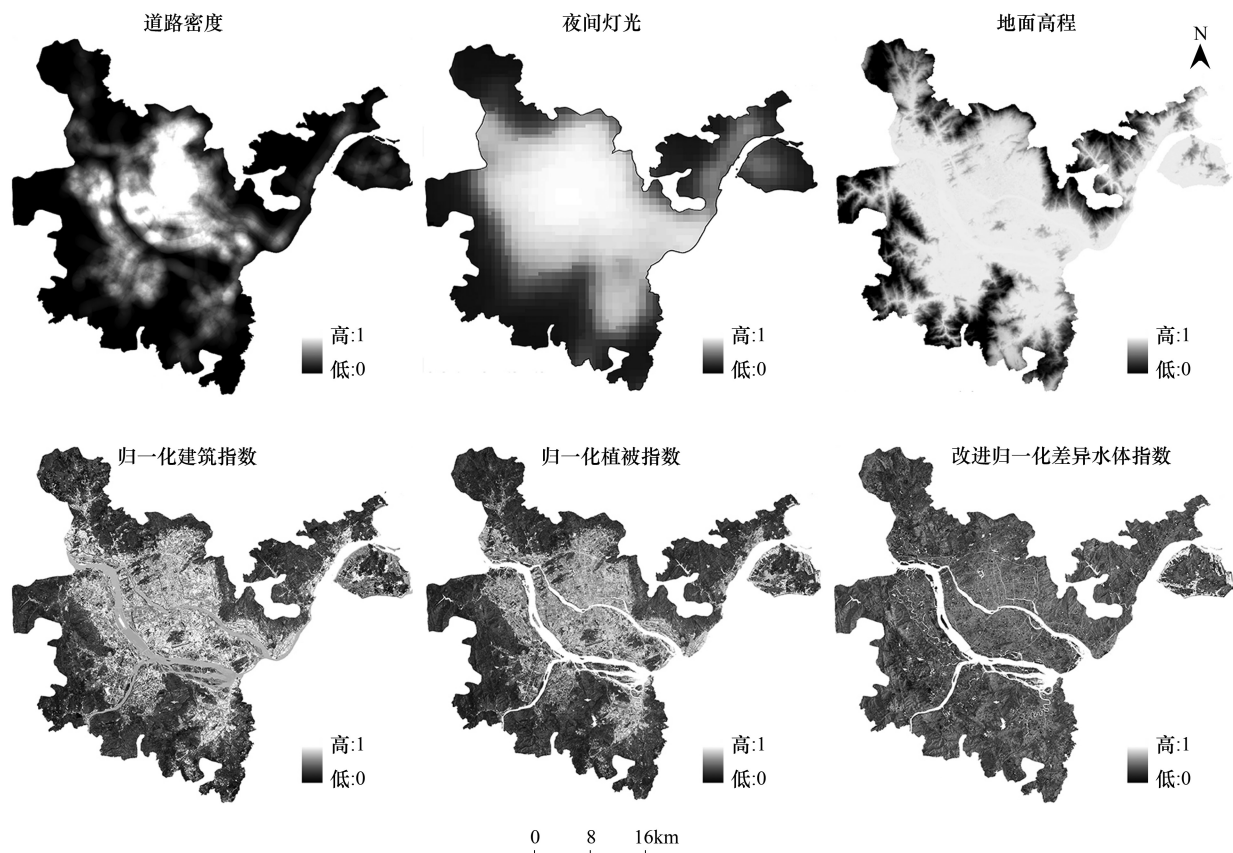


图 5 福州市中心城区高温环境影响因素的空间分布

Fig.5 The distribution of factors for heat environment in Fuzhou center city

3.3.2 主成分分析

经主成分分析计算,各因素主成分贡献率见表 4。其中第一主成分贡献率达到 70.988%,第二、三主成分贡献率分别为 12.530%及 7.404%,累积贡献率达到 90.922%,取前三个主成分作为促成盆地高温环境的主要因素变量。

表 4 主成分分析主要结果

Table 4 The main results of principal component analysis

指标 index	特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	主成分特征向量 Eigenvectors of principal component		
				z_1	z_2	z_3
夜间灯光 DMSP/OLS	7.389	70.988	70.988	0.754	0.389	0.405
交通路网密度 Density of traffic network	1.304	12.530	83.518	0.384	0.286	-0.305
地表非渗透面 NDBI	0.770	7.404	90.922	0.214	-0.280	-0.045
地表植被 NDVI	0.652	6.269	97.192	-0.354	0.722	-0.175
地面高程 DEM	0.287	2.761	99.953	-0.323	0.164	0.809
水体环境 MNDWI	0.004	0.046	100	0.092	-0.376	0.236

结合主成分特征向量值(表 4 $z_1 - z_3$), 第一主成分 z_1 主要为夜间灯光强度, 其次为交通路网密度等。第二主成分 z_2 与地表植被关系最为明显, 第三主成分 z_3 则主要表现为地面高程, 故将福州中心城区高温环境的影响因素归结为人类活动因子(z_1)、地表植被因子(z_1)以及地面高程因子(z_3)。3 个主成分同各指标间的线性关系为:

$$z_1 = 0.754x_1 + 0.384x_2 + 0.214x_3 - 0.354x_4 - 0.323x_5 + 0.092x_6 \quad (6)$$

$$z_2 = 0.389x_1 + 0.286x_2 - 0.280x_3 + 0.722x_4 + 0.164x_5 - 0.376x_6 \quad (7)$$

$$z_3 = 0.405x_1 - 0.305x_2 - 0.045x_3 - 0.175x_4 + 0.809x_5 + 0.236x_6 \quad (8)$$

3.3.3 盆地热岛与影响因素关系

对研究区平均分布 3092(有效采样点 3082)个采样点进行 3 个主成分数值提取, 并与上述城区亮温进行回归拟合, 相应计算结果见表 5:

表 5 回归系数及检验结果

Table 5 The regression coefficients and test results

模型 Model	非标准化系数 Unstandardized Coefficients		标准系数 Standardized coefficients	t	显著系数 Sig.	共线性统计量 Collinearity statistics	
	B	标准误差 Std. Error				容差 Tolerance	方差膨胀因子 VIF
常量 Constant	35.942	0.645		55.695	0.000		
Z1	0.256	0.004	0.661	57.548	0.000	0.972	1.029
Z2	0.168	0.010	0.195	17.010	0.000	0.978	1.022
Z3	-0.405	0.013	-0.355	-31.244	0.000	0.992	1.008

$$R^2 = 0.705, F = 1573.549, \text{Sig.} < 0.001$$

由回归后的关系模型结果, 福州盆地高温与上述自然-人文影响因素的回归方程拟合度较好, 模型总体 F 值为 1573.549, 各变量均通过 1% 显著性水平检验, 说明上述三类主成分均是影响城市热岛的重要因子, 且各变量方差膨胀因子(VIF)远小于 10, 模型不存在多重共线性问题。为比较自然-人文不同量纲指标间的作用程度, 本文采用标准化回归模型:

$$T' = 0.661z_1 + 0.195z_2 - 0.355z_3 \quad (9)$$

该模型表明人类活动因子(z_1)对该盆地温度的影响程度更为显著, 其次为地面高程因子(z_3)、地表植被因子(z_2)。将上述主成分公式(公式 6—8)代入, 模型进一步转化为:

$$T' = 0.430x_1 + 0.418x_2 + 0.103x_3 - 0.031x_4 - 0.469x_5 - 0.096x_6 \quad (10)$$

由公式 10, 以上人文、自然因素每变化 1 个单位, 福州盆地温度将分别变化 0.430、0.418、0.103、-0.031、-0.469 及 -0.096。由此表明, 当地人文因素推动、促进盆地热岛的蔓延扩张, 其中夜间灯光 x_1 、交通密度 x_2 的正向影响较为突出, 贡献度分别为 0.430、0.418, 地表非渗透面 x_3 的作用程度为 0.103, 分别约为前两者的 25%。而自然因素对盆地热岛的发展起负向作用, 其中地面高程 x_5 的抑制作用最为明显(-0.469), 其次为水

体 x_6 (-0.096) 与地表植被 x_4 (-0.031), 水体与地表植被制作用作用之和明显低于地面高程, 仅相当于地面高程作用的 27%。

结合以上各因子作用程度, 人文、自然因素每增加 1 个单位, 将使得温度变化 0.951 及 -0.596 个单位, 综合作用下地区将升温 0.355 个单位, 即人文因素对于当前热岛形成蔓延的促进作用明显大于自然抑制作用。考虑自然、人文两方面相互作用程度, 假设将人文促进作用缩小一定比例, 同时扩大相同比例自然抑制作用规模, 则当人文促进作用程度缩小至 70%, 自然因素作用在原基础增加 30% 时, 地区才会出现明显降温 (见表 6)。

表 6 不同作用等级下的城市温度
Table 6 The city temperatures of different level effect

人文作用 Humanistic function		自然作用 Natural effect		温度 Temperature
作用程度 Degree	等级 Level	作用程度 Degree	等级 Level	
0.951	100%	-0.596	100%	0.355
0.8559	90%	-0.6556	110%	0.2003
0.7608	80%	-0.7152	120%	0.0456
0.6657	70%	-0.7748	130%	-0.1091
0.5706	60%	-0.8344	140%	-0.2638
0.4755	50%	-0.8344	150%	-0.3589

实际上, 城市随经济社会发展很难将现有人文因素对热岛的促进作用缩小一定等级比例, 在自然环境方面发挥、强化城市当地的山水特色才是减缓城市热岛效应的重要举措。对比人文、自然两方面作用程度 (0.951 与 -0.596), 在保持现有人类活动规模下, 只有进一步增加自然因素作用 60% 时, 自然环境的升温抑制作用才会明显。

3.3.4 盆地热岛成因分析

福州盆地热岛的蔓延与其建设用地制约及城市发展模式有关。福州市中心城区群山环抱, 背山面海, 山地区和丘陵区包围盆地中心, 城市发展用地局限于盆地内的河谷平原及低丘。河谷盆地中部的的主要城区内, 城市下垫面建筑密集, 政府机关、企事业单位集中, 大量人口及经济社会活动 (包括科研文教、医疗卫生、企业生产等) 集聚, 许多低容积率但高建筑密度的建筑楼群、棚户区充斥于城区, 人类活动能源消耗及热量排放大。加之盆地特殊的地形特征, 空气流动较差, 不利于建筑物、水泥地和混凝土吸收贮存的能量向外扩散, 造成城区气温升温明显, 城-郊、平原-山地气温差异扩大。

在空间发展上, 福州市老城区内屏山、乌山和于山已近全部开发利用, 老城边缘的平原、低丘继而成为城市未来发展建设的主要地貌类型。受盆地周围高丘、山地制约, 中心城区布局的晋安、马尾、青口、亭江、荆溪及上街南屿南通等多个产业集聚区, 及荆溪组团、上街南屿南通组团与青口组团等均环绕盆地内的老城区, 使得逐渐兴起并连片分布的居住区、工业用地与不透水路面向老城区外围组团、新城蔓延, 并逐渐占据老城区周边原有自然植被、农田, 已有超过 45% 耕地资源成为福州市增加的建筑用地^[48]。盆地地形用地紧约束下的城区高强度开发, 以及植被水体等天然生态环境的取代等均推动了城区高温热场的形成, 并将进一步对福州市目前及其未来的城市生态环境产生极大的负面影响。

4 结论与讨论

针对以往热岛驱动研究中缺少自然-人文多维因子组合作用的成因分析, 本文利用 landsat TM/OLI 遥感影像反演福州市 1991—2013 年河谷盆地高温热场, 探究 DMSP/OLS 夜间灯光、地面高程、地表植被指数及其他地表信息对热岛的组合影响及相互关系。研究发现 1991—2013 年福州盆地热岛呈现出中心向外辐射并沿江扩展态势, 平原与山地温差扩大 (10—14℃), 且热岛面积出现两极分化, 高温区平均年增长率最高。其次, 人文促进作用大于自然抑制作用, 夜间灯光、交通路网密度、地表非渗透面、地表植被、地面高程及水体均对地

区温度产生不同程度影响,其中夜间灯光、交通密度与地面高程作用显著。在综合作用下中心城区将升温 0.35 个单位。

值得注意的是,在夜间灯光、交通密度等因素作用下,地表非渗透面对热岛的贡献作用并不突出,这可能是夜间灯光及交通密度间接代表的人口规模、能源利用强度及热量释放过程比地表非渗透面的热量传导及能量辐射作用更为强烈。其次,地表植被与水体对于减缓热岛的抑制作用较弱,作用之和明显低于地面高程。虽然本文研究结果表明人类活动是促成城市热岛的重要原因,与多数研究成果相一致,但对比前人利用福州地表植被、水体等回归拟合结果^[24-25],这些因素在本研究中均未表现突出(即使采用非标准化模型)。这表明,除本文采样点数量及指标因素影响外,利用单个影响因子与热岛进行关系分析很有可能忽略了综合作用下该因子实际贡献程度,即单因素回归分析下该因素作用程度偏高。

另外,有别于地表植被与水体,地面高程差异并非城市建设过程中人类活动可控资源,福州盆地目前的自然地表覆被情况对于规模逐渐扩大的城市活动而言,作用收效较低,并不足以缓解城市进一步发展而导致的热岛加剧。虽然本研究结果表明,城市保持现有发展规模且自然因素发挥原有 1.6 倍作用程度时,盆地热岛将出现明显降温现象,但地面高程为其中降温抑制主体,这意味着原本作用收效较低的植被、水体成为今后城市降温主要实施对象,须进一步合理布局与扩大规模以强化生态因子的降温作用。

长时间序列的成因分析更有助于反映上述影响因子对热岛空间分布及蔓延扩张的贡献价值。本文希望研究内容有助于深化全球变暖背景下对城市热岛效应成因分析认知,明确自然-人文多维影响因素间相关关系和相关程度。就本文研究结果,如何最大化发挥、利用福州市现有山水特色,并在此基础上合理调整城市开发密度,以及建设城市风廊与海绵城市等或许是当前解决福州城市热岛问题新突破点。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press. (2013-09-30) [2013-09-30]. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI12Doc2b_FinalDraftAll.pdf.
- [2] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [3] 王亚婷, 范连连. 热岛效应对植物生长的影响以及叶片形态构成的适应性. 生态学报, 2011, 31(20): 5992-5998.
- [4] 贾宝全, 邱尔发. 基于 TM 卫星遥感影像的西安市城市热岛效应变化分析. 干旱区研究, 2013, 30(2): 347-355.
- [5] 谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展. 地理科学进展, 2011, 30(1): 35-41.
- [6] Santamouris M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island-a review of the actual developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 26: 224-240.
- [7] Caravantes R E D, Luque A L C, Gallegos P A. Mortality by Excessive Natural Heat in Northwest Mexico: Social Conditions Associated with this Cause of Death. Frontera Norte, 2007, 26(52): 155-177.
- [8] Kim D W, Deo R C, Chung J H, Lee J S. Projection of heat wave mortality related to climate change in Korea. Natural Hazards, 2016, 80(1): 623-637.
- [9] 陈辉, 古琳, 黎燕琼, 慕长龙. 成都市城市森林格局与热岛效应的关系. 生态学报, 2009, 29(9): 4865-4874.
- [10] 张好, 徐涵秋, 李乐, 樊亚鹏. 成都市热岛效应与城市空间发展关系分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 70-78.
- [11] 拉巴次仁, 卓嘎, 罗布, 普布次仁. 拉萨市城市热岛的时空分布特征. 资源科学, 2012, 34(12): 2364-2373.
- [12] 苗峻峰. 城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展. 大气科学学报, 2014, 37(4): 521-528.
- [13] 杨萍, 肖子牛, 刘伟东. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析. 大气科学, 2013, 37(1): 101-112.
- [14] 易予晴, 龙腾飞, 焦伟利, 彭剑威, 刘慧婵, 凌赛广. 武汉城市群夏季热岛特征及演变. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1279-1285.
- [15] 贾伟, 高小红. 河谷型城市热岛空间分布格局演变及对策——以南宁市区为例. 地球信息科学学报, 2014, 16(4): 592-601.
- [16] 刘宇峰, 原志华, 孔伟, 孙铂, 安彬. 1993-2012 年西安城区城市热岛效应强度变化趋势及影响因素分析. 自然资源学报, 2015, 30(6): 974-985.
- [17] 韩春峰, 张友水, 陈友飞. 多时相影像福州市不透水面城市地表温度的空间分布研究. 遥感信息, 2010, (6): 79-86.
- [18] Eliasson I, Svensson M K. Spatial air temperature variations and urban land use-a statistical approach. Meteorological Applications, 2006, 10(2): 135-149.
- [19] 彭保发, 石忆邵, 王贺封, 王亚力. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律——以上海市为例. 地理学报, 2013, 68(11): 1461-1471.

- [20] Schlünzen K H, Hoffmann P, Rosenhagen G, Riecke W. Long-term changes and regional differences in temperature and precipitation in the metropolitan area of Hamburg. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(8): 1121-1136.
- [21] Kug J S, Ahn M S. Impact of urbanization on recent temperature and precipitation trends in the Korean peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 49(2): 151-159.
- [22] Grover A, Singh R B. Analysis of urban heat island (uhi) in relation to normalized difference vegetation index (ndvi): a comparative study of delhi and mumbai. *Environments*, 2015, 2: 125-138.
- [23] 曹爱丽, 张浩, 张艳, 马蔚纯. 上海近 50 年气温变化与城市化发展的关系. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1663-1669.
- [24] 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. *生态学报*, 2009, 29(5): 2456-2462.
- [25] 王美雅, 徐涵秋, 付伟, 林中立, 李霞, 张博博, 唐菲. 城市地表水体时空演变及其对热环境的影响. *地理科学*, 2016, 36(6): 1009-1105.
- [26] 杨旺明, 蒋冲, 喻小勇, 崔雪峰. 气候变化背景下人为热估算和效应研究. *地理科学进展*, 2014, 33(8): 1029-1038.
- [27] 姚从容. 城市化进程中人口变动对气候变化的影响机制: 理论框架与协整检验. *城市发展研究*, 2012, 19(10): 86-91, 103-103.
- [28] 徐涵秋. 基于城市地表参数变化的城市热岛效应分析. *生态学报*, 2011, 31(14): 3890-3901.
- [29] 戴晓燕, 张利权, 过仲阳, 吴健平, 栗小东, 朱燕玲. 上海城市热岛效应形成机制及空间格局. *生态学报*, 2009, 29(7): 3995-4004.
- [30] 杜军, 翁海卿, 袁雷, 马鹏飞, 拉巴. 近 40 年西藏怒江河谷盆地的气候特征及变化趋势. *地理学报*, 2009, 64(5): 581-591.
- [31] 曾祥坤, 范嵘, 高峰. 基于资源整合的河谷盆地地区城镇空间布局规划研究——以梅州市为例 // 转型与重构——2011 中国城市规划年会论文集. 南京: 中国城市规划学会, 2011.
- [32] 杨永春. 中国河谷型城市研究. *地域研究与开发*, 1999, 18(3): 61-65.
- [33] 张建明, 王鹏龙, 马宁, 张超. 河谷地形下兰州市城市热岛效应的时空演变研究. *地理科学*, 2012, 32(12): 1530-1537.
- [34] 张文开. 福州城市地貌与城市气候关系分析. *福建师范大学学报: 自然科学版*, 1998, 14(4): 96-102.
- [35] 王朝春. 城市气候高温化的成因与对策——以福州市城区为例. *城市问题*, 2006, (9): 98-102.
- [36] 林雅茹. 建设节约型的城市园林绿化——福州持续高温 36 天引发的思考. *福建建筑*, 2008, (9): 18-19.
- [37] 新华网. 官方发布内地“新四大火炉” 福州成为高温王者. (2013-07-16) [2016-02-05]. http://news.xinhuanet.com/2013-07/16/c_125012838.htm.
- [38] 福州市城乡规划局. 福州市城市总体规划 2011-2020. (2015-08-05) [2016-02-23]. http://ghj.fuzhou.gov.cn/ghzs/ztgh/201508/t20150805_920381.htm.
- [39] 徐永明, 覃志豪, 朱焱. 基于遥感数据的苏州市热岛效应时空变化特征分析. *地理科学*, 2009, 29(4): 529-534.
- [40] 马伟, 赵珍梅, 刘翔, 闫东川. 植被指数与地表温度定量关系遥感分析——以北京市 TM 数据为例. *国土资源遥感*, 2010, (4): 108-112.
- [41] 黄荣峰, 徐涵秋. 利用 Landsat ETM+影像研究土地利用/覆盖与城市热环境的关系——以福州市为例. *遥感信息*, 2006, (5): 36-39.
- [42] 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. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1325-1331.
- [43] 夏俊士, 杜培军, 张海荣, 刘培. 基于遥感数据的城市地表温度与土地覆盖定量研究. *遥感技术与应用*, 2010, 25(1): 15-23.
- [44] 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 侯明行. 自然条件下海滨湿地土壤生态过程与景观演变的耦合关系. *自然资源学报*, 2013, 28(1): 63-72.
- [45] National Center for Environmental Information. DMSP-OLS nighttime lights time series. [2016-01-15]. <http://www.ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>.
- [46] CGIAR-CSI. SRTM, SRTM 90m Database. [2016-01-15]. <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/listImages.asp>.
- [47] 中国科学院计算机网络信息中心·科学数据中心. Landst 系列数据. [2016-01-16]. <http://www.gscloud.cn/>.
- [48] 叶琳, 徐涵秋. 近 20 年来福州市土地利用时空变化的遥感分析. *地球信息科学学报*, 2008, 10(1): 80-87.