

# 闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系

沈中健, 曾 坚

(天津大学建筑学院, 天津 300072)

**摘要:** 基于厦门、漳州、泉州三市 1996—2017 年的 Landsat 遥感数据与夜间灯光数据, 应用总体耦合态势模型及协调性模型探讨了城镇发展与地表温度的时空耦合规律, 并运用标准差椭圆、双变量空间自相关及景观指数分析两者之间的空间响应规律, 结果表明: 1996—2017 年, 闽南三市表征城镇发展变化的夜间灯光与地表温度的空间分布呈现出与地形、区位等因素的空间耦合性。三市夜间灯光与地表温度的总体耦合态势不断加强, 协调类型逐渐增多; 城镇发展早期, 夜间灯光对地表温度的影响存在滞后性, 在城镇发展后期, 夜间灯光则对地表温度的影响呈超前性; 夜间灯光与地表温度呈正相关关系, 空间溢出效应明显。夜间灯光对地表温度的正向影响逐渐加强, 其与地表温度的 HH、LL 聚集不断扩张; HH 集聚连片趋势明显。厦门的城镇发展对地表温度的影响更显著, 而在泉州、漳州则较弱。本文可为闽南三市热环境优化提供科学指导。

**关键词:** 地表温度; 热环境; 城市发展; 夜间灯光; 空间自相关; 闽南三市

DOI: 10.11821/dlxb202103006

## 1 引言

中国正经历快速城镇化阶段, 预计至 2030 年, 中国城镇化率将达到 70%<sup>[1]</sup>。城镇发展及其引发的城镇下垫面物理属性变化与人为热排放的集中, 是城镇热环境恶化及热岛效应产生的重要原因<sup>[2-3]</sup>。目前, 热岛效应已成为影响生态环境、居民健康及可持续发展的重大环境问题<sup>[4]</sup>。深入分析城镇发展对热环境空间特征及动态变化的影响, 对探索缓解热岛效应的策略、优化城镇热环境质量具有重要意义。

当前, 相关学者开展了大量关于城镇发展与热环境关系的研究, 主要依托气象观测与遥感技术, 多以地表温度 (Land Surface Temperature, LST) 作为热环境的量化指标<sup>[5]</sup>。研究内容多聚焦于以下 2 个方面: ① 以不透水地表表征城镇土地覆盖, 分析城镇发展引发的土地变化对 LST 的影响。众多学者建立了不透水地表盖度<sup>[6-7]</sup>、归一化建筑指数<sup>[8-9]</sup>及不透水地表景观格局指数<sup>[10-11]</sup>与 LST 的数学模型, 或探讨 LST 空间分布对不透水地表演变的响应规律<sup>[12-15]</sup>; ② 探讨人类活动等城镇发展的社会经济要素与 LST 的关系。相关研究分析了人口密度<sup>[16]</sup>、经济发展状况<sup>[8, 17]</sup>、人类活动的强度<sup>[18]</sup>及类型<sup>[19-20]</sup>对 LST 的影响机制。

然而, 不透水地表、人口、经济等单一地理要素难以综合反映城镇发展的空间信息, 量化城镇发展的指标应包含经济、人口、土地 3 个方面的内容<sup>[21]</sup>。星载传感器观测到

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-10-18

**基金项目:** 国家重点研发计划(2016YFC0502903); 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目(15JZD025); 国家自然科学基金项目(51708387); 教育部人文社科基金项目(17YJCZH013) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0502903; Major Projects of Philosophy and Social Sciences of the Ministry of Education, No.15JZD025; National Natural Science Foundation of China, No.51708387; Human and Social Science Foundation of Ministry of Education of China, No.17YJCZH013]

**作者简介:** 沈中健(1991-), 男, 山东济南人, 博士生, 研究方向为城市热环境。E-mail: 619445503@qq.com

的夜间灯光(Nighttime Light, NTL)是从网格单元的尺度上准确、综合反映城镇发展的良好数据源<sup>[21-22]</sup>。众多分析表明,NTL的像元值与经济密度<sup>[21, 23]</sup>、人口密度<sup>[24-25]</sup>、城镇化水平<sup>[26]</sup>、能源消耗<sup>[26-27]</sup>等评估城镇发展的各类指标显著相关,经济活动强度越高、人口密度越大、建设用地越多的区域,NTL越大。有些学者运用夜间灯光数据,从全国范围<sup>[28-29]</sup>、区域尺度<sup>[30-31]</sup>及城市尺度<sup>[8, 32-33]</sup>,探讨了城镇发展与LST分布的关系。这些研究表明,伴随城镇发展,城镇的热岛效应对周边区域的升温作用加强,城镇边缘地区地表升温最显著。

尽管当前研究取得了众多成果,但仍存在以下问题:①研究方法多以相关性分析、普通线性回归分析为主,忽视了城镇发展与LST的空间异质性,难以深入探讨城镇发展的空间变异性对LST的影响;②研究区域多局限于单个地区,缺乏对不同地区的比较分析。不同地区城镇的空间格局及发展状况并不一致,对单个地区的分析结果难以为不同地区的宏观决策提供支撑<sup>[32]</sup>。

厦门、漳州、泉州三市位于闽南地区,山地与丘陵面积占比超过80%,热环境特征较为典型。三市地理区位及环境相似,但城镇发展差异明显。本文运用1996—2017年的Landsat 遥感数据及夜间灯光数据,以NTL表征城镇发展状况,旨在比较分析厦门、漳州、泉州三市城镇发展与LST的空间关系,运用总体耦合态势模型、协调性模型揭示城镇发展与LST的时空耦合规律,利用标准差椭圆、双变量空间自相关及景观指数探讨城镇发展对LST的驱动机制,以期为闽南地区城镇的热环境优化提供科学依据。

## 2 研究区概况与研究方法

### 2.1 研究区概况

闽南三市(未包含泉州市金门县)面积总计25314.39 km<sup>2</sup>(图1),冬季温暖湿润,夏季炎热潮湿。该地区是海峡西岸经济区及海上丝绸之路的重要节点。至2017年底,三市的常住人口与地区生产总值分别占福建全省的45.0%和47.5%。区域城镇化水平已由2002年的35%增长至2017年的69%<sup>[34]</sup>。在快速发展的同时,该地区热岛效应也日益凸显。据统计,1996年该地区城镇年平均气温仅比乡村高1.41℃,至2017年城镇年平均气温已比乡村高6.08℃,热岛效应成为该地区亟待解决的环境问题。三市虽然地理环境相似,但城镇发展差异明显。至2017年底,厦门、漳州、泉州的城镇化水平分别为89.01%、56.20%、64.50%<sup>[34]</sup>,这种巨大差异,必然导致城镇发展对LST的影响机制有所不同。

### 2.2 数据处理

#### 2.2.1 数据来源及预处理

本文选取覆

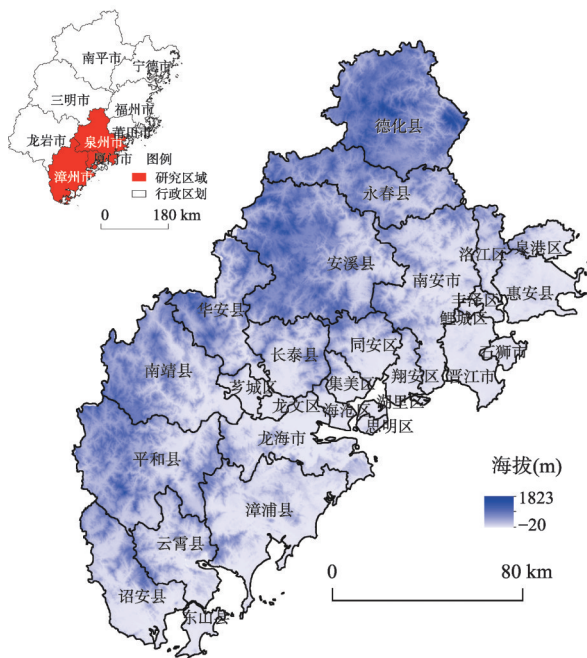


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic map of Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou of southern Fujian, China

盖闽南三市 1996 年、2002 年、2007 年、2012 年、2017 年的清晰少云、成像于 9 月、10 月的 Landsat 遥感影像,数据来自美国 USGS 数据中心 (<https://glovis.usgs.gov/>)。1996 年、2002 年、2007 年的遥感影像为 Landsat 5 TM 数据,2012 年的遥感影像为 Landsat 7 ETM+ 数据,2017 年的遥感影像为 Landsat 8 OLI 与 TIRS 数据。运用 ENVI 5.3 软件进行几何校正、大气校正、图像镶嵌、研究区裁剪等预处理,并通过 ENVI 5.3 软件中的支持向量机 (Support Vector Machine),采用目视解译与监督分类将研究区域分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、裸地。

本文采用 1996 年、2002 年、2007 年、2012 年的 DMSP/OLS 夜间灯光数据,及 2017 年的 NPP/VIIRS 夜间灯光数据,两种夜间灯光数据均来自美国国家地球物理数据中心网站 (<http://www.ngdc.noaa.gov/>),参考相关研究的方法<sup>[30, 35]</sup>对数据进行融合去噪、切割、辐射校正等处理。

由于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的像元值具有饱和效应,为使 DMSP/OLS 与 NPP/VIIRS 数据能有效衔接,本文参考已有成果<sup>[31]</sup>对 1996—2012 年的 DMSP/OLS 夜间灯光数据进行去饱和处理,方法如下:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

$$VANUI = 1 - NDVI \times NTL_{Nor} \quad (2)$$

式中:  $NDVI$  为归一化植被指数,  $NIR$ 、 $RED$  分别为 Landsat 影像中的近红外波段、红波段;  $NTL_{Nor}$  为归一化的 DMSP/OLS 夜间灯光像元值,  $VANUI$  为去饱和处理后的夜间灯光像元值。对 1996—2012 年的  $VANUI$  与 2017 年的  $NTL$  数值进行相关性检验,结果显示,5 个时段的数据均符合正态分布,相邻两时段的相关系数普遍大于 0.885,相关系数均通过了 0.01 水平的显著性检验。时间序列的  $VANUI$  与  $NTL$  数据经一阶差分分析,属于一阶单整序列,且在 0.01 水平上显著。这表明去饱和处理后的 DMSP/OLS 数据与 NPP/VIIRS 数据在时间上有连续性,可以结合使用。

**2.2.2 地表温度反演** 通过 Landsat 影像中的热红外波段,运用辐射传输方程 (Radiative Transfer Equation, RTE)<sup>[20, 36]</sup>反演地表温度 (LST)。

首先,通过  $NDVI$  计算地表比辐射率,计算方法<sup>[18]</sup>如下:

$$P_v = [(NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})]^2 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_v = 0.9625 + 0.0614 \times P_v - 0.0461 \times P_v^2 \\ \varepsilon_b = 0.9589 + 0.086 \times P_v - 0.0671 \times P_v^2 \\ \varepsilon_w = 0.995 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_v$  为混合像元中植被的比例,  $NDVI$  为归一化植被指数,  $NDVI_{min}$  与  $NDVI_{max}$  分别为裸露土壤与植被的归一化植被指数值,取值分别为 0.05 与 0.70<sup>[18]</sup>;  $\varepsilon_v$ 、 $\varepsilon_b$ 、 $\varepsilon_w$  分别为自然表面、建设用地、水体的比辐射率,其中自然表面即植被与裸露土壤组成的混合像元,建设用地表面即不透水地表与植被、裸露土壤的混合像元<sup>[8, 10]</sup>。

其次,根据 Landsat 数据中的热红外波段的像元值计算相应的辐射亮度 ( $L_\lambda$ ),进而计算亮度温度 ( $T_s$ ),最后将亮度温度转化成地表温度,计算过程如下:

$$L_\lambda = M_L \times DN + A_L \quad (5)$$

$$B(T_s) = [L_\lambda - L_{atm \uparrow} - \tau \times (1 - \varepsilon) \times L_{atm \downarrow}] / (\varepsilon \times \tau) \quad (6)$$

$$T_s = K_2 / \ln \left[ \frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right] \quad (7)$$

式中:  $DN$  为热红外波段的像元值,  $M_L$  与  $A_L$  分别对热红外波段进行辐射定标的斜率与增

益;  $B(T_s)$  为黑体辐射亮度;  $L_{\text{atm}} \uparrow$  与  $L_{\text{atm}} \downarrow$  分别为大气向上与向下的辐射亮度;  $\tau$  为大气透过程;  $T_s$  为地表温度;  $K_1$ 、 $K_2$  为定标常数。其中  $L_{\text{atm}} \uparrow$ 、 $L_{\text{atm}} \downarrow$ 、 $\tau$  是在 NASA 提供的网站 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/>) 中, 通过输入成像时间、中心经纬度等相关参数后计算得出,  $M_L$ 、 $A_L$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  均从遥感影像的头文件 (MTL) 中查得。

通过研究区域内厦门站、同安站、晋江站等 12 个气象站实测的对应日期的 LST, 验证反演结果的精确性, 数据来自于中国地面气候资料日值数据库 (<http://data.cma.cn/>)。检验发现反演的 LST 与实测的 LST 的绝对误差均小于 4.65 °C, 相对误差均小于 15%。此外, 反演的 LST 与实测的 LST 的 pearson 相关系数均大于 0.792, 所有相关性分析结果均通过了 0.01 水平的显著性检验。因此, 反演结果符合后续研究的精度要求。

通过均值/标准差法<sup>[37]</sup>, 根据 LST 将研究区域分为高温区、次高温区、中温区、次低温区、低温区 5 个热力等级, 高温、次高温区定义为热岛区<sup>[38]</sup>。

**2.2.3 数据网格化** 综合考虑夜间灯光数据的空间分辨率及相关研究成果<sup>[8, 30-33]</sup>, 本文借助 ArcGIS 10.2 软件, 将研究区分为 1 km×1 km 的网格单元, NTL 图像中所有像元的中心点即网格单元的中心, 提取每个网格单元中的 NTL, 并计算网格单元中 LST 的平均值, 作为该网格单元的 LST, 以实现两种数据的统一, 并采用极差标准化方法<sup>[12, 37]</sup>对 LST、NTL 进行归一化处理。

## 2.3 研究方法

**2.3.1 总体耦合态势模型** 总体耦合态势模型通过比较不同空间变量加权中心的距离及移动方向的相似性, 以衡量空间变量演化的耦合态势<sup>[14, 39]</sup>。空间变量的加权中心距离越近, 两者加权中心的移动轨迹夹角越小, 则两者的总体耦合性越高。总体耦合态势模型的计算方法<sup>[14]</sup>如下:

$$C_t(X_t, Y_t) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n m_{ti} X_{ti}}{\sum_{i=1}^n m_{ti}}, \frac{\sum_{i=1}^n m_{ti} Y_{ti}}{\sum_{i=1}^n m_{ti}} \right) \quad (8)$$

$$L = \sqrt{(X_{LST,t} - X_{NTL,t})^2 + (Y_{LST,t} - Y_{NTL,t})^2} \quad (9)$$

$$\alpha = \arccos \left( \frac{\Delta X_{LST} \times \Delta X_{NTL} + \Delta Y_{LST} \times \Delta Y_{NTL}}{\sqrt{(\Delta X_{LST}^2 + \Delta Y_{LST}^2) \times (\Delta X_{NTL}^2 + \Delta Y_{NTL}^2)}} \right) \times \pi \quad (10)$$

式中:  $C_t$  为 NTL 或 LST 的加权中心;  $X_t$ 、 $Y_t$  分别为  $t$  时期加权中心的坐标;  $m_{ti}$  是  $t$  时期像元  $i$  中 LST 或 NTL 的数值;  $X_{ti}$ 、 $Y_{ti}$  分别为  $t$  时期像元  $i$  的中心坐标;  $L$  为  $t$  时期 NTL 与 LST 加权中心的空间距离;  $X_{LST,t}$ 、 $Y_{LST,t}$  与  $X_{NTL,t}$ 、 $Y_{NTL,t}$  分别为  $t$  时期 LST 与 NTL 加权中心的坐标;  $\alpha$  为某一时段内 LST 与 NTL 加权中心的移动轨迹的夹角;  $\Delta X_{LST}$ 、 $\Delta Y_{LST}$  与  $\Delta X_{NTL}$ 、 $\Delta Y_{NTL}$  分别表示与上一时期相比, LST 与 NTL 加权中心坐标的变化值。

**2.3.2 协调性模型** 协调性模型能反映两个变量发展演化的协调程度<sup>[40-41]</sup>。本文引入协调性模型, 以定量反映城镇发展与 LST 变化的协调水平。计算方法<sup>[39]</sup>如下:

$$O = \frac{|(UR + TR)/\sqrt{2}|}{\sqrt{UR^2 + TR^2}} \quad (11)$$

式中:  $O$  为 NTL、LST 变化的协调系数;  $UR$ 、 $TR$  分别为 NTL、LST 的年平均增长率。由公式 (11) 可以看出,  $0 \leq O \leq 1$ ,  $O$  越接近 1, 表示  $UR$ 、 $TR$  两者变化协调性越高,  $O$  越接近 0, 表示  $UR$ 、 $TR$  两者变化的协调性越低<sup>[42]</sup>。若  $0.8 < O \leq 1.0$ , 则  $UR$ 、 $TR$  协调度较



强,属于协调类型;若  $0.5 < O \leq 0.8$ , 则两者协调度一般,属于磨合类型;若  $0 \leq O \leq 0.5$ , 则两者协调度较弱,属于拮抗类型<sup>[42]</sup>。

**2.3.3 标准差椭圆** 标准差椭圆 (Standard Deviation Ellipse) 是揭示空间要素分布及变化的空间统计方法<sup>[7]</sup>。以 NTL 为  $x$  轴变量、LST 为  $y$  轴变量,构建两者的二维散点图。利用标准差椭圆识别相对集聚的散点区域,综合描述 NTL 与 LST 的相关关系<sup>[7, 36]</sup>:

$$P = \left( \sqrt{\frac{\sum_1^n x_i'^2}{n}}, \sqrt{\frac{\sum_1^n y_i'^2}{n}} \right) \quad (12)$$

$$R = \arctan \left( \frac{\sum_1^n x_i'^2 - \sum_1^n y_i'^2 + \sqrt{(\sum_1^n x_i'^2 - \sum_1^n y_i'^2)^2 + 4 \sum_1^n x_i' y_i'}}{2 \sum_1^n x_i' y_i'} \right) \times \pi \quad (13)$$

$$D = \frac{\sum_1^n (x_i' \cos R - y_i' \sin R)^2}{\sum_1^n (x_i' \sin R - y_i' \cos R)^2} \quad (14)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i' \sin R - y_i' \cos R)^2}{n}} \quad (15)$$

式中:  $P$  为标准差椭圆的中心坐标;  $x_i'$ 、 $y_i'$  分别为 NTL 与 LST 二维散点  $i$  的坐标;  $n$  为散点总数;  $R$  为标准差椭圆的方向角,表征二维散点分布的主导方向,能反映 LST 对 NTL 响应的灵敏度,其值越小,即散点分布方向的斜率越大,意味着 NTL 增加 1 个单位, LST 的升幅越大;  $D$  为方向性指标,其值越大即散点分布的方向性越明显;  $S$  为离散性指标,其值越大即散点离散程度越强。

**2.3.4 双变量空间自相关** 空间自相关分析可揭示空间变量的分布是否与邻近的变量有关,分为全局空间自相关与局部空间自相关。Anselin 提出的双变量空间自相关分析 (Bivariate Moran's  $I$ )<sup>[43]</sup>,可以有效反映两类变量空间分布的关联与依赖特征<sup>[44]</sup>。

本文采用 OpenGeoDa 软件进行双变量空间自相关分析。首先,运用双变量全局空间自相关 (Bivariate Global Moran's  $I$ ) 分析 LST 对 NTL 的空间响应规律,计算方法<sup>[44]</sup>为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (16)$$

式中:  $I$  为双变量全局空间自相关指数,即总体上空间变量  $x$  与  $y$  空间分布的相关性;  $n$  为空间单元的总数;  $W_{ij}$  为通过  $K$  邻接关系法建立的空间权重矩阵;  $x_i$ 、 $y_j$  分别为自变量、因变量在空间单元  $i$ 、 $j$  的观测值;  $S^2$  为所有样本的方差。

双变量局部空间自相关 (Bivariate Local Moran's  $I$ ) 的计算方法<sup>[44]</sup>为:

$$I_i = z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j \quad (17)$$

式中:  $I_i$  即空间单元  $i$  的自变量与因变量的局部空间关系;  $z_i$ 、 $z_j$  是空间单元  $i$ 、 $j$  观测值的方差标准化值。基于  $I_i$  可形成 4 种聚类模式,并由此组成的 LISA (Local Indications of Spatial Association) 分布图能直观地呈现局部区域中自变量与因变量的集聚性及分异特征。聚类模式可分为 HH (High-High) 聚集,即空间单元  $i$  的自变量与邻近单元  $j$  的因变量值均较大; LL (Low-Low) 聚集,即空间单元  $i$  的自变量与邻近单元  $j$  的因变量值均较

小; LH (Low-High) 聚集, 即空间单元 $i$ 的自变量值较小而邻近单元 $j$ 的因变量值较大; HL (High-Low) 聚集, 即空间单元 $i$ 的自变量值较大而邻近单元 $j$ 的因变量值较小。

**2.3.5 景观指数** 景观指数能定量反映景观的结构组成与空间配置, 是浓缩景观格局信息的指标。本文运用Fragstats软件计算景观指数, 以定量探讨NTL与LST双变量局部空间自相关的HH、LL、LH、HL4种聚类模式的空间格局特征。

综合考虑数据的空间分辨率, 并参考相关文献[7, 38, 45], 选取4类景观指数, 具体包括景观类型比例 (Percentage of Landscape, PLAND), 反映某类景观斑块的比例丰度; 最大斑块指数 (Largest Patch Index, LPI), 反映景观斑块的优势度与破碎度; 聚集度指数 (Aggregation Index, AI), 反映景观斑块的聚集程度; 平均形状指数 (Mean Shape Index, MSI), 反映景观斑块形状的复杂程度。

### 3 结果分析

#### 3.1 城镇发展与地表温度的时空耦合关系

**3.1.1 城镇发展与热环境空间分布格局** 研究获取了闽南三市NTL图像 (图2), 以反映城镇发展的状况。1996—2017年三市NTL的高值区持续蔓延, 城镇扩张明显; 此外, 相邻的NTL高值区不断打破行政边界, 逐渐合并为更大的NTL高值区。表明三市内部及之间的城镇联系不断加强, 厦、漳、泉一体化的发展趋势凸显。

闽南三市热环境时空分布如图3所示, 结合目视解译与监督分类生成的土地利用分布图 (图4) 可知, 1996—2017年三市热岛区均由裸露的地表向城镇地区转移。1996—2002年由于城镇发展有限, 城镇的热岛效应不突出。高温区多分布在耕地或沙滩地带,

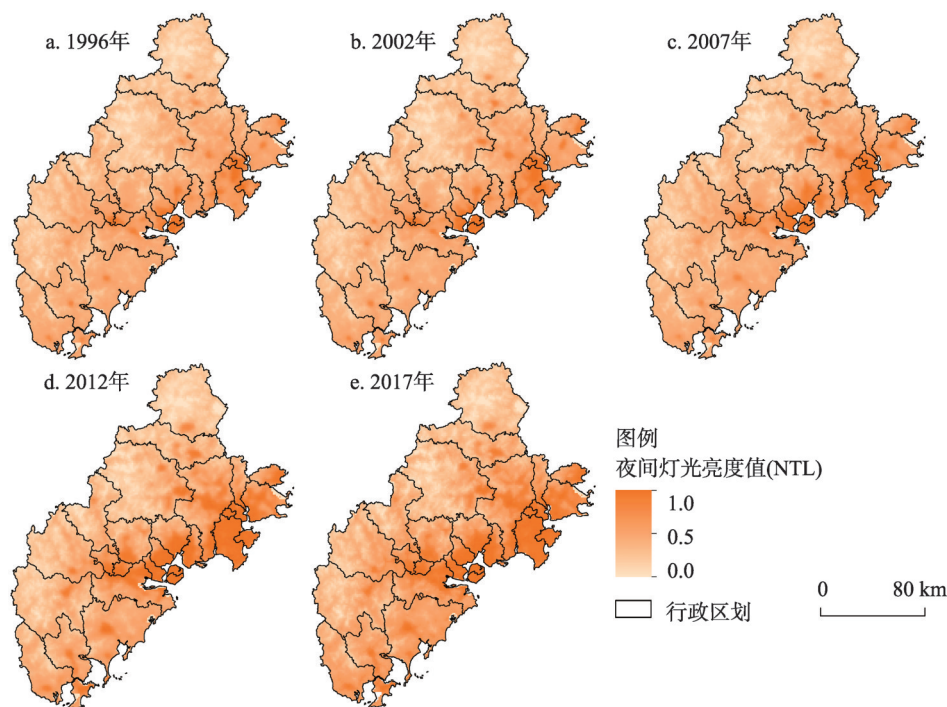


图2 1996—2017年闽南三市夜间灯光图像

Fig. 2 The NTL map of three cities of southern Fujian during 1996-2017

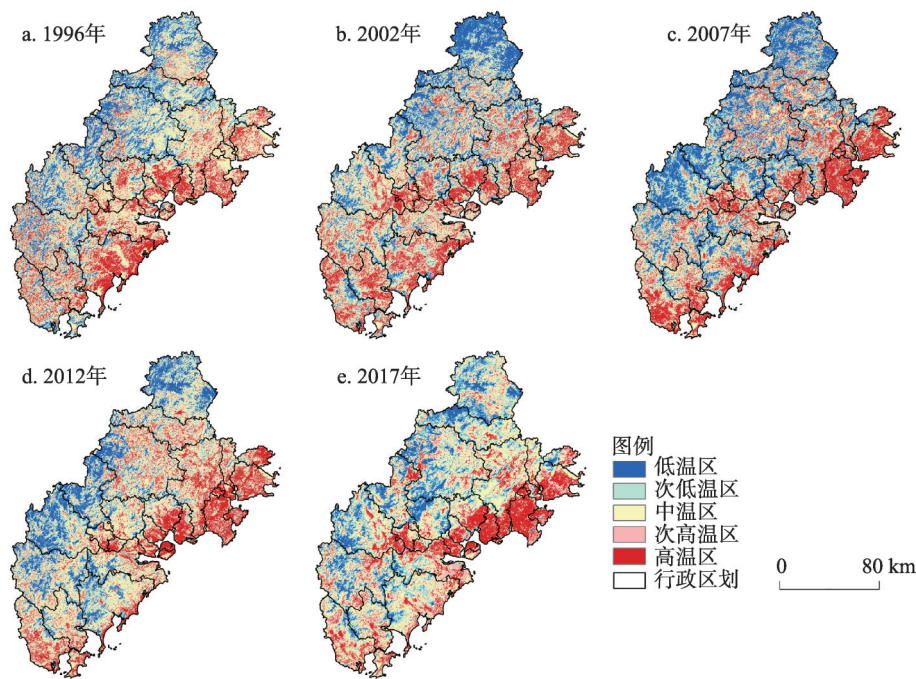


图3 1996—2017年闽南三市热力等级分布图

Fig. 3 Thermal distribution of three cities of southern Fujian during 1996-2017

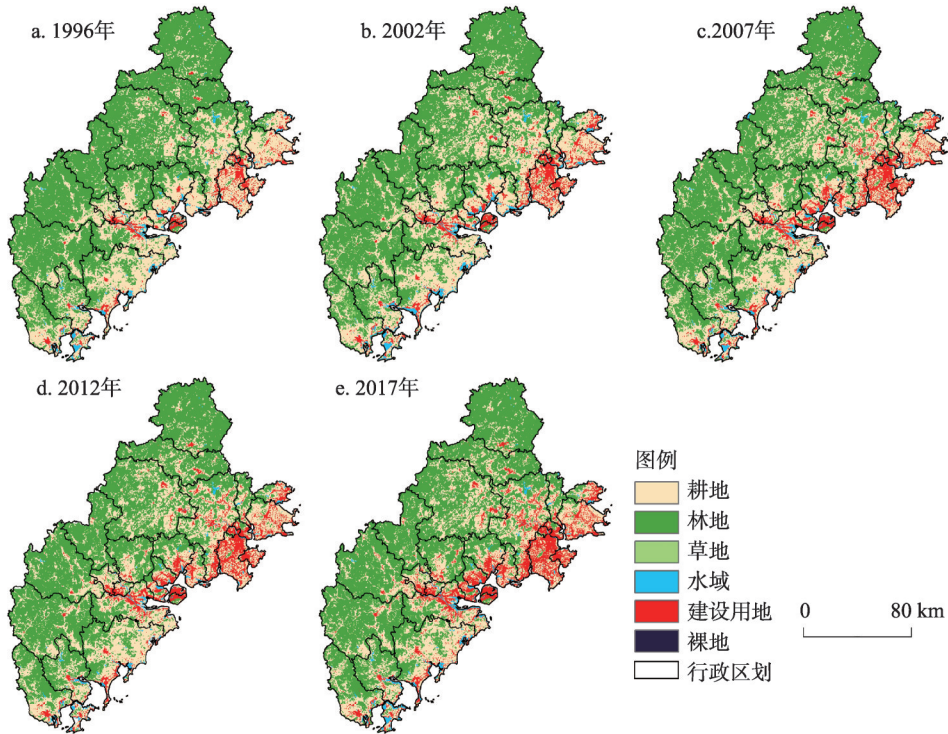


图4 1996—2017年闽南三市土地利用分类

Fig. 4 Land use classification map of three cities of southern Fujian during 1996-2017

由于地表裸露,受太阳辐射升温迅速,LST较高;2007—2017年,随着城镇的扩张,LST的城乡差异凸显,热岛区在城镇蔓延;而大片集中的耕地、裸地,随着城镇LST的上升,其热力等级反而降为中温区、次高温区。这一现象在漳州东南部尤为明显。2012年和2017年,NTL高值区在该地区扩张明显,城镇热岛效应显著加强,相比之下,城镇以外大片耕地的热岛效应减弱,高温区、次高温区向城镇地区转移。但由于城镇范围仍然较小,因此,该地区的高温区及次高温区呈现减少的态势。

总之,LST的分布与城镇发展格局及地形制约有关。闽南三市山地丘陵众多,西部内陆高山起伏,交通不畅,城镇发展受限。城镇发展用地局限于东部群山环抱的沿海平原,这些地区交通便利,区位优势明显,易于开发建设,人为活动集中,热量排放较大。而周边的群山阻滞了热量向外扩散,地形限制下的高强度的人为活动,推动了城镇及周边区域LST上升。

**3.1.2 城镇发展与地表温度的时空耦合态势** 本文通过总体耦合态势模型衡量闽南三市城镇发展与LST变化的耦合程度(图5、表1)。总体来看,1996—2017年间,三市的NTL与LST加权中心距离、移动方向的夹角总体呈减少趋势,总体耦合态势不断加强。

然而三市NTL与LST的移动轨迹并不一致。厦门NTL与LST加权中心呈“相向而行”态势,1996—2017年厦门城区由本岛向西北方向的岛外扩展,带动NTL的加权中心向西北移动。1996—2012年热岛区由岛外的大片裸地向本岛及岛外沿海的城区转移,因此,LST的加权中心总体向南移动。2012—2017年随着岛外地区城镇发展,热岛效应也相应凸显,LST的加权中心也向西北方向的岛外移动;漳州NTL与LST加权中心“前期逆向而行,后期同向而行”。漳州城镇主要沿九龙江流域自西南向东北的入海口延伸,带

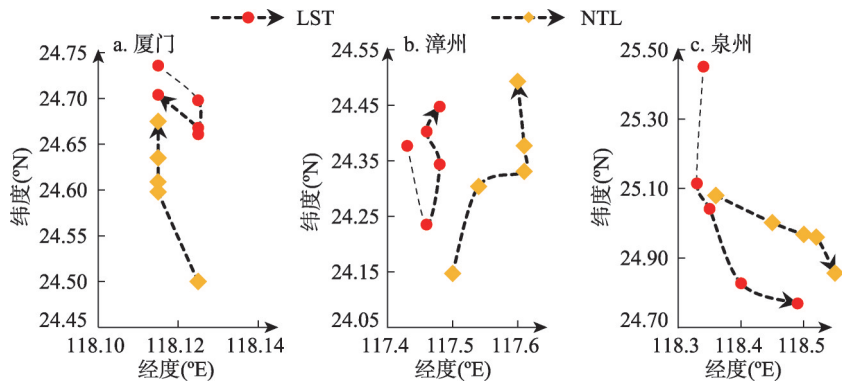


图5 1996—2017年闽南三市厦门、漳州、泉州地表温度与夜间灯光加权中心移动轨迹  
Fig. 5 The moving trajectories of weight centers for LST and NTL in Xiamen, Zhangzhou, Quanzhou of southern Fujian during 1996-2017

表1 1996—2017年闽南三市地表温度与夜间灯光总体耦合分析

年份	加权中心距离(km)			时段	加权中心移动方向夹角(°)		
	厦门	漳州	泉州		厦门	漳州	泉州
1996	26.160	26.371	41.259	1996—2002	178.393	153.699	47.076
2002	11.136	11.193	17.521	2002—2007	148.105	55.592	40.772
2007	5.792	12.913	17.843	2007—2012	11.625	18.155	49.796
2012	3.666	15.213	19.256	2012—2017	21.862	24.213	40.802
2017	3.223	12.879	11.441	1996—2017	178.337	17.430	25.995



动了NTL加权中心向东北移动。1996—2002年城镇发展对LST加权中心的变化影响有限。随着东南部的耕地增加,使LST上升,LST的加权中心向东南移动。2002—2017年,随着城镇热岛效应的凸显,城镇不断向东北延伸,这驱使着LST加权中心向东北移动;泉州由于东南部的晋江市、石狮市等地城镇的迅速扩张,带动NTL的加权中心始终向东南移动,东南地区城镇的迅速发展导致LST加权中心向东南转移,NTL与LST加权中心始终“同向而行”。

**3.1.3 城镇发展与地表温度的空间协调特征** 本文运用协调性模型,分别计算1990—2002年、2002—2007年、2007—2012年、2012—2017年4个时段,NTL与LST年平均增长率的协调度,并根据表2将研究区分为6种协调类型(图6)。

表2 夜间灯光与地表温度协调变化类型划分  
Tab. 2 Coordination category for the change of NTL and LST

类型	形成条件	意义
协调增进型	$0.8 < O \leq 1.0, UR \approx TR > 0$	NTL、LST协调增长,城镇发展与LST呈协同增进状态
拮抗升温超前型	$0 \leq O < 0.5, TR > UR$	NTL与LST变化协调度较弱,LST上升超前于城镇发展
磨合升温超前型	$0.5 \leq O < 0.8, TR > UR$	NTL与LST变化处于勉强协调,LST上升超前于城镇发展
磨合升温滞后型	$0.5 \leq O < 0.8, TR < UR$	NTL与LST变化处于勉强协调,LST上升滞后于城镇发展
拮抗升温滞后型	$0 \leq O < 0.5, TR < UR$	NTL与LST变化协调度较弱,LST上升滞后于城镇发展
协调减退型	$0.8 < O \leq 1.0, UR \approx TR < 0$	NTL、LST协调下降,城镇发展与LST呈协同减退状态

结合图3、图4、图6可知,在研究期间内,协调增进型多为城镇发展迅速的新增城镇用地,NTL、LST升幅均较大。在城镇中心区,城镇扩张与地表升温幅度均较为有限,因而NTL、LST的增长速率基本协同;协调减退型主要是地形复杂、远离城镇的林地、水域,这些地区地表热环境属性稳定,不易升温,且城镇开发建设难度大,人为活动较少。相较于其他地区,NTL、LST呈现协同下降现象。

随着原有的城镇向外围扩张,新增城镇区域经历了“升温滞后—协调型—升温超前—协调型”的转化过程,这一现象在厦门岛外等中心城区外围最为明显。城镇发展早期,NTL对LST的影响存在滞后性。新增城镇地区NTL增速较大,但城镇热岛效应并不显著,LST上升缓慢,呈拮抗升温滞后型或磨合升温滞后型;随着城镇热岛效应凸显,LST升速增加,NTL与LST呈现升幅较大的协调增进型;城镇发展后期,NTL对LST的影响呈超前性。NTL已接近“饱和状态”,上升缓慢,而连续集中的城镇形成了更强的热岛效应,LST上升速率高于NTL,因而呈现升温超前的现象;至城镇发展末期,NTL与LST增速有限,两者呈现升幅较小的协调增进型。

此外,西部内陆的部分林地受周边城镇的热岛效应或气候变化的影响,LST上升稍强,也呈现升温超前的现象;部分林地、水体及零散的城镇用地,尽管NTL有所上升,但本身或周边自然地表密集,有效遏制了LST上升,因而呈现升温滞后的现象。

本文计算了三市各时段协调类型的比例(图7)。从时间序列上来看,三市NTL与

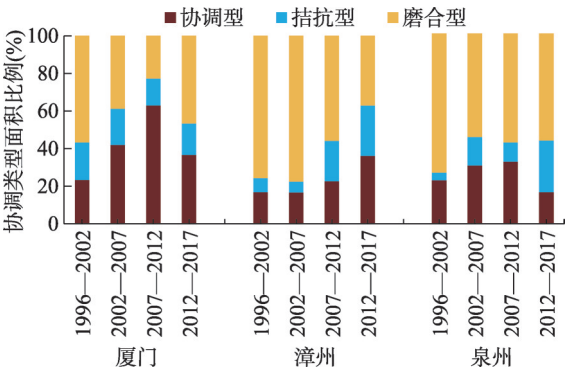


图6 1996—2017年闽南三市夜间灯光与地表温度变化的协调类型比例  
Fig. 6 Proportions of coordination categories for change of NTL and LST in the three cities of southern Fujian during 1996—2017

LST变化的协调型比例均呈增长趋势。比较来看, 厦门三种协调类型的比例相对均衡, 协调型较多; 漳州、泉州磨合型普遍占优势地位, 协调型较少。这表明厦门城镇发展与LST变化的协调度较高, 而泉州、漳州略弱。这是由于厦门以城区及耕地为主, 空间结构简单, 且城镇发展迅速, 因而LST变化更易受城镇发展影响; 漳州、泉州空间结构复杂, LST变化易受大片连续的林地等自然地表影响, 城镇发展对LST变化的干预有限。

### 3.2 城镇发展对地表温度的影响机制

**3.2.1 城镇发展与地表温度的相关关系** 本文运用SPSS软件计算NTL与LST相关系数, 并通过标准差椭圆分析NTL与LST二维散点的空间特征变化(图8、表3)。结果显示,

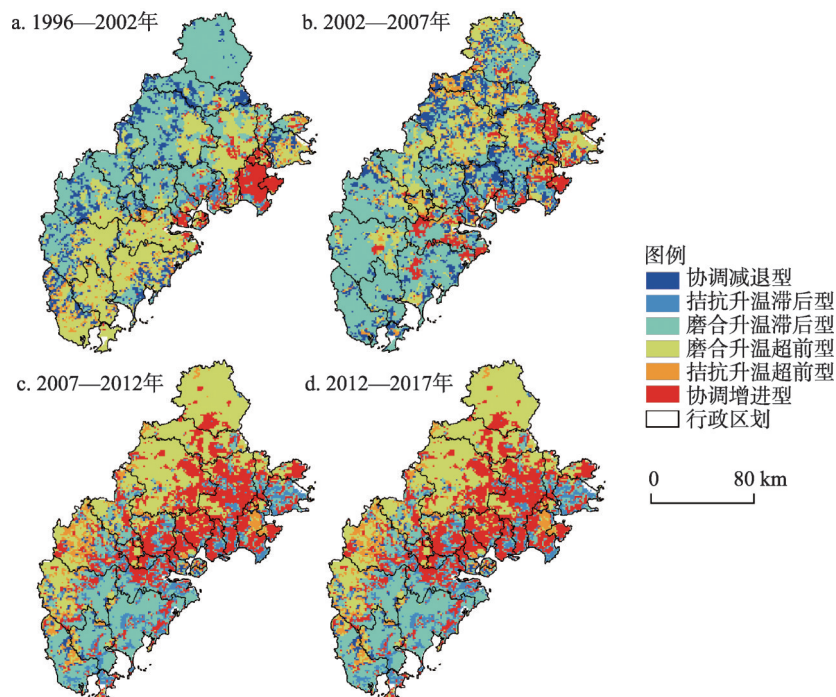


图7 1996—2017年闽南三市夜间灯光与地表温度变化的协调类型分布图

Fig. 7 The coordination categories distribution for change of NTL and LST in three cities of southern Fujian during 1996-2017

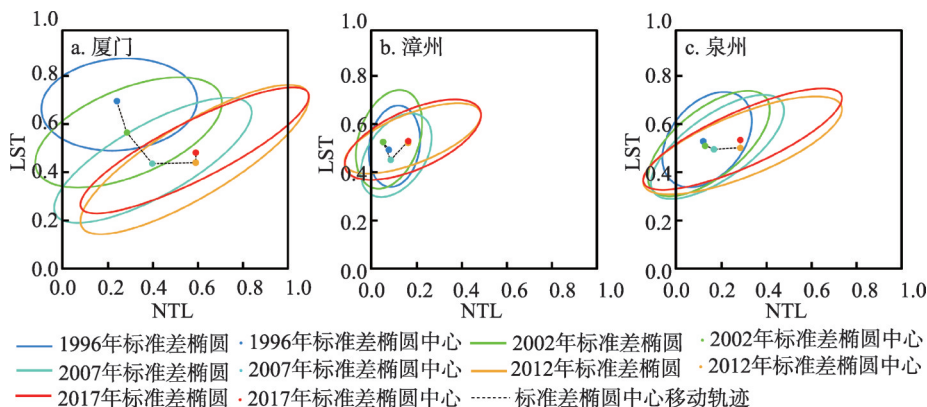


图8 1996—2017年闽南三市厦门、漳州、泉州NTL与LST标准差椭圆空间特征

Fig. 8 Spatial characteristic of standard deviation ellipse for NTL and LST in Xiamen, Zhangzhou, and Quanzhou of southern Fujian during 1996-2017

表 3 1996—2017 年闽南三市夜间灯光与地表温度的相关参数

Tab. 3 Related parameters for NTL and LST in three cities of southern Fujian during 1996-2017

地区	年份	相关系数	标准差椭圆参数			
			中心坐标(NTL, LST)	方向性	离散性	方位角(°)
厦门	1996	0.093***	(0.239, 0.695)	1.705	0.587	85.187
	2002	0.545***	(0.283, 0.565)	2.285	0.438	67.655
	2007	0.762***	(0.396, 0.435)	3.090	0.324	60.893
	2012	0.824***	(0.590, 0.439)	3.572	0.280	59.003
	2017	0.859***	(0.590, 0.481)	4.388	0.228	63.135
漳州	1996	0.149***	(0.083, 0.501)	1.526	0.615	8.685
	2002	0.321***	(0.058, 0.533)	1.694	0.590	18.936
	2007	0.423***	(0.091, 0.459)	1.620	0.617	34.274
	2012	0.661***	(0.168, 0.537)	2.925	0.342	68.511
	2017	0.665***	(0.168, 0.531)	2.493	0.401	66.010
泉州	1996	0.386***	(0.120, 0.531)	1.511	0.662	40.253
	2002	0.643***	(0.128, 0.513)	2.179	0.459	51.330
	2007	0.696***	(0.168, 0.498)	2.464	0.406	54.827
	2012	0.736***	(0.285, 0.504)	3.430	0.292	68.086
	2017	0.806***	(0.285, 0.534)	3.913	0.256	65.969

注：\*\*\*表示  $P < 0.001$ 。

1996—2017 年，三市的 NTL 与 LST 均呈显著正相关性。这表明 NTL 增加会导致 LST 上升。这是由于城镇发展导致城镇下垫面的物理属性改变，大量不透水地表代替了原有的绿地、水域等自然地表，城区建筑物阻滞了通风散热，生产、生活的集聚导致了人为热排放的集中，在多种因素的综合作用下，LST 上升。

随年份增长，三市 NTL 与 LST 的相关系数逐渐增加。标准差椭圆的中心均沿  $x$  轴 (NTL) 向高值移动，沿  $y$  轴 (LST) 移动趋势不一致；标准差椭圆的方向性逐渐增大，离散性逐渐减小。三市标准差椭圆方位角变化趋势不一，但均逐渐增加或减少至  $60^{\circ}$ ~ $65^{\circ}$  左右。上述现象表明，三市 NTL 对 LST 的正向影响逐渐明确，三市 LST 对 NTL 变化的灵敏度趋于统一。这与城镇发展对 LST 影响作用的变化有关。研究初期城镇规模有限，空间分布零散、破碎，LST 更易受其他因素的影响，NTL 对 LST 变化的影响较弱，因此，标准差椭圆方向性较小。由于城镇的热岛效应不明显，而裸露地表等 NTL 较低而 LST 较高的区域较多，因此，标准差椭圆中心坐标的 NTL 较小而 LST 较大。研究后期，随着城镇发展，城镇逐渐蔓延、合并，生产、生活持续集中，这导致城镇发展对 LST 的影响加强，且正向影响逐渐明确，标准差椭圆方向性随之增加，伴随城镇的热岛效应加强，标准差椭圆的中心坐标向  $x$  轴 (NTL) 的高值移动。

1996—2017 年厦门标准差椭圆的方向性较大，离散性较小，标准差椭圆中心明显沿  $y$  轴 (LST) 向低值移动，这表明 NTL 对 LST 的正向影响显著，两者二维散点的线性关系明显加强。漳州、泉州标准差椭圆的方向性较小，离散性较大，标准差椭圆中心在  $y$  轴 (LST) 的变动不明显，这说明漳州、泉州 NTL 对 LST 的正向影响较弱，两者二维散点线性关系增强的趋势不明显。这与三市的城镇发展状况及城镇空间格局有关，厦门城镇发展迅速，城镇分布范围较大，人口与产业相对密集，LST 变化更易受 NTL 的影响，且城镇发展对 LST 变化的影响作用明显加强。因此，NTL 与 LST 二维散点分布的方向性较大，逐渐趋向线性分布。而漳州、泉州城镇分布较少，城镇发展相对缓慢，城镇范围有限，人口、产业分布相对松散，LST 变化仍易受耕地、林地等其他因素的影响，城镇发展对 LST 的正向影响有限，且加强的趋势不明显。

**3.2.2 城镇发展与地表温度的全局空间关联** 运用 OpenGeoDa 软件计算三市 NTL 与 LST 的双变量 Moran's  $I$  (表4)。结果显示, 三市的 NTL 与 LST 均呈显著的空间正相关性, 即局部地区 NTL 增加会导致周边地区 LST 上升。这是由于一方面, 不同地区因 LST 的差异而产生热量交换<sup>[12]</sup>, 局部地区 NTL 的增加带动该地区 LST 的上升, 该地区的热量进而向周边地区传递, 最终导致周边地区 LST 上升。1996—2017 年三市 NTL 与 LST 的双变量 Moran's  $I$  值逐渐增加, 即 NTL 对邻近地区 LST 的正向影响加强。这是由于城镇规模有所扩大, 空间分布逐渐连续集中, 城镇本身的热岛效应加强, 对周围环境的升温作用显著。此外, 由于城镇分布更为广阔、密集, 局部地区城镇发展对 LST 的影响加强, 这导致城镇本身对周边热环境的“溢出效应”明显<sup>[46]</sup>, 进而对周边地区 LST 的影响日益显著。

比较来看, 三市的双变量 Moran's  $I$  及变化差异明显。厦门双变量 Moran's  $I$  升幅最明显, 1996 年其 Moran's  $I$  最小, 仅 0.084, 泉州最大, 漳州次之。2002 年, 厦门的 Moran's  $I$  已大于漳州。2007—2017 年 Moran's  $I$  呈现“厦门>泉州>漳州”的格局。究其原因, NTL 对 LST 分布的作用与城镇发展格局有关。1996—2017 年间, 三市的城镇发展差异较大。结合图2、图4可以看出, 1996 年三市的城镇规模均较为有限。根据对土地利用比例的统计, 1996 年, 厦门、漳州、泉州建设用地比例分别为 8.32%、2.58%、4.95%。因此, LST 的分布受 NTL 的影响较小。特别是厦门, 城区主要集中在本岛, 但热岛效应不突出, 而热岛区主要在岛外的耕地, 因此, NTL 与 LST 的空间关联性较弱。随着城镇的扩张, 城镇发展对 LST 空间分布的影响加强。至 2017 年, 厦门、漳州、泉州建设用地比例分别为 31.51%、8.09%、13.52%。厦门城区扩张更明显, 城镇化进程较快, 城镇分布连续集中, 对周边地区 LST 的影响显著加强, 因而 Moran's  $I$  升幅最大。泉州、漳州升幅相似, 但泉州城镇发展更快, 城镇化水平及城镇分布范围大于漳州, 城镇发展对地表温度的影响较强, 因此 Moran's  $I$  略高于漳州。

表4 1996—2017 年闽南三市地表温度与夜间灯光的双变量 Moran's  $I$  统计值

Tab. 4 Bivariate Moran's  $I$  of LST and NTL in the three cities of southern Fujian during 1996-2017

年份	厦门	漳州	泉州
1996	0.084(7.573)***	0.141(35.654)***	0.373(82.939)***
2002	0.541(45.293)***	0.310(80.156)***	0.636(128.881)***
2007	0.746(55.677)***	0.409(103.164)***	0.687(131.404)***
2012	0.809(58.262)***	0.641(135.030)***	0.721(135.594)***
2017	0.844(61.455)***	0.594(145.593)***	0.759(154.359)***

注: 括号内为 Z 检验值, \*\*\*表示  $P < 0.001$ 。

**3.2.3 城镇发展与地表温度的局部空间关联** 本文运用 OpenGeoDa 软件进行双变量局部空间自相关分析, 生成 LISA 分布图 (图9)。HH 聚集多集中在东部近海的城区及内陆的主要乡镇, 其扩张与集中的趋势明显; LL 聚集多出现在内陆的山林地带及大型湖泊等, 分布相对稳定; LH 聚集多分布在 HH 聚集区周边, 多为大片集中的裸地、耕地, 及工业区。尽管 NTL 较低, 但由于太阳辐射或人为热排放的影响, LST 也较高; HL 聚集较少, 多为城镇边缘区及破碎的城镇地区, 尽管 NTL 较大, 但由于周边自然地表的“冷岛效应”, 本身 LST 较低。

本文计算了闽南三市 NTL 与 LST 的 HH、LL、LH、HL 聚集的景观指数 (图10), 结果表明: 三市 HH、LL 聚集的 PLAND 不断增加, 而 LH、HL 聚集的 PLAND、LPI、AI 则持续下降。这是由于城镇发展导致 NTL 对 LST 空间溢出效应加强, 两者的高值区、低值区逐渐重叠。城镇扩张引发城镇 LST 上升, 进而使 HH 聚集增加, 相对而言, 城镇外围



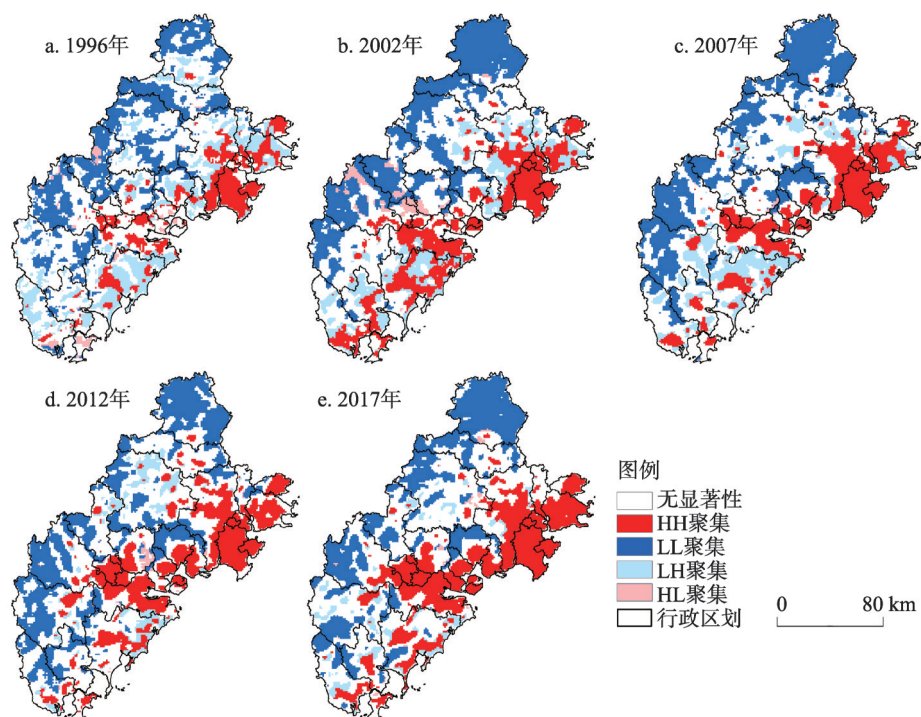


图9 1996—2017年闽南三市夜间灯光与地表温度的双变量LISA分布图

Fig. 9 Bivariate LISA distribution of NTL and LST for the three cities of southern Fujian during 1996–2017

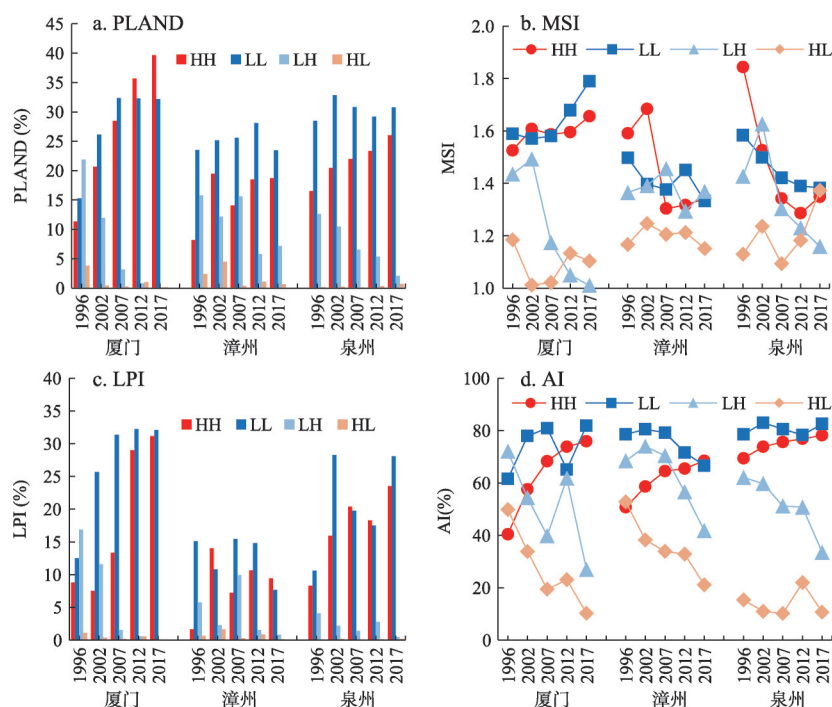


图10 1996—2017年闽南三市夜间灯光与地表温度聚集模式的景观指数PLAND、MSI、LPI及AI

Fig. 10 Landscape indices such as PLAND, MSI, LPI and AI of NTL and LST aggregation in the three cities of southern Fujian during 1996–2017

地区的LST下降,特别是部分耕地、裸地转化为LL聚集。因此,HH、LL聚集增多;与此同时,原本呈LH聚集的大片连续耕地、裸地被城镇侵占、分割,相比于城镇,其热岛效应逐渐减弱。原本呈HL聚集的城镇地区,因本身扩张或邻近城镇的热岛效应,LST也相应上升。这导致HL、LH聚集的斑块逐渐收缩、趋于破碎。

值得注意的是,三市的HH聚集的LPI、AI持续增加,这与城镇蔓延的同时也逐渐集聚有关。不同城镇沿交通干线扩展的同时也逐渐连接、合并,LST较高的区域随之也逐渐集中,这导致HH聚集斑块不断连接,形成更大的斑块。这一现象在厦门、漳州市辖区、石狮、晋江等地尤为明显。上述地区地势平坦,交通便利,易于开发建设。该地区作为衔接三市的关键区域,在厦门、漳州、泉州同城化发展趋势的带动下,城镇合并的趋势凸显,进而带动本地及周边地区LST上升,HH聚集逐渐融为一体,连片发展及向外“溢出”的趋势明显。

1996—2017年,厦门HH、LL聚集的PLAND、LPI普遍较高,且4类景观指数均有明显的增幅,而HL、LH聚集的PLAND、AI降幅最明显。这表明HH、LL聚集的景观优势度较大,形状日益复杂,聚集的趋势显著,而HL、LH聚集斑块收缩与破碎的趋势明显;漳州、泉州4种聚类模式的景观格局相似,HH、LL聚集的MSI均不断下降,斑块形状趋于规整。漳州HH、LL聚集的PLAND、LPI最小,LH、HL聚集的PLAND相对较大。泉州HH、LL聚集AI较高,斑块更加集中,这归因于三市城镇发展格局的差异。厦门城区主要由本岛向岛外扩展,城区空间结构单一、规整,主要分布于本岛及岛外沿海地区,且耕地、裸地较少,因此,NTL与LST均呈现“东南高、西北低”的态势,两者的聚类模式逐渐以HH、LL为主。漳州城镇发展缓慢,城镇面积有限且分布破碎,城镇与林地等自然地表的空间格局复杂多变,NTL对LST的影响较弱。因此,HH、LL聚集斑块比例较小,分布破碎。相比于漳州,泉州城镇地区主要集中在东南沿海地区,而内陆地区以林地为主,城镇较少且LST较低,因此,HH、LL聚集斑块相对集中。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文基于Landsat遥感数据及夜间灯光数据,探讨了闽南三市城镇发展与地表温度的空间关系,得出以下结论:

(1) 闽南三市夜间灯光与地表温度的空间分布呈现出与地形、区位等因素的空间耦合性。西部内陆的高海拔地区,林地分布密集,地表温度较低,而在东部沿海的平原上城镇集中,地表温度较高。

(2) 1996—2017年闽南三市热岛区均由裸露的地表向城镇地区转移。夜间灯光与地表温度的总体耦合态势不断加强。厦门夜间灯光与地表温度加权中心“相向而行”,漳州两者呈“前期逆向而行,后期同向而行”的态势,泉州两者始终“同向而行”。

(3) 研究期内,新增城镇区域普遍呈现“升温滞后—协调型—升温超前一协调型”的转化过程。城镇发展早期,夜间灯光对地表温度的影响存在滞后性。城镇发展后期,夜间灯光对地表温度的影响呈超前性。三市的协调型比例逐渐增加。厦门协调型较多,漳州、泉州协调型较少。

(4) 闽南三市的夜间灯光与地表温度的相关系数、双变量Moran's  $I$ 均为正且显著,并逐渐增加。这表明两者呈显著正相关性及空间正相关性,即本地区城镇的发展,会导

致本地区及周边地区地表温度升高,且夜间灯光对地表温度的正向影响逐渐加强。夜间灯光与地表温度的HH、LL聚集逐渐增加。HH集聚不断集中,连片趋势明显。

(5) 厦门夜间灯光与地表温度的相关系数、双变量Moran's  $I$ 较大,协调型较多,城镇发展对地表温度的影响最显著。漳州、泉州相关系数、双变量Moran's  $I$ 较小,协调型较少,城镇发展对地表温度影响有限。

## 4.2 讨论

本文分析了夜间灯光与地表温度的空间关系,在一定程度上揭示了闽南三市城镇发展对地表温度的影响机制。研究发现,城镇发展对地表温度的影响作用有明显的地域差异,这反映出城镇发展对地表温度的影响作用,受其本身经济、人口、土地等因素的综合影响。厦门城镇发展迅速,城区分布广,空间结构简单,城乡差异较少,城镇发展对地表温度的影响显著;漳州、泉州空间结构复杂,城镇发展缓慢,地表温度变化易受其他因素的影响,城镇发展对地表温度的影响相对有限;泉州城镇发展对地表温度的影响高于漳州,漳州城镇发展水平较低,城镇发展对LST影响最弱。

然而,本文仍存在不足之处。分析城镇发展与地表温度关系的最佳时间尺度值得探讨<sup>[14-15]</sup>。由于地表温度变化复杂、基础研究数据的可获取性有限等现实问题,本文采用的截面数据的时间分辨率未必是最适宜的,后续研究应在多个时间尺度的比较分析中,寻求最适宜的时间尺度。此外,本文仅以夜间灯光表征城镇发展,探讨地表温度对其的空间响应,这不够全面。城镇发展不仅是二维平面上的扩张与强化,也包括城镇建设用地功能的转换及三维空间形态的演变<sup>[13, 16]</sup>,未来的研究可以将上述因素纳入到分析中,以形成更全面、合理的研究结果。

## 参考文献(References)

- [1] Wu Zixuan, Zhang Qiang, Song Changqing, et al. Impacts of urbanization on spatio-temporal variations of temperature over the Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2342-2357. [吴子璇, 张强, 宋长青, 等. 珠三角城市化对气温时空差异性影响. *地理学报*, 2019, 74(11): 2342-2357.]
- [2] Guo G H, Wu Z F, Chen Y B. Complex mechanisms linking land surface temperature to greenspace spatial patterns: Evidence from four southeastern Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 77-87.
- [3] Qiao Zhi, Huang Ningyu, Xu Xinliang, et al. Spatio-temporal pattern and evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(3): 475-489. [乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003—2017年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律. *地理学报*, 2019, 74(3): 475-489.]
- [4] Song X P, Hansen M C, Stehman S V, et al. Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, 2018, 560(7720): 639-643.
- [5] Wang Y S, Zhan Q M, Ouyang W L. How to quantify the relationship between spatial distribution of urban waterbodies and land surface temperature? *Science of the Total Environment*, 2019, 671. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146056.
- [6] Shen Zhongjian, Zeng Jian. Spatial relationship of heat island intensity to correlated land surface factors in Xiamen City. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 842-852. [沈中健, 曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究. *地理科学*, 2020, 40(5): 842-852.]
- [7] Yu Chen, Hu Deyong, Cao Shisong, et al. The spatial characteristics and changes of ISP-LST of Beijing in recent 30 years. *Geographical Research*, 2019, 38(9): 2346-2356. [于琛, 胡德勇, 曹诗颂, 等. 近30年北京市ISP-LST空间特征及其变化. *地理研究*, 2019, 38(9): 2346-2356.]
- [8] Peng J, Jia J L, Liu Y X, et al. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 255-267.
- [9] Zhu X M, Wang X H, Yan D J, et al. Analysis of remotely-sensed ecological indexes' influence on urban thermal environment dynamic using an integrated ecological index: A case study of Xi'an, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(9): 3421-3447.
- [10] Wang D C, Sun Z C, Chen J H, et al. Analyzing the interpretative ability of landscape pattern to explain thermal environmental effects in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *PeerJ*, 2019, 7: e7874. DOI: 10.7717/peerj.7874.

- [11] Li B Y, Wang W, Bai L, et al. Effects of spatio-temporal landscape patterns on land surface temperature: A case study of Xi'an city, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(7): 419. DOI: 10.1007/s10661-018-6787-z.
- [12] Liu Dan, Yu Chenglong. Urban expansion and its influence on spatio-temporal variation of thermal environment: A case study of Harbin city. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(3): 509-517. [刘丹, 于成龙. 城市扩张对热环境时空演变的影响: 以哈尔滨为例. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 509-517.]
- [13] Yang Zhiwei, Chen Yingbiao, Wu Zhifeng, et al. The coupling between construction land expansion and urban heat island expansion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(11): 1592-1603. [杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 粤港澳大湾区建设用地扩张与城市热岛扩张耦合态势研究. *地球信息科学学报*, 2018, 20(11): 1592-1603.]
- [14] Yang C, Zhan Q M, Gao S H, et al. How do the multi-temporal centroid trajectories of urban heat island correspond to impervious surface changes: A case study in Wuhan, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(20): 3865. DOI: 10.3390/ijerph16203865.
- [15] Willie Y A, Pillay R, Zhou L, et al. Monitoring spatial pattern of land surface thermal characteristics and urban growth: A case study of King Williams using remote sensing and GIS. *Earth Science Informatics*, 2019, 12(4): 447-464.
- [16] Yang Zhiwei, Chen Yingbiao, Wu Zhifeng, et al. Spatial pattern of urban heat island and multivariate modeling of impact factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area. *Resources Science*, 2019, 41(6): 1154-1166. [杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 粤港澳大湾区城市热岛空间格局及影响因子多元建模. *资源科学*, 2019, 41(6): 1154-1166.]
- [17] Peng Baofa, Shi Yishao, Wang Hefeng, et al. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: A case study of Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1461-1471. [彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 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.]
- [18] Min M, Lin C, Duan X J, et al. Spatial distribution and driving force analysis of urban heat island effect based on raster data: A case study of the Nanjing metropolitan area, China. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101637. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101637.
- [19] Yang Zhiwei, Chen Yingbiao, Wu Zhifeng, et al. Spatial variability of urban thermal environment based on natural blocks. *Progress in Geography*, 2019, 38(12): 1944-1956. [杨智威, 陈颖彪, 吴志峰, 等. 基于自然区块的城市热环境空间分异性研究. *地理科学进展*, 2019, 38(12): 1944-1956.]
- [20] Yao L, Xu Y, Zhang B L. Effect of urban function and landscape structure on the urban heat island phenomenon in Beijing, China. *Landscape and Ecological Engineering*, 2019, 15(4): 379-390.
- [21] Du Zhiwei, Li Xun. Growth or shrinkage: New phenomena of regional development in the rapidly-urbanising Pearl River Delta. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(10): 1800-1811. [杜志威, 李邕. 珠三角快速城镇化地区发展的增长与收缩新现象. *地理学报*, 2017, 72(10): 1800-1811.]
- [22] Chen Yingbiao, Zheng Zihao, Wu Zhifeng, et al. Review and prospect of application of nighttime light remote sensing data. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 205-223. [陈颖彪, 郑子豪, 吴志峰, 等. 夜间灯光遥感数据应用综述和展望. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 205-223.]
- [23] Luo Qing, Li Xiaojian. The spatial differentiation and influencing factors of urban centers in China based on VIIRS night light. *Geographical Research*, 2019, 38(1): 155-166. [罗庆, 李小建. 基于 VIIRS 夜间灯光的中国城市中心的分异特征及其影响因素. *地理研究*, 2019, 38(1): 155-166.]
- [24] Wang Chao, Kan Aike, Zeng Yelong, et al. Population distribution pattern and influencing factors in Tibet based on random forest model. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(4): 664-680. [王超, 阚媛珂, 曾业隆, 等. 基于随机森林模型的西藏人口分布格局及影响因素. *地理学报*, 2019, 74(4): 664-680.]
- [25] Feng G Q, Wang K, Yin D M, et al. How to account for endmember variability in spectral mixture analysis of night-time light imagery? *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(8): 3147-3161.
- [26] Wang Liwei, Feng Changchun. Spatial expansion pattern and its driving dynamics of Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region: Based on nighttime light data. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12): 2155-2169. [王利伟, 冯长春. 转型期京津冀城市群空间扩展格局及其动力机制: 基于夜间灯光数据方法. *地理学报*, 2016, 71(12): 2155-2169.]
- [27] Su Yongxian, Chen Xiuzhi, Ye Yuyao, et al. The characteristics and mechanisms of carbon emissions from energy consumption in China using DMSP/OLS night light imageries. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1513-1526. [苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. *地理学报*, 2013, 68(11): 1513-1526.]
- [28] Liao W L, Liu X P, Wang D G, et al. The impact of energy consumption on the surface urban heat island in China's 32 major cities. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 250. DOI: 10.1007/s00376-014-3222-4.



- [29] Li L L, Yu T, Zhao L M, et al. Characteristics and trend analysis of the relationship between land surface temperature and nighttime light intensity levels over China. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 381-390.
- [30] Lin Zhongli, Xu Hanqiu, Chen Hong. Urban heat island change and its relationship to the urbanization of three major urban agglomerations in China's eastern coastal region. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10): 1695-1704. [林中立, 徐涵秋, 陈弘. 我国东部沿海三大城市群热岛变化及其与城市群发展的关系. *环境科学研究*, 2018, 31(10): 1695-1704.]
- [31] Chen S S, Hu D Y, Wong M S, et al. Characterizing spatiotemporal dynamics of anthropogenic heat fluxes: A 20-year case study in Beijing-Tianjin-Hebei region in China. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 923-931.
- [32] Chen W, Zhang Y, Peng C Y, et al. Evaluation of urbanization dynamics and its impacts on surface heat islands: A case study of Beijing, China. *Remote Sensing*, 2017, 9(5): 453. DOI: 10.3390/rs9050453.
- [33] Yue W Z, Qiu S S, Xu H, et al. Polycentric urban development and urban thermal environment: A case of Hangzhou, China. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189(9): 58-70.
- [34] Fujian Statistical Bureau. *Fujian Statistical Yearbook*. <http://tjj.fujian.gov.cn/>, 2017-09-04. [福建省统计局. *福建统计年鉴*. <http://tjj.fujian.gov.cn/>, 2017-09-04.]
- [35] Elvidge C, Baugh K, Kihn E, et al. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63: 727-734.
- [36] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, et al. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995-2015) of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 674(7): 242-254.
- [37] Liu G L, Zhang Q, Li G Y, et al. Response of land cover types to land surface temperature derived from Landsat-5 TM in Nanjing Metropolitan Region, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(20): 1386-1397.
- [38] Lei Jinrui, Chen Zongzhu, Wu Tingtian, et al. Spatio-temporal evolution and interrelationship between thermal environment and landscape patterns of Haikou City, 1989-2015. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1734-1743. [雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 1989—2015年海口市城市热环境与景观格局的时空演变及其相互关系. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1734-1743.]
- [39] Yang Z W, Chen Y B, Qian Q L, et al. The coupling relationship between construction land expansion and high-temperature area expansion in China's three major urban agglomerations. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(17): 6680-6699.
- [40] Ding Mengmeng, Cao Weidong, Zhang Dapeng, et al. Study on the measurement and coordination of road traffic and economic development in Anhui province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(3): 503-513. [丁萌萌, 曹卫东, 张大鹏, 等. 安徽省公路交通与经济发展水平测度及协调性研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 503-513.]
- [41] Liu N N, Liu C Z, Xia Y F, et al. Examining the coordination between urbanization and eco-environment using coupling and spatial analyses: A case study in China. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 1163-1175.
- [42] Wang Q R, Mao Z X, Xian L H, et al. A study on the coupling coordination between tourism and the low-carbon city. *Asia Pacific Journal of Tourism Research*, 2019, 24(6): 550-562.
- [43] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [44] Xu Dong, Huang Zhenfang, Huang Rui. The spatial effects of haze on tourism flows of Chinese cities: Empirical research based on the spatial panel econometric model. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(4): 814-830. [徐冬, 黄震方, 黄睿. 基于空间面板计量模型的雾霾对中国城市旅游流影响的空间效应. *地理学报*, 2019, 74(4): 814-830.]
- [45] Shen Zhongjian, Zeng Jian, Liang Chen. Spatial relationship of greenspace landscape pattern with land surface temperature in three cities of southern Fujian. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(4): 1309-1317. [沈中健, 曾坚, 梁晨. 闽南三市绿地景观格局与地表温度的空间关系. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1309-1317.]
- [46] Lin Y, Jim C Y, Deng J S, et al. Urbanization effect on spatiotemporal thermal patterns and changes in Hangzhou (China). *Building and Environment*, 2018, 145: 166-176.

## Spatial relationship of urban development to land surface temperature in three cities of southern Fujian

SHEN Zhongjian, ZENG Jian

(School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Exploring the influence mechanism of expansion for urban areas on thermal environment is significant for improving urban ecological environment. In this study, nighttime light (NTL) can be regarded as an evidence of urban development. Based on Landsat remote sensing data, DMSP/OLS nighttime light data and NPP/VIIRS nighttime light data of Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou in southern Fujian during 1996-2017, this study applied the overall coupling model and coordination model to discuss the spatio-temporal coupling and coordination relationship between urban development and land surface temperature (LST) distribution. Additionally, the spatial response law was analyzed by standard deviation ellipse, bivariate spatial autocorrelation and landscape index. The results show that during 1996-2017, the spatial distribution patterns of LST and NTL show that urban development is closely related with factors such as geographical location and terrain. In the western inland areas with high elevations, forests are obviously concentrated with relatively low LST, while in the eastern plain areas, more urban areas are distributed with relatively high LST. In the three cities, the overall coupling situation of NTL and LST is constantly strengthening, and the proportion of coordination for NTL and LST is gradually increasing. In the early stage of urban development, the influence of NTL on LST is hysteretic. In the late stage, the influence of NTL on LST is in advance. There is a positive correlation between NTL and LST, and a spatial spillover effect is obvious. The correlation coefficient and bivariate spatial autocorrelation Moran's  $I$  value gradually increase, indicating that NTL has an increasing influence on the change of LST. The HH (High-High)-type and LL (Low-Low)-type agglomeration areas continue to expand. Influenced by the trend of integrated development of the three study cities, HH-type agglomeration area is gradually concentrated in regions connecting the cities, such as Xiamen, Jinjiang, Shishi and central urban area of Zhangzhou. The influence of urban development on LST is related to the development condition of itself. Compared with Zhangzhou and Quanzhou, NTL has a more significant influence on the LST in Xiamen. The study results provide a scientific guidance for the optimization of thermal environment in the three cities of southern Fujian.

**Keywords:** land surface temperature; thermal environment; urban development; nighttime light; spatial autocorrelation; the three cities of southern Fujian