#### DOI: 10.5846/stxb201901030023

陈燕红,蔡芫镔,仝川.基于遥感的城市绿色空间演化过程的温度效应研究——以福州主城区为例.生态学报,2020,40(7):2439-2449. Chen Y H, Cai Y B, Tong C.Temperature effect under the green space evolution based on remote sensing: a case study of Fuzhou, China.Acta Ecologica Sinica,2020,40(7):2439-2449.

# 基于遥感的城市绿色空间演化过程的温度效应研究

——以福州主城区为例

陈燕红<sup>1,2,3</sup>,蔡芜镔<sup>4</sup>, 仝 川<sup>2,3,\*</sup>

1 福州大学至诚学院, 福州 350002

2 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

3 福建师范大学地理科学学院,福州 350007

4 福州大学环境与资源学院, 福州 350116

**摘要:**以福州主城区绿色空间为研究对象,基于遥感手段,研究绿色空间的复杂演化对地表温度扰动的影响。研究发现:(1) 1993—2016年,福州主城区下垫面绿色空间损失和扩张面积分别为46.50km<sup>2</sup>和4.73km<sup>2</sup>,面积差达到41.77km<sup>2</sup>。(2)不同温度 区的分布格局发生了较大变化,冷岛区面积大幅减少,热岛区面积显著增加。从各温度等级内的土地利用分布来看,低温区内 分布较多湿地和水体,次低温区以林/草地为主。(3)城市热岛重心与城市重心的迁移方向有关;而城市冷岛重心与城市绿色 空间的分布关系密切。(4)不同绿色空间演化过程引起的降温效应大小依次为:绿色空间扩张>绿色空间不变>绿色空间交换> 绿色空间损失。绿色空间扩张带来的平均降温幅度约为5.0℃,而绿色空间损失引起的平均增温约为7.0℃。不同的演化过程 下,通过增加等面积的绿色空间,并不能抵消先前绿色空间损失带来的升温。因此,科学合理的绿色空间规划对于有效缓解城 市热岛至关重要。

关键词:城市化;绿色空间;演化;温度效应;福州

# Temperature effect under the green space evolution based on remote sensing: a case study of Fuzhou, China

CHEN Yanhong<sup>1,2,3</sup>, CAI Yuanbin<sup>4</sup>, TONG Chuan<sup>2,3,\*</sup>

1 Fuzhou University Zhicheng College, Fuzhou 350002, China

2 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

4 College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China

Abstract: Taking the urban green space (UGS) in the main urban area of Fuzhou as the research object, the relationship between the UGS evolution and the change of land surface thermal environment was obtained based on the remote sensing inversion of land surface temperature (LST) and the extraction of land use and land cover (LULC). The results showed that: (1) From 1993 to 2016, the area of UGS Loss and UGS Expansion were 46.50km<sup>2</sup> and 4.73km<sup>2</sup> respectively, with the area difference as high as 41.77km<sup>2</sup>. The land surface temperature difference ( $\Delta$ LST) caused by the UGS Loss was the largest, while the  $\Delta$ LST caused by the other three evolution types was slightly lower than the average  $\Delta$ LST. (2) There was a trend that the urban cold island (UCI) decreased sharply and an opposite trend of the urban heat island (UHI) in 23 years. The distribution of the LULC in temperature grades was obviously different. The low temperature zone was distributed

收稿日期:2019-01-03; 网络出版日期:2019-12-26

基金项目:福建省社会科学规划项目(FJ2016C033);福建省中青年教师教育科研项目(JT180021)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

with more wetlands and waters. The sub-low temperature zone was given priority to forest/grass, while the UHI area was more distributed with the construction land and bare land. (3) The space gravity method illuminated that there was a close relationship between the UHI and the urban center of gravity, which was negative correlation with UGS location. The UCI was the contrary in the case. (4) The cooling effect caused by different types of UGS evolution was quantified which was in order as: UGS Expansion > UGS Unchanged > UGS Exchanged > UGS Loss. The calculation showed that the average cooling effect of UGS Expansion was about 5.0  $^{\circ}$ C, while the warming effect of UGS Loss was about 7.0  $^{\circ}$ C. Increasing the same area of UGS cannot offset the warming effect caused by the UGS loss previously during different evolution process. Therefore, the scientific and rational UGS planning is very important to relieve UHI effect.

Key Words: urbanization; urban green space; evolution; temperature effect; Fuzhou

城市化通常表现为城市人口的大量聚集,广泛的土地开发活动和大幅减少的绿色空间<sup>[1-3]</sup>。在中国, 2015年的城市化率为56.10%,预计城市人口在2030年将增长70%<sup>[4]</sup>。快速城市化导致的城市热岛现象,是 影响人类健康和生态系统功能最严重的环境问题之一<sup>[2,5]</sup>。位于城市中的绿色空间,包括林/草地、水体和湿 地,在维护城市生态环境中扮演着重要的角色<sup>[6]</sup>,其所带来的生态效益受到广泛关注。许多研究表明城市绿 色空间可作为减轻热岛效应的有效方法之一。研究提出绿地通过蒸腾作用和遮阴作用能够有效降低周边环 境温度<sup>[7-9]</sup>;地表水体由于本身的高热容性和流动性,以及较低的热辐射率,具有降温、增湿的作用,既是城市 中的"冷岛",也对周边环境具有显著的降温增湿作用<sup>[10-12]</sup>;湿地被称为"地球之肾"、"天然水库"和"天然物 种库",在调节区域气候特征方面亦具有重要作用<sup>[13]</sup>。因此,关注城市不同绿色空间类型的时空演化与合理 配置,缓解城市热岛效应,改善人居环境已然成为当前的重要任务<sup>[14-17]</sup>。

相比传统的大气温度测量技术,遥感和地理信息系统技术正广泛应用于城市热岛效应研究中<sup>[18]</sup>。遥感 分析技术能直观、动态地获取下垫面信息和模拟其未来演化方向,并以其他研究方法无法比拟的绝对优势成 为了研究城市冷岛强度的重要技术手段。城市景观的形成和扩张增加了热岛的威胁,由其引起的地表温度时 空变异的定量研究也是多样化的<sup>[19-21]</sup>。土地利用类型/覆盖和地表温度之间的关系在不同的研究条件中是 不一致的。多数学者对城市的下垫面、土地利用类型、植被覆盖度、绿色空间格局、不透水面等影响因子已有 了大量研究,却较少从绿色空间演化过程与地表温差方面讨论城市冷热岛与城市绿色空间的关系,对城市绿 色空间不同演化类型引起的温度效应的定量研究也相对匮乏。因此,如何量化城市绿色空间类型演化对地表 温度变化的影响仍然是多个城市应对高温威胁的关注热点问题。本研究选取快速城市化背景下的福州主城 区为研究对象,利用遥感和地理信息系统软件平台及相关统计分析法,着眼于城市绿色空间与地表热环境演 化特征,开展城市绿色空间演化过程的温度效应定量化研究。研究不仅能有效指导城市绿色空间存量调控建 设,而且还可为相关城市规划设计指标控制提供理论指导与规范,具有重要的理论学术价值,为同类研究和规 划实践提供案例借鉴。

#### 1 研究数据及方法

### 1.1 研究区概况

福州市位于中国东南沿海(25°15′—26°39′N,118°08′—120°31′E),是省内最大的工业城市,也是全省政 治、经济、文化中心。近年来,随着城镇化进程加速和福州城市发展"东扩南进、沿江向海"战略的实施,福州 主城区下垫面用地类型发生了巨大的变化。在1996—2005年间福州城区以年均6%—7%的速度扩展<sup>[22-23]</sup>, 主城区中建筑用地过多,绿地偏少且破碎严重<sup>[24]</sup>,湿地面积不断减少<sup>[25]</sup>,城市建筑和绿地之间的平均温差可 达4℃<sup>[26]</sup>,建筑不透水面与地表温度之间表现出明显的指数函数关系,高不透水面覆盖地区的升温要明显快 于低不透水面覆盖地区,城市热岛严重<sup>[27-28]</sup>。自 2007年起夏热时段的平均地表温度高达 35—40℃,2013年 更是成为"四大火炉"之首<sup>[29]</sup>。本研究选取福州主城区为研究对象,主要包含鼓楼区、台江区、晋安区和仓山 区四区的建成区部分,总面积约为257.80km<sup>2</sup>。

1.2 数据源及其预处理

本研究采用数据源分别是覆盖福州主城区的 1993 年 6 月 26 日、2000 年 6 月 29 日和 2008 年 7 月 5 日的 三景 LandsatTM5 遥感影像数据与 2013 年 8 月 4 日和 2016 年 7 月 27 日的两景 Landsat8 遥感影像数据。所有 影像均来源于中国科学院计算机网络信息中心,无云区能 100%覆盖研究区,影像质量较好。图像预处理主 要包括几何校正、大气校正和影像裁剪等。

1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用/覆盖分类

根据中国土地资源分类系统的分类标准,结合福州市实际土地利用情况,将研究区的土地利用类型划分为林/草地、水体、农田、湿地、建设用地和裸地6种类型。本次5个年份遥感影像总体分类精度分别为: 84.08%、81.66%、82.70%、80.62%和80.28%;Kappa系数分别达到0.81、0.78、0.79、0.77和0.76;分类等级良好,分类结果可信度较高。再结合国内外研究学者对绿色空间的界定<sup>[30-33]</sup>与本研究区域的特点,选取下垫面中对典型的林/草地、水体和湿地为绿色空间研究对象。

1.3.2 绿色空间演化过程的界定

绿色空间的演化过程可分为以下 4 种情况:绿色空间扩张,即非绿色空间类型向绿色空间的转变;绿色空间损失,即绿色空间向非绿色空间的转变;绿色空间交换,即绿色空间之间的相互转换;绿色空间不变,即绿色空间类型未发生改变。通过 ArcGIS 10.2 软件工具对 5 个年份的绿色空间专题图进行叠置分析,可得到 1993—2000、2000—2008、2008—2013、2013—2016 和 1993—2016 的 5 个时段的绿色空间动态演化情况(图 1)。



图1 研究区绿色空间演化过程变化图

Fig.1 Temporal variations of the urban green space evolution of Fuzhou city

在利用 Landsat 卫星遥感数据反演地表温度时,国内外普遍采用的方法主要有热辐射传输方法、单窗算

<sup>1.3.3</sup> 地表温度反演与温度标准化分级

法、劈窗算法和单通道算法,大量研究证明了这些算法的可行性<sup>[34-38]</sup>。其中,覃志豪等人提出的单窗算法 (2001年)简便易行,所涉参数较易获取,反演精度能够满足要求,故而本研究选用此方法进行地表温度的反 演<sup>[38]</sup>。对 Landsat TM 5 和 Landsat OLI 8 的热红外波段反演 5 景遥感影像的地表温度,具体步骤如下:

(1)热红外波段灰度值(DN值)转化为相应的辐射强度值:

$$L_{\lambda} = \text{gain} \times DN + \text{offset} \tag{1}$$

式中, $L_{\lambda}$ 表示传感器接收到的热辐射强度, W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>; DN 表示热红外波段的像元灰度值, 即 Landsat 5 的 第 6 波段和 Landsat 8 TIRS 载荷的第 10 波段的亮度值; gain 和 offset 分别为热红外波段对应的增益和偏置。

(2)热辐射强度值转化为亮度温度:

$$T_{b} = \frac{K_{2}}{\ln\left(1 + \frac{K_{1}}{L_{\lambda}}\right)}$$
(2)

式中, $T_b$ 为像元的亮度温度,K; $K_1$ 和 $K_2$ 为常量,对于 Landsat 5卫星, $K_1 = 607.76$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>, $K_2 = 1260.56$ K;对于 Landsat 8卫星, $K_1 = 774.89$ W m<sup>-2</sup> sr<sup>-1</sup>  $\mu$ m<sup>-1</sup>, $K_2 = 1321.08$ K<sub>o</sub>

(3)计算地表温度(LST):

$$T_{s} = \frac{a \times (1 - C - D) + [b \times (1 - C - D) + C + D] \times T_{b} - D \times T_{a}}{C}$$
(3)

$$C = \tau \times \varepsilon \tag{4}$$

$$D = (1 - \tau) \left[ 1 + \tau (1 - \varepsilon) \right]$$
(5)

式中, $T_s$ 为像元的实际地表温度,K;a和b为常量, $a = -67.355351, b = 0.458606; T_a$ 为大气平均作用温度, $K;\tau$ 为大气透射率; $\varepsilon$ 为地表比辐射率。

在标准大气状态下(天空晴朗、没有涡旋作用),大气平均作用温度是地面附近气温的线性函数,用热带 平均大气公式(6)近似地推算 T<sub>\_</sub><sup>[39]</sup>:

$$T_a = 17.9769 + 0.91715T_0 \tag{6}$$

式中,T<sub>0</sub>为地面附近气温,K。

采用 NASA 提供的大气校正参数计算器和 MODTRAN 软件获取大气透射率。

采用归一化植被指数阈值法<sup>[40]</sup>估计地表比辐射率 $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.92 & \text{NDVI} < 0.2 \\ \varepsilon_v P_v + \varepsilon_u (1 - P_v) + d\varepsilon \ 0.2 \le \text{NDVI} \le 0.5 \\ 0.99 & \text{NDVI} > 0.5 \end{cases}$$
(7)

$$P_{v} = \left[\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}}\right]^{2}$$
(8)

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_u) (1 - P_\nu) F \varepsilon_\nu$$
<sup>(9)</sup>

式中, $\varepsilon_v$ 为植被比辐射率,取值0.99; $\varepsilon_u$ 为城市表面比辐射率,取值0.92; $d\varepsilon$ 为包括自然表面的几何分布和内部反射的影响;F为形状因子,取值0.55;NDVI<sub>max</sub>取0.5,NDVI<sub>min</sub>取0.2。

(4)温度标准化分级

为了消除误差增加不同时像温度数据的可比较性,研究采用地表温度标准化分级公式(10)对绝对温度进行处理。后采用 Jenks 提出的自然间断点分级法<sup>[41]</sup>对 *T*<sub>N</sub>进行重分类可得到 1993—2016 年研究区地温等级分布图(图 2)。其中,将低温区和次低温区合并为冷岛区域,次高温区、高温区和超高温区合并为热岛区域。

$$T_N = \frac{\text{LST} - \text{LST}_{\min}}{\text{LST}_{\max} - \text{LST}_{\min}}$$
(10)

#### http://www.ecologica.cn



式中, $T_N$ 为地表温度标准化值;LST 为地表温度,min 及 max 分别代表其最小值和最大值。

图 2 研究区温度等级分布图 Fig.2 Distribution of different temperature degrades

1.3.4 统计分析

(1)叠置分析

首先分别进行两个年份土地利用/覆盖类型的变化检测。利用 AreGIS 10.2 中的 Map Calculator 工具将两个时相的土地利用类型分别编号,相同地类编号相同,再分别将两时相的分类结果图作如下式叠加计算,由此可以获得前后两时相土地利用变化情况。其中:*i*1 和 *i*2 分别是前后两个年份土地利用类型图中每个地类的编号。如数字 1—6 分别代表水体、林/草地、农田、建设用地、湿地和裸地;而叠置后的两位数如 11 表示水体不变,12 则表示水体演化成林/草地,以此类推。

$$i1 = i1 \times 10 + i2$$
 (11)

(2)重心分析

研究通过 ArcGIS 10.2 技术平台的 Mean Center 工具实现冷/热岛重心、城市重心和绿色空间重心的提取<sup>[21,42]</sup>,从而进一步揭示城市不同用地类型的空间演变规律与地表热环境演变趋势的关系。

(3) 剖面线分析

分别选取 1993 年、2000 年、2008 年和 2016 年 4 个年份的地表温度等级和相应年份的土地利用/覆盖类型,以及 1993—2016 年的地表温差和对应的土地利用/覆盖变化作为分析对象,提取剖面沿线的地类与地表 热环境特征变化分析,以更有效揭示城市沿线不同用地类型引起的温度效应。

# 2 结果与讨论

2.1 城市绿色空间演化过程变化特征

对各年份土地利用类型进行叠置分析,得到城市绿色空间在不同研究阶段的演化情况(图1、表1)。从 面积变化大小来看,各研究阶段中,绿色空间不变面积>绿色空间损失面积>绿色空间扩张面积>绿色空间交 换面积;1993—2016年,城市绿色空间不变、损失、扩张和交换的面积演化速率分别为1.66、2.02、0.21、0.10 km<sup>2</sup>/a。结合1993—2016年的土地利用转移情况表(表2)发现,绿色空间损失部分主要转化为建设用地,其中尤以林/草地损失最多,表现为:林/草地(16.80km<sup>2</sup>)>水体(11.74km<sup>2</sup>)>湿地(1.76km<sup>2</sup>)。演化过程中,绿色空间扩张与损失的面积差均为负值,且在2000—2008年这一阶段相差最多,为22.21km<sup>2</sup>。空间分布上看,面积差值最大的区域为仓山区(-33.23km<sup>2</sup>),其次是晋安区(-6.03km<sup>2</sup>)和鼓楼区(-1.96km<sup>2</sup>),最小的是台江区(-0.55km<sup>2</sup>)。

Table 1Statistical results of different UGS (ubran green space) evolution process from 1993 to 2016									
	绿色空间不变 UGS Unchanged		绿色空间扩张 UGS Expansion		绿色空间交换 UGS Exchanged		绿色空间损失 UGS Loss		
研究阶段 Study period	面积 Area/km <sup>2</sup>	演化速率 Evolution rate/ (km <sup>2</sup> /a)							
1993—2000	58.99	8.43	14.63	2.09	2.69	0.38	25.28	3.61	
2000—2008	45.90	5.74	5.90	0.74	2.67	0.33	28.11	3.51	
2008—2013	42.92	8.58	5.56	1.11	0.96	0.19	10.58	2.12	
2013—2016	38.35	12.78	6.04	2.01	0.89	0.30	10.20	3.40	
1993—2016	38.19	1.66	4.73	0.21	2.36	0.10	46.50	2.02	

表 1 研究区 1993—2016 年不同绿色空间演化过程面积变化统计结果

表 2 研究区 1993—2016 年土地利用转移变化面积统计结果/km<sup>2</sup>

Table 2 Statistical results of transfer matrix of LULC from 1995 to 2010									
土地利用/覆盖 Landuse and landcover	水体 Water	湿地 Wetland	林/草地 Forest/grass	农田 Farmland	建设用地 Build-up land	裸地 Bare land	总和 Sum (1993 年)		
水体 Water	24.64	0.14	0.15	3.17	11.74	0.19	40.04		
湿地 Wetland	1.13	2.09	0.81	0.23	1.76	0.01	6.02		
林/草地 Forest/grass	0.13	0.00	11.46	12.28	16.80	0.33	40.99		
农田 Farmland	0.08	0.00	2.98	17.82	49.47	0.20	70.55		
建设用地 Build-up land	0.51	0.00	1.16	9.64	87.98	0.18	99.46		
裸地 Bare land	0.01	0.00	0.00	0.14	0.58	0.01	0.74		
总和 Sum(2016 年)	26.49	2.23	16.56	43.27	168.33	0.91	257.80		
面积变化 Area change	-13.55	-3.79	-24.42	-27.28	68.86	0.18	0.00		

#### 2.2 城市地表温度变化特征

从面积大小上来看(表 3),各研究阶段中,不变的冷岛区>不变的热岛区>由冷岛区转为热岛区>由热岛 区转为冷岛区。此外,不变的冷岛区面积波动较大,呈现出先下降后上升的趋势,而不变的热岛区的面积变化 趋势则相反。再者,由冷岛区向热岛区转化的面积波动范围为 3.45—19.72km<sup>2</sup>,由热岛区向冷岛区转化的面 积则较少,范围在 0.21—1.93km<sup>2</sup>之间。

1993—2016年,冷岛不变区、热岛不变区、冷岛损失区和热岛损失区的年变化量分别达到 5.33、0.49、 1.47、0.12km²/a。从温度等级转移情况上来看(表4),不同的温度分布区有较大变化,冷岛区面积大幅减少, 热岛区面积显著增加。低温区与次低温区面积损失分别为 25.41km²和 40.40km²,年变化率为 1.10km²/a 和 1.76km²/a。其中,次高温区面积增加最为显著,其次是高温区和超高温区。热岛区从 1993 年开始逐渐上升, 至 2008 年达到最大值,后又下降,至 2016 年又有所回升。热岛区面积增加最为明显的是仓山区,其次是晋安 区和鼓楼区;而台江区的热岛区面积则有所减少。这与绿色空间损失与扩张的空间分布情况一致。因此,城

2445

#### 市冷/热岛区分布变化与下垫面土地利用/覆盖变化情况息息相关。

Table 3         Statistical results of cold/heat island evolution during different periods									
	不变的冷岛区 Unchanged UCI		由冷岛区转为热岛区 UCI→UHI		由热岛区转为冷岛区 UHI→UCI		不变的热岛区 Unchanged UHI		
研究阶段 Study period	面积 Area/km <sup>2</sup>	演化速率 Evolution rate/ (km <sup>2</sup> /a)							
1993—2000	157.92	22.56	9.94	1.42	0.21	0.03	12.41	1.77	
2000—2008	119.86	14.98	19.72	2.47	2.86	0.36	32.41	4.05	
2008—2013	116.55	23.31	2.89	0.58	1.93	0.39	38.36	7.67	
2013—2016	120.65	40.22	3.45	1.15	1.58	0.53	37.98	12.66	
1993—2016	122.65	5.33	33.89	1.47	2.81	0.12	11.33	0.49	

#### 表 3 研究区各阶段冷/热岛斑块转移情况统计结果

UCI: 冷岛区 Urban cold island; UHI: 热岛区 Urban heat island

表 4 1993—2016 年研究区温度等级转移情况统计结果/km<sup>2</sup> Table 4 Statistical results of transfer matrix of temperature grades from 1993 to 2016

				1			
温度等级 LST grade	低温区 Low LST grade	次低温区 Sub-low LST grade	中温区 Mediate LST grade	次高温区 Sub-high LST grade	高温区 High LST grade	超高温区 Ultra-high LST grade	总和 Sum (1993 年)
低温区 Low LST grade	38.91	23.77	8.29	3.94	1.30	0.03	76.24
次低温区 Sub-low LST grade	11.90	48.07	33.45	22.14	6.07	0.42	122.05
中温区 Mediate LST grade	0.02	7.01	12.98	13.03	2.80	0.06	35.9
次高温区 Sub-high LST grade	0.00	2.47	8.58	8.10	1.78	0.13	21.06
高温区 High LST grade	0.00	0.33	0.87	0.80	0.43	0.02	2.45
超高温区 Ultra-high LST grade	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.06
总和 Sum(2016 年)	50.83	81.65	64.17	48.01	12.41	0.69	257.76
面积变化 Area change	-25.41	-40.40	28.27	26.95	9.96	0.63	0.00

LST: 地表温度 Land surface temperature

### 2.3 绿色空间演化过程的温度效应

### 2.3.1 基于空间重心法的城市冷/热岛演化

通过空间重心法分析城市冷/热岛重心与城市重心的迁移变化情况(图3)发现,2000年之前,城市重心 和热岛重心转移方向不完全一致;2000年以后,城市热岛重心与城市重心偏移方向基本吻合,且逐渐聚集;而 城市冷岛重心则越来越偏离热岛和城市重心。结合不同绿色空间类型的重心位置迁移情况(图3)发现,林/ 草地、水体和湿地3种绿色空间类型均发生了较大的位移,位移最大的是湿地,表明其受到的干扰最为强烈; 其次是水体,最后是林/草地。这说明城市热岛重心与城市重心转移方向有关,而城市冷岛的重心与城市绿色 空间分布关系密切。城市下垫面土地利用/覆盖类型的变化是造成城市地表温度扰动的重要因素。

2.3.2 城市下垫面土地利用变化的温度效应

从不同温度等级与用地类型分布变化情况来看(图4),1993年和2000年,研究区以低温区和次低温区为 主,分布着大量的城市绿色空间和较少的建设用地类型;以建设用地为主的次高温、高温和超高温区分布较 少。2008年后,大量的绿色空间被建设用地占用,次高温区和高温区面积显著扩大,在浦下洲湿地范围甚至 出现了超高温区。2016年,超高温区消失,但仍有较多的高温区分布。

从地表温差与用地变化关系上看出(图5),1993—2016年,福州主城区地表温差呈峰谷交替态势出现。峰 值主要由绿色空间转化为建设用地或裸地的绿色空间损失过程引起的,其温差高于平均地表温差;波谷位置多 由绿色空间不变过程引起,温差低于平均地表温差;此外,由建设用地或裸地转化为绿色空间的扩张过程所引起





的地表温度降温较小,这主要由于绿色空间演化方式并非是成片扩张,而是在建设用地中零星式的扩散,其引起的温差必然受到周边用地类型的影响。定量研究不同绿色空间演化过程引起的温度效应尤为重要。





Fig.4 Profile analysis of the relationship between LST grade and LULC from 1993 to 2016

温度等级 1—6 分别代表低温、次低温、中温、次高温、高温和超高温;用地类型 1—6 分别代表水体、林/草地、农田、建设用地、湿地和裸地; LST(land surface temperature),表示地表温度;LULC(land use/land cover),表示土地利用/覆盖

# 2.3.3 不同绿色空间演化过程的温度效应

采用随机采样的方式,对1993—2016年间,研究区100组不同绿色空间演化类型及相应的地表温度变化数据进行统计分析。从结果上看(图6),不同绿色空间演化类型引起的降温效应依次排序为:绿色空间扩张> 绿色空间不变>绿色空间交换>绿色空间损失。值得注意的是,绿色空间损失引起的平均地表温差约为 +7.0℃,表现为升温作用;而绿色空间扩张带来的平均地表温差约为-5.0℃,表现为降温作用,二者产生的平 均升降温作用并不相同。因此,由用地类型转变带来的温度变化并非简单的"对等"关系。这是由于在快速

40卷





的城市化进程中,对绿色空间的挤占通常是成片且较为 聚集的,这很大程度上削弱了绿色空间的冷岛效果。相 反,绿色空间的扩张往往是通过边缘式或飞地式的方式 实现,周边环境的变化使其并不能完全抵消先前由于绿 色空间的异地损失所带来的升温。总之,城市绿色空间 损失和扩张之间存在较大的不均衡性,由此引起了地表 温差的不均匀分布。而针对城市下垫面土地利用/覆盖 类型的优化调控,尤其是对绿色空间存量的科学调配, 值得学者们进一步研究。

#### 3 结论

本研究以福州市主城区绿色空间为研究对象,利用 叠置分析法、空间重心法和剖面分析等方法,定量分析 福州城市绿色空间演化过程及其引起的地表温度变化。 结果表明:(1)1993—2016年,福州主城区下垫面土地





利用/覆盖变化显著,城市建设用地面积大幅增加,绿色空间数量明显减少,城市地表升温明显。(2)城市下 垫面地表温度等级空间分布变化较大,冷岛区面积大幅减少,热岛区面积显著增加。(3)城市热岛重心与城 市重心的迁移方向有关;城市冷岛重心则与城市绿色空间的分布关系密切。(4)城市绿色空间的不同演化过 程所引起的地表温度变化不尽相同,绿色空间扩张和绿色空间损失分别有着最大的降温和升温效果。

因此,采用多方法耦合分析不同绿色空间演化类型引起的地表温差,可定量出不同绿色空间演化类型引起的地表温度变化。本研究以独特的视觉和方法,表征了城市下垫面不同温度等级和土地利用/覆盖类型的 空间分布变化及关系,有效识别了不同绿色空间演化过程所引起的地表温度变化差异,为城市绿色空间健康 发展提供了崭新思路和科学依据。

综上所述,城市绿色空间作为城市的"绿脉",在缓解城市热岛效应方面具有重要作用。快速的城市化发展过程中,下垫面的土地利用/覆盖变化是引起福州主城区地表温度变化的重要因素。而城市绿色空间损失的日益加剧与不合理的绿色空间布局扩张方式,一定程度上加剧了城市热岛效应。在未来,应进一步将城市绿色空间统筹进城市复合生态系统加以规划和管理,着力提升城市下垫面用地类型在质量和数量方面的配置水平,以有效缓解城市热岛效应,为绿色城市可持续、健康发展提供支持。

**致谢:**本研究是在福州大学至诚学院、福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室、福建师范 大学地理科学学院和福州大学环境与资源学院的共同合作下完成。

#### 参考文献(References):

- [1] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. Science, 2008, 319(5864): 756-760.
- [3] Forman R T T. Urban ecology principles: are urban ecology and natural area ecology really different? Landscape Ecology, 2016, 31(8): 1653-1662.
- [4] 孙东琪, 陈明星, 陈玉福, 叶尔肯·吾扎提. 2015-2030 年中国新型城镇化发展及其资金需求预测. 地理学报, 2016, 71(6): 1025-1044.
- [5] Akbari H, Kolokotsa D. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. Energy and Buildings, 2016, 133: 834-842.
- [6] Ngom R, Gosselin P, Blais C. Reduction of disparities in access to green spaces: their geographic insertion and recreational functions matter. Applied Geography, 2016, 66: 35-51.
- [7] Jaganmohan M, Knapp S, Buchmann C M, Schwarz N. The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(1): 134-145.
- [8] Santamouris M. Cooling the cities a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. Solar Energy, 2014, 103: 682-703.
- [9] Žuvela-Aloise M, Koch R, Buchholz S, Früh B. Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna. Climatic Change, 2016, 135(3/4): 425-438.
- [10] Lahmer W, Pfützner B, Becker A. Assessment of land use and climate change impacts on the mesoscale. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2001, 26(7/8): 565-575.
- [11] Sun R H, Chen A L, Chen L D, Lü Y H. Cooling effects of wetlands in an urban region: the case of Beijing. Ecological Indicators, 2012, 20: 57-64.
- [12] Ren Y, Deng L Y, Zuo S D, Song X D, Liao Y L, Xu C D, Chen Q, Hua L Z, Li Z W. Quantifying the influences of various ecological factors on land surface temperature of urban forests. Environmental Pollution, 2016, 216: 519-529.
- [13] 杨一鹏,曹广真,侯鹏,蒋卫国,陈云浩,李京.城市湿地气候调节功能遥感监测评估.地理研究, 2013, 32(1):73-80.
- [14] Wang M N. The contribution of urbanization to recent extreme heat events and white roof mitigation strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area//Proceedings of EGU General Assembly Conference. Vienna, Austria: EGU, 2015.
- [15] AboElata A A A. Study the vegetation as urban strategy to mitigate urban heat island in mega city Cairo. Procedia Environmental Sciences, 2017, 37: 386-395.
- [16] Heinrichs H U, Markewitz P. Long-term impacts of a coal phase-out in Germany as part of a greenhouse gas mitigation strategy. Applied Energy, 2017, 192; 234-246.
- [17] Kyriakodis G E, Santamouris M. Using reflective pavements to mitigate urban heat island in warm climates Results from a large scale urban mitigation project. Urban Climate, 2018, 24: 326-339.
- [18] Yusuf Y A, Pradhan B, Idrees M O. Spatio-temporal assessment of urban heat island effects in Kuala Lumpur Metropolitan City using Landsat images. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2014, 42(4): 829-837.
- [19] Bai X M, Shi P J, Liu Y S. Society: realizing China's urban dream. Nature, 2014, 509(7499): 158-160.
- [20] Shahraiyni H T, Sodoudi S, El-Zafarany A, Abou El Seoud T, Ashraf H, Krone K. A comprehensive statistical study on daytime surface urban heat island during summer in urban areas, case study: Cairo and its new towns. Remote Sensing, 2016, 8(8): 643.
- [21] Liu Y X, Peng J, Wang Y L. Diversification of land surface temperature change under urban landscape renewal: a case study in the main city of Shenzhen, China. Remote Sensing, 2017, 9(9): 919-937.
- [22] 王琳, 徐涵秋, 李胜. 福州城市扩展的遥感动态监测. 地球信息科学, 2006, 8(4): 129-135.
- [23] 张春桂.用 MODIS 植被指数研究福州城区空间扩展变化.气象, 2006, 32(10): 20-26.
- [24] 兰思仁,唐思晟,张晓萍,肖胜,张晓莹,陈建霞,黄晓文.基于遥感数据的福州景观格局与城市森林体系.中国城市林业,2009,(1): 4-7.
- [25] 刘智才,徐涵秋,唐菲,黄绍霖.福州浦下洲湿地开发引发的热环境变化.湿地科学,2014,12(5):590-596.

#### http://www.ecologica.cn

- [26] 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, 2005, (5): 36-39.
- [27] 徐涵秋. 福州市三维城市热岛分布//王超. 遥感见证——中国遥感卫星地面站建立 20 年卫星影像图集. 北京: 科学出版社, 2006: 298.
- [28] 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.
- [29] 于丹丹.官方发布内地"新四大火炉"福州成为高温王者.(2013-07-16). http://politics.people.com.cn/n/2013/0716/c70731-22207837. html.
- [30] Turner T. Open space planning in London: from standards per 1000 to green strategy. Town Planning Review, 1992, 63(4): 365-386.
- [31] 孟伟庆,李洪远,朱琳,陈小奎.城市绿化的发展思路——绿色空间建设.城市环境与城市生态,2005,18(2):8-10.
- [32] 李锋, 王如松, Paulussen J. 北京市绿色空间生态概念规划研究. 城市规划汇刊, 2004, (4): 61-64.
- [33] 贾琦. 城市绿色空间演化及其冷岛强度遥感分析[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [34] Cai Y B, Chen Y H, Tong C. Spatiotemporal evolution of urban green space and its impact on the urban thermal environment based on remote sensing data: a case study of Fuzhou City, China. Urban Forestry & Urban Greening, 2019, 41: 333-343.
- [35] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D22): 4688.
- [36] 丁凤, 徐涵秋. 基于 Landsat TM 的 3 种地表温度反演算法比较分析. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2008, 24(1): 91-96.
- [37] 王猛猛. 地表温度与近地表气温热红外遥感反演方法研究[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2017.
- [38] 覃志豪, Zhang M H, Karnieli A, Berliner P. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
- [39] 覃志豪, Li W J, Zhang M H, Karnieli A, Berliner P. 单窗算法的大气参数估计方法. 国土资源遥感, 2003, 15(2): 37-43.
- [40] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. Remote Sensing of Environment, 2004, 90 (4): 434-440.
- [41] Peng J, Xie P, Liu Y X, Ma J. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region. Remote Sensing of Environment, 2016, 173: 145-155.
- [42] Peng J, Zhao M Y, Guo X N, Pan Y J, Liu Y X. Spatial-temporal dynamics and associated driving forces of urban ecological land: a case study in Shenzhen City, China. Habitat International, 2017, 60: 81-90.