

引用格式:侯浩然,丁凤,黎勤生.近20年来福州城市热环境变化遥感分析[J].地球信息科学学报,2018,20(3):385-395. [Hou H R, Ding F, Li Q S. Remote sensing analysis of changes of urban thermal environment of Fuzhou city in China in the past 20 years[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(3):385-395. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170342

## 近20年来福州城市热环境变化遥感分析

侯浩然<sup>1</sup>, 丁 凤<sup>1,2,3\*</sup>, 黎勤生<sup>1</sup>

1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学 湿润亚热带山地生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007; 3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福州 350007

### Remote Sensing Analysis of Changes of Urban Thermal Environment of Fuzhou City in China in the Past 20 Years

HOU Haoran<sup>1</sup>, DING Feng<sup>1,2,3\*</sup>, LI Qinsheng<sup>1</sup>

1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China

**Abstract:** Urbanization is taking place at an unprecedented rate around the world, particularly in China in the latest two decades. The effects of the intensive land-use / land-cover changes on urban surface temperatures and the consequences of these changes to human health are becoming progressively larger problems. Fuzhou, which is the capital city of Fujian province, is located in the coastal area of southeastern China. It has experienced a significant change of urban thermal environment during this period, and was recently named as one of the “new four furnace cities” in China. To study the process of changes in the thermal environment of Fuzhou city in the past 22 years, three Landsat images acquired in the years of 1994, 2003 and 2016, respectively, were used. HUTS is a widely used thermal sharpener method, which uses Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface albedo ( $\alpha$ ) to downscale the spatial resolution of thermal infrared data. It was applied to obtain LST images of higher spatial resolution (30 m) in the study area. The three downscaled LST images were then normalized, rescaled and overlaid to produce difference images to find out the changes of the thermal environment between different dates. Furthermore, by introducing simulations of different landscape patterns, these changes were evaluated and analyzed from the perspective of landscape ecology. The research results showed that, in 1994-2016, the high temperature area was increased from 35.75 km<sup>2</sup> to 184.11 km<sup>2</sup> with the city expansion. High temperature patches were expanded from city center to suburbs. On the other hand, the area and density of the high temperature patches were remarkably declined with the urban renewal. The Urban-Heat-Island Ratio Index (URI) rose up from 0.39 to 0.52, indicating that the urban heat island effect in the study area has been enhanced. Overall, the thermal environment of main urban area in Fuzhou has changed greatly in the past 22 years. Aggregation of high temperature patches was mitigated in Gulou, Taijiang and southern Jin'an Districts. Meanwhile, the temperature increased significantly in most area of Cangshan District, Mawei District

收稿日期 2017-07-22; 修回日期: 2017-12-22.

基金项目 福建省自然科学基金项目(2017J01463、2009J01210); 福建省教育厅项目(JA09059)。[ **Foundation items:** Natural Science Foundation of Fujian Province, China, No.2017J01463, 2009J01210; Education Department of Fujian Province, China, No.JA09059. ]

作者简介 侯浩然(1993-), 男, 硕士生, 研究方向为资源环境遥感与应用。E-mail: Hhr1993@outlook.com

\*通讯作者 丁 凤(1973-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事遥感与GIS应用研究。E-mail: fding@vip.sina.com

and Minhou County due to rapid urbanization.

**Key words:** urban thermal environment; thermal sharpening; land surface temperature; landscape metrics; Fuzhou

**\*Corresponding author:** DING Feng, E-mail: fding@vip.sina.com

**摘要** 城市热环境是城市微气候的重要组成部分,已成为近年来的研究热点。受制于卫星传感器较低的热红外波段空间分辨率,此类数据反演得到的地表温度难以反映城市热环境的实际情况。为解决这一困境,本文利用空间降尺度 HUTS 算法反演得到 30 m 空间分辨率的福州市中心城区 1994 年 5 月 12 日、2003 年 5 月 29 日和 2016 年 7 月 27 日 3 个时相的地表温度影像。在此基础上,结合土地利用等数据对热环境的时空变化做定量分析,并进一步引入景观指数,分析近 20 年间福州市中心城区高温等级斑块的形态变化。结果表明:① 近 20 年间随着城市拓展,福州市建成区的高温区域面积从 35.75 km<sup>2</sup> 增加到 184.11 km<sup>2</sup>,高温等级斑块不断从市中心向四周扩散;② 市中心的特高温斑块和高温斑块趋向破裂、分散,聚集程度下降,次高温斑块的面积与占比均大幅提升,成为建成区内高温区域的主要组成部分;③ 城市热岛比例指数 URI 由 0.39 上升到 0.52,热岛效应明显加强。总体上,近 20 a 间福州市建成区的热环境变化较大,其中鼓楼区南部、台江区和晋安区南部的高温区域聚集现象有所改善,而仓山区、马尾区和闽侯县的大部分区域在经历快速城市化过程后温度等级明显升高。

**关键词** 城市热环境;热红外数据空间降尺度;地表温度;景观指数;福州市

## 1 引言

采用遥感技术监测城市热岛效应和城市热环境变化是近年来城市环境监测和城市生态研究的热点领域<sup>[1-5]</sup>。随着城市化进程的快速发展,人为改造的下垫面和人为活动的热量排放打破了原有的热平衡,使得城市及其周边区域的生态环境发生了很大变化<sup>[6]</sup>,因此,开展城市热环境变化研究对于保护生态环境、建设宜居城市具有重要指导意义<sup>[7]</sup>。然而,对于城市这种下垫面异质性很大的区域,使用遥感方法对其热环境进行研究却受到很多因素的制约,其中最为主要的因素是现有热红外遥感数据空间分辨率的限制<sup>[8]</sup>。目前研究热环境所需要热红外数据,空间分辨率普遍在 100 m 左右,在这个尺度上,可以正确区分城市与郊区的热环境差异,却无法划分城市内部的道路、高建筑密度区域、低建筑密度区域、公园和具有一定规模的绿地的热环境差异<sup>[9]</sup>。

空间降尺度技术是解决现有困境的有效途径之一,它通过对同一传感器的不同分辨率波段数据进行整合,从而实现提高热红外影像空间分辨率的目标<sup>[10]</sup>。运用空间降尺度算法可以发掘遥感影像的潜力,获得与可见光波段空间分辨率相同的热红外影像,这对于提高城市热环境的监测水平具有重要意义<sup>[11]</sup>。本文以福建省福州市为例,采用现有文献中表现较好的空间降尺度 HUTS 算法,获取空间分辨率为 30 m 的 1994 年 5 月 12 日、2003 年 5 月 29 日和 2016 年 7 月 27 日 3 个时相的地表温度影像,结合土地利用、城市规划等数据定量分析近 20 年福州

市建成区的热环境发展变化情况,主要包括:随着建成区拓展地表温度分布的时空演变,不同等级的温度分布区域的扩张与收缩,城市热岛的变化情况等,同时引入多个景观指数分析建成区中高温斑块在近 20 年的变化情况。

## 2 研究区及数据源

本文以福建省福州市为研究区(图 1),范围以《福州市城市总体规划(2011-2020)》中确定的福州市中心城区为主,主要包括福州市的鼓楼区、台江区、仓山区、马尾区以及晋安区和闽侯县的部分地区,2016 年区内常住人口约 350 万<sup>[12]</sup>,是福州市近 20 年来快速发展的核心区域。福州全年冬短夏长,气候湿润,属亚热带海洋性季风气候。研究区所在位置属典型的河口盆地地貌,地势西高东低,盆地四周被群山所环抱,闽江穿城而过。

表 1 是本文选用的 3 幅 Landsat 影像的具体信息和参数,考虑到地表温度的季相特征,均选用成像时间为夏季的影像,影像的轨道条带号均为 119/42。3 幅影像成像质量较好,云量较小且云大多位于影像边缘,不影响使用。数据经过辐射校正、几何校正和掩膜去云处理<sup>[13-14]</sup>,精度满足研究需要。

## 3 研究方法

### 3.1 地表温度反演算法

本文采用普适性单通道算法反演地表温度,该算法最早由 Jiménez-Muñoz 等提出<sup>[15]</sup>,对 Landsat 5

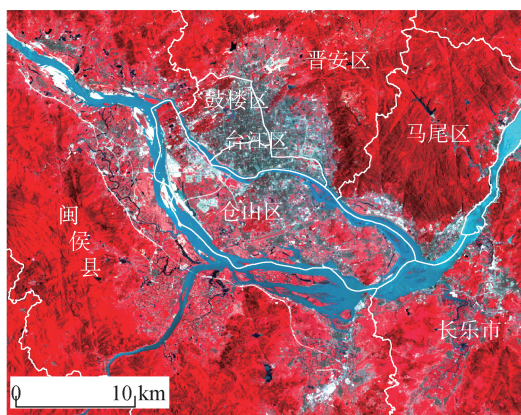


图1 福州市位置图(2003年5月29日 Landsat 7影像, RGB432标准假彩色合成)

Fig. 1 Location of the study area (Landsat 7 imagery acquired on May 29, 2003, RGB432)

表1 本研究使用的 Landsat 数据

Tab. 1 Landsat data used in this study

日期	卫星	传感器	多光谱波段 分辨率/m	热红外波段 分辨率/m
1994-05-12	Landsat 5	TM	30	120
2003-05-29	Landsat 7	ETM+	30	60
2016-07-27	Landsat 8	OLI/TIRS	30	100

数据的应用效果较好,后又根据 Landsat 7 和 Landsat 8 数据特性进行了改进<sup>[16-18]</sup>。该算法的优点是普适性较强,所需的大气参数只有一个大气水汽含量  $w$ ,降低了因所需大气参数较多而引起的估算误差。以 Landsat 5 数据为例,具体求算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$LST = \gamma / [\varepsilon^{-1}(\varphi_1 \times L_{\text{sensor}} + \varphi_2) + \varphi_3] + \delta \quad (1)$$

$$T_{\text{sensor}} = K_2 / \ln(K_1 / L_{\text{sensor}} + 1) \quad (2)$$

$$\gamma = 1 / [c_2 \cdot L_{\text{sensor}} (\lambda^4 \cdot L_{\text{sensor}} / c_1 + \lambda^{-1}) / T_{\text{sensor}}] \quad (3)$$

$$\delta = T_{\text{sensor}} - \gamma \cdot L_{\text{sensor}} \quad (4)$$

式中: $LST$ 为地表温度,K; $\varepsilon$ 表示地表比辐射率; $L_{\text{sensor}}$ 表示卫星高度上所观测到的热红外波段辐射亮度值; $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 和 $\varphi_3$ 为大气水汽含量  $w$  的函数。对于2000年1月19号以后的 Landsat 数据, $w$ 可直接从美国宇航局 NASA 提供的全球大气参数库获得(<https://atm-corr.gsfc.nasa.gov/>);对于此日期之前的 Landsat 数据,则可根据文献[19]中提出的全国范围的大气水汽含量估算模型进行估算。 $T_{\text{sensor}}$ 表示星上亮温; $K_1$ 和 $K_2$ 为常量;对于 Landsat 5,  $K_1=607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K_2=1260.56 \text{ K}$ ;对于 Landsat 7,  $K_1=666.09.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K_2=1282.71 \text{ K}$ ;对于 Landsat 8 TIRS 波段 10,  $K_1=774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $K_2=1321.08 \text{ K}$ ;  $c_1$ 、 $c_2$ 为 Planck

辐射常数,  $c_1=1.19104 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ,  $c_2=1.43877 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ ;  $\lambda$ 为有效作用波长,对于 Landsat 5、Landsat 7 的第6波段以及 Landsat 8 的 TIRS 波段 10,  $\lambda=11.45 \mu\text{m}$ 。此外,需要说明的是,经过修正, Landsat 7 和 Landsat 8 数据的单通道算法求算过程与 Landsat 5 数据的求算过程略有不同,具体参见文献[16]–[19]。

### 3.2 空间降尺度算法

本文采用现有文献中表现较好的 HUTS 算法作为地表温度影像降尺度的算法<sup>[8-9,20-21]</sup>。该算法最早由 Dominguez 等<sup>[21]</sup>于2011年提出,它在 TsHARP 等算法的基础上引进一个新参数地表反照率( $\alpha$ ),由归一化植被指数(NDVI)和地表反照率( $\alpha$ )作为回归核,通过 120 m/60 m/100 m 分辨率的 NDVI 和  $\alpha$  与 120 m/60 m/100 m 分辨率的 LST 数据拟合出一个以 NDVI 和  $\alpha$  为自变量, LST 为因变量的高次回归方程,再通过 30 m 分辨率的 NDVI 和  $\alpha$  求出 30 m 分辨率的 LST。现有研究表明,相较于 DisTrad 和 TsHARP 等的算法,该算法在城市建成区等地表异质性较大的区域效果更好<sup>[9,21]</sup>。需要说明的是, Landsat 8 数据在发布时其热红外波段就已被 USGS 重采样为 30 m 空间分辨率,故本研究先将其退化为 100 m 分辨率,与重采样至 100 m 分辨率的 NDVI 和  $\alpha$  共同作为 HUTS 算法的训练数据。

图2为 HUTS 算法的流程图。其中,归一化植被指数(NDVI)的计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}} \quad (5)$$

式中: $\rho_{\text{NIR}}$ 和 $\rho_{\text{R}}$ 分别为近红外波和红光波段的地表反射率。

Landsat 5 和 Landsat 7 的反照率计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$\alpha = 0.356 \times \rho_1 + 0.130 \times \rho_2 + 0.373 \times \rho_3 + 0.085 \times \rho_4 + 0.072 \times \rho_5 - 0.0018 \quad (6)$$

式中: $\rho_1$ 为 Landsat 5 和 Landsat 7 的蓝光波段地表反射率; $\rho_2$ 为 Landsat 5 和 Landsat 7 的红光波段地表反射率; $\rho_3$ 为近红外波段地表反射率; $\rho_4$ 和 $\rho_5$ 为2个短波红外波段地表反射率。

而 Landsat 8 的反照率的计算则采用 Smith 等<sup>[24]</sup>于2010年提出的方法,该方法因简单易操作,获得了耶鲁大学的推荐<sup>[25]</sup>和较多学者的采用<sup>[26-27]</sup>,具体如下:



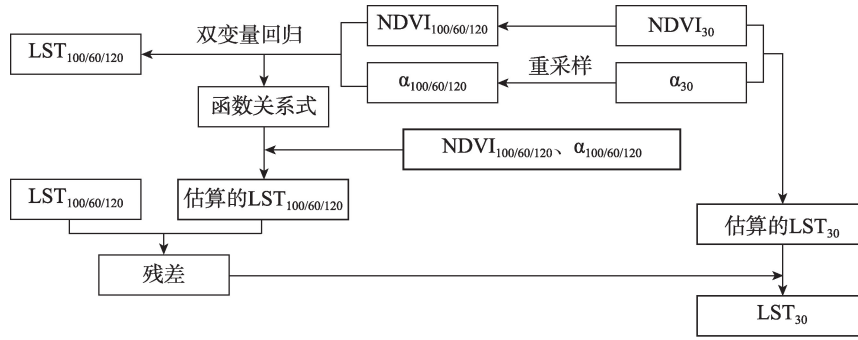


图2 HUTS算法流程

Fig. 2 Procedures of the HUTS method

$$\alpha = (0.356 \times \rho_2' + 0.130 \times \rho_4' + 0.373 \times \rho_5' + 0.085 \times \rho_6' + 0.072 \times \rho_7' - 0.0018) / 1.016 \quad (7)$$

式中:  $\rho_2'$  为 Landsat 8 的蓝光波段地表反射率;  $\rho_4'$  为 Landsat 8 的红光波段地表反射率;  $\rho_5'$  为近红外波段地表反射率;  $\rho_6'$  和  $\rho_7'$  为 2 个短波红外波段地表反射率。得到 LST、NDVI 与  $\alpha$  的 100 m/120 m 影像后, 即可用这 3 个量去求解式(8)的系数向量  $P$ :

$$\begin{aligned} LST = & P_1 \times NDVI^4 + P_2 \times NDVI^3 \times \alpha + P_3 \times NDVI^2 \times \alpha^2 \\ & + P_4 \times NDVI \times \alpha^3 + P_5 \times \alpha^4 + P_6 \times NDVI^3 \\ & + P_7 \times NDVI^2 \times \alpha + P_8 \times NDVI \times \alpha^2 + P_9 \times \alpha^3 \quad (8) \\ & + P_{10} \times NDVI^2 + P_{11} \times NDVI \times \alpha + P_{12} \times \alpha^2 \\ & + P_{13} \times NDVI + P_{14} \times \alpha + P_{15} \end{aligned}$$

通过对 LST、NDVI 和  $\alpha$  做多元回归分析, 求得系数向量  $P_1$ – $P_{15}$  的值, 得到用于降尺度的函数关系式。将 30 m 分辨率的 NDVI 和  $\alpha$  影像代入到函数关系式中, 即可得到降尺度的 30 m 分辨率的 LST 影像。对于回归关系产生的误差, 可以通过在降尺度的 30 m 分辨率的 LST 影像上叠加残差影像加以修正。表 2 是本研究采用的 3 幅影像求得的函数关系式及相关系数  $R^2$ 。

### 3.3 城市建成区的提取与城市拓展强度

城市建成区是指开发起来的、集中连片的公共设施完善的地区, 包括城郊已经开发起来的, 公共设施基本完善的地区<sup>[28]</sup>, 这类地区在遥感影像上主要表现为连片分布的建设用地。城市建成区提取的关键是判断建成区边界, 本文采用影像分类法与手工勾绘相结合的方法提取城市建成区。考虑到 Landsat 多波段影像 30 m 的空间分辨率和影像质量, 参考中国科学院土地资源分类系统<sup>[29]</sup>, 通过人工选取训练区, 使用支持向量机(SVM)分类方法提取福州市的城镇用地, 在此基础上手工勾绘建成区矢量边界。

城市拓展强度( $G$ )是指单位时间内某一区域区内的城市化强度, 公式为<sup>[30]</sup>:

$$G = \Delta A / TA \times T^{-1} \times 100 \quad (9)$$

式中:  $\Delta A$  为某时段城市净增面积/ $\text{km}^2$ ;  $TA$  为研究区总面积/ $\text{km}^2$ ;  $T$  为该时段长度。该指标最初被用于研究北京地区的城市化过程<sup>[31]</sup>, 是利用 GIS 和遥感技术对城市建成区空间拓展分析的有效手段, 现已在城市化研究中广泛应用。

表2 HUTS算法拟合方程与相关系数  $R^2$ 

Tab. 2 Regression equations and correlation coefficients of the HUTS method

日期	函数关系式	$R^2$
1994-05-12	$LST = -102.968 \times NDVI^4 - 81.018 \times NDVI^3 \times \alpha - 452.939 \times NDVI^2 \times \alpha^2 - 3470.743 \times NDVI \times \alpha^3 - 6711.404 \times \alpha^4 + 185.304 \times NDVI^4 + 124.925 \times NDVI^3 \times \alpha + 1989.608 \times NDVI^2 \times \alpha^2 + 7339.745 \times NDVI \times \alpha^3 - 98.337 \times NDVI^2 - 208.730 \times NDVI \times \alpha - 2543.358 \times \alpha^2 + 3.451 \times NDVI + 307.084 \times \alpha + 287.112$	0.693
2003-05-29	$LST = -83.076 \times NDVI^4 - 210.457 \times NDVI^3 \times \alpha + 1191.840 \times NDVI^2 \times \alpha^2 + 1632.957 \times NDVI \times \alpha^3 - 5267.525 \times \alpha^4 + 202.028 \times NDVI^4 - 145.967 \times NDVI^3 \times \alpha - 2091.112 \times NDVI^2 \times \alpha^2 + 4130.058 \times \alpha^3 - 126.477 \times NDVI^2 + 527.870 \times NDVI \times \alpha + 842.025 \times \alpha^2 - 9.252 \times NDVI + 21.155 \times \alpha + 301.247$	0.722
2016-07-27	$LST = 18.931 \times NDVI^4 - 173.263 \times NDVI^3 \times \alpha + 22.455 \times NDVI^2 \times \alpha^2 + 480.325 \times NDVI \times \alpha^3 - 26.323 \times \alpha^4 + 8.589 \times NDVI^4 + 264.135 \times NDVI^3 \times \alpha - 275.787 \times NDVI^2 \times \alpha^2 + 64.599 \times \alpha^3 - 47.393 \times NDVI^2 - 52.674 \times NDVI \times \alpha - 64.338 \times \alpha^2 + 11.217 \times NDVI + 27.213 \times \alpha + 307.319$	0.734



### 3.4 城市热岛比例指数

徐涵秋等<sup>[32]</sup>于2003年提出的城市热岛比例指数(Urban-Heat-Island Ratio Index, URI)可以定量衡量热岛效应的强烈程度,该指数已被国家环境保护部和住房和城乡建设部引用,得到了权威认可,并被广泛应用于城市热环境变化的研究中<sup>[9,30,33-37]</sup>。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,能更科学地对比不同年份间城市热岛的变化,指数值越大,热岛效应越严重。该指数反映了热岛面积与城市建成区面积的比例关系,其计算公式为:

$$URI = \frac{1}{100m} \sum_{i=1}^n w_i p_i \quad (10)$$

式中:URI为热岛比例指数; $w_i$ 为权重,取第*i*级的等级; $p_i$ 为第*i*级的面积占比/%; $m$ 为正规化的等级数; $n$ 为温度高于郊区的城区范围内的温度等级数。

## 4 结果与分析

### 4.1 降尺度结果评价

图3是通过HUTS算法降尺度获得的3个时相的30 m分辨率的LST影像与原本60m/100 m/120 m分辨率的LST影像重采样到30 m分辨率的影像的比较,为方便展示,选用了3个时相的影像中大小均为1.2 km×1.2 km的区域。从图3中可以看出:①经过降尺度处理后的影像展现出更丰富的细节,对城市建成区中住宅区、道路和绿化植被构成的混合区域的表达更为清晰;②相较而言,未经降尺度而直接重采样为30 m分辨率的影像,虽然与降尺度后得到的影像空间分辨率一致,但在其城市建成区内部的纹理特征细节表现较为笼统和模糊。因此,经过空间降尺度算法的LST影像,能更清晰地展现建

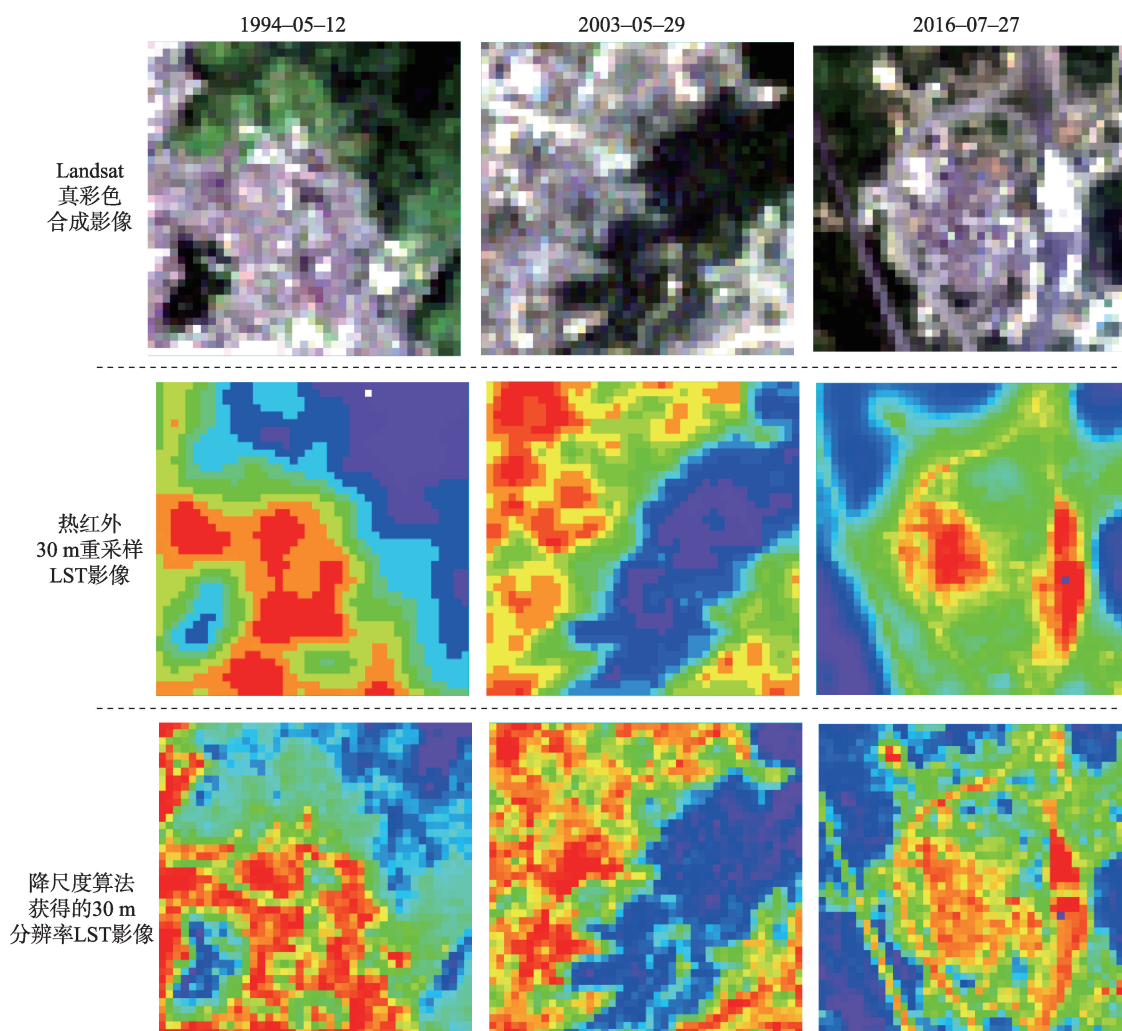


图3 3个时相(1.2 km×1.2 km)不同处理结果图

Fig. 3 1.2 km×1.2 km subarea from images in 1994, 2003 and 2016

成区内部热环境的发展变化细节,因而也更有利于对城市热环境状况及其变化作进一步的深入分析。

为定量评价降尺度的结果,引入表3中的几个数学统计量,其中均方根误差(RMSE)可以灵敏地测出 $n$ 维空间中2个测度向量的相似性。本研究采用RMSE指标衡量降尺度得到的地表温度影像与原始地表温度影像之间的差异<sup>[38]</sup>,RMSE的计算公式如下<sup>[39]</sup>:

$$\text{RMSE} = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (LST_p - LST)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

式中:RMSE的单位为K; $N$ 为像元个数; $LST_p$ 为降尺度的影像像元值; $LST$ 为原始影像像元值。除了RMSE外,表3还给出了降尺度影像和原始地表温度影像的一些其他指标。可以看出,降尺度后的影像与原始影像差异不大,最大值和最小值的差异主要来源于少数离群的极端值,此类像元占总像元的比例小于0.2%。2016年影像的RMSE值最大,为1.507 K,其余2个时相的RMSE值分别为1.010 K和0.781 K,总体上,降尺度效果较好,满足研究要求。

表3 降尺度影像的统计信息和均方根误差(RMSE)(K)

Tab. 3 Statistics of downscaled images and RMSE (K)

统计量	1994-05-12		2003-05-29		2016-07-27	
	原始	降尺度	原始	降尺度	原始	降尺度
最大值	303.1	304.3	306.8	304.2	316.5	314.5
最小值	283.1	282.2	289.2	287.4	297.7	297.8
均值	296.7	296.7	295.7	295.7	305.7	305.5
标准差	0.940	0.651	1.878	1.604	2.858	2.554
RMSE	0.781		1.010		1.507	

#### 4.2 研究区近20年来热环境变化

通过空间降尺度的HUTS算法获得研究区30 m分辨率的1994年、2003年和2016年3个时相地表温度影像(图4)。从图4可以发现,随着福州市的快速发展,其热环境也相应发生了巨大变化。

(1)1994年,市中心在地表温度影像上亮度极高,与周围建筑密度较低的郊区和林地、耕地等植被覆盖地区亮度差异巨大。且市中心鼓楼区、台江区和晋安区的部分区域高亮斑块密度极高,仓山区北部靠近闽江的区域也出现高亮斑块聚集的情况,总体可看出高亮斑块呈沿主要交通线分布的态势。

(2)到了2003年,市中心高亮区域面积显著增长,向西与闽侯县相连,向东与马尾区连为一体、与长乐市区隔闽江相望。闽侯县的部分区域像元亮度提高,与其周边郊区已有明显差异。与此同时,市中心与郊区的斑块亮度差别有所减小,市中心高亮斑块内部的亮度差异有所扩大。

(3)2016年,市中心高亮区域继续扩张,高温中心呈现从单中心向多中心分化的趋势。仓山区中部、马尾区沿江地带、原属闽侯县的福州市高新区、长乐市区等都出现了高亮斑块聚集的情况。此外,市中心与郊区的斑块亮度差异继续减小,同时高亮斑块内部的亮度差异继续扩大。

#### 4.3 福州市建成区的空间拓展和热岛变化

图5为3个时相的福州市建成区提取结果,表4是反映城市拓展状况的统计指标。

为进一步定量分析福州市建成区的热环境变化,本文对3个时相的地表温度影像做正规化处理,在保留各时相地表温度影像空间分布格局的同时,实现对不同年份相近季相影像的年际比较<sup>[32,35]</sup>:

$$N_i = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (12)$$

式中: $N_i$ 为正规化后的像元 $i$ 的值; $T_i$ 为像元 $i$ 的温度值; $T_{\min}$ 是影像中所有像元的温度值中的最小值; $T_{\max}$ 是影像中所有像元的温度值中的最大值,正规化处理后像元 $i$ 的值分布在 $[0, 1]$ 之间。对于正规化后的3期地表温度影像,使用密度分割的方法将其划分为7个等级(图6),表5为3个时相7个温度等

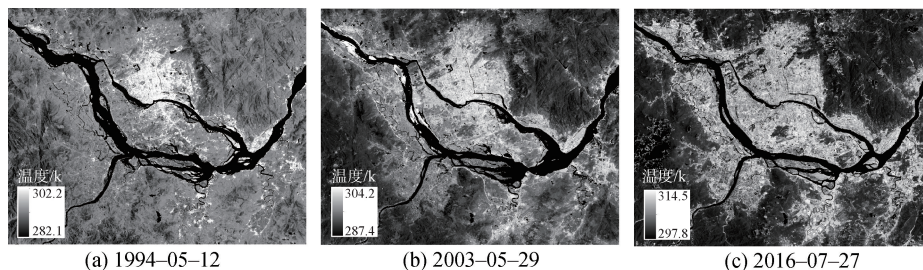


图4 福州市3个时相的地表温度影像

Fig. 4 LST imageries of the study area

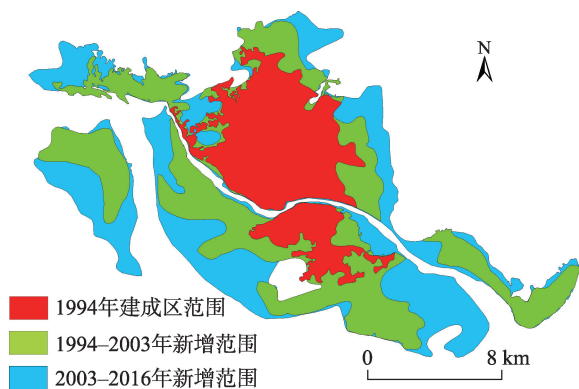


图5 福州市建成区时空动态变化

Fig. 5 Spatial and temporal changes of urban built-up area of Fuzhou from 1994 to 2016

级的面积和占比。

由图6可知,建成区主要分布有特高温、高温和次高温这3个等级,代表了城市热岛的范围,据此,可确定 $m$ 为7, $n$ 为3,特高温、高温和次高温这3个等级的级值分别为7、6和5,计算得到的URI见表5。

由表5可以发现:1994–2016年,福州市建成区的较低温、中温和特高温区域的占比持续减少,其中中温区域占比降幅最大,为15.23%;高温和次高温区域占比持续增多,其中又以次高温区域占比增幅13.84%为最大;次中温、较低温和低温区域在过去近20年的波动较小,占比变化不大。在近20 a间,福州市建成区的URI呈现上升的趋势,其中

1994–2003年上升0.07,2003–2016年上升0.06,这说明在过去约20年福州市建成区的热岛效应强烈程度在不断上升。

为进一步定量探索建成区20 a间的热环境变化情况,对3个时相的温度等级影像做叠加处理,获得1994–2003年、2003–2016年2幅温度等级变化影像(图7)。由图7(a)可以看到:1994–2003年,鼓楼区、马尾区、台江区的部分地区和仓山区中部沿闽江南岸一带温度等级普遍下降,部分绿地覆盖地区如茶亭、乌山等温度等级下降了1–2级;温度等级升高的地区主要集中在鼓楼区北部、晋安区南部、仓山区西北部 and 闽侯县大学城附近,增幅普遍在1–2级,其中也有少量增幅达3级的地区,究其原因,主要是因为在这1994–2003年间,其土地利用类型变化较大,在经历城市化过程后地表温度快速上升成为温度等级较高的区域。由图7(b)可知:2003–2016年,温度等级下降的趋势在市中心进一步扩大,除了台江区大部分地区外,鼓楼区南部、仓山区西北部沿江区域、晋安区南部和马尾区沿江地区等地温度等级也有下降,屏山公园、西湖公园和金牛山附近温度等级下降较大;温度升高的区域主要集中在仓山区西南部和中东部的闽江沿岸、晋安区东部至马尾区的西部、以及闽侯县与鼓楼区交界地区 and 大学城与海西高新科技产业园附近地区,上升幅度在1–2级之间。

表4 福州市各年份建成区面积及其相关指标

Tab. 4 Built-up areas and its related indicators of Fuzhou in 1994, 2003 and 2016, respectively

年份	1994-05-12	2003-05-29	2016-07-27	1994-2003年	2003-2016年
面积/km <sup>2</sup>	73.08	180.38	274.83	107.30	94.45
年均增长率/%	—	—	—	16.31	3.64
城市扩展强度	—	—	—	6.12	2.57

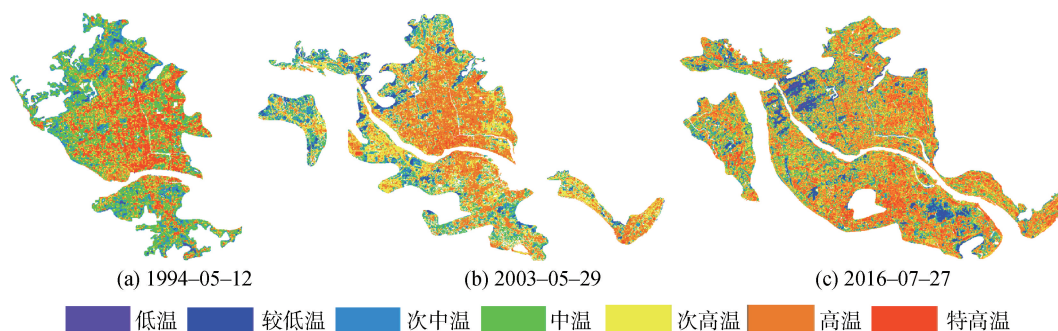


图6 3个时相建成区内温度等级分布图

Fig. 6 Images of graded radiant temperature of urban built-up area in three years



表5 福州市建成区各年地表温度等级的面积、比例和 URI

Tab. 5 Area and percentage of each LST level and URI indexes of urban built-up areas in 1994, 2003 and 2016

温度等级	1994-05-12		2003-05-29		2016-07-27	
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
1级(低温)	0.75	1.02	3.64	2.02	2.56	0.93
2级(较低温)	3.76	5.15	7.48	4.15	10.61	3.86
3级(次中温)	7.57	10.36	21.03	11.66	24.51	8.92
4级(中温)	25.23	34.53	43.58	24.16	53.04	19.30
5级(次高温)	19.57	26.78	59.00	32.71	111.64	40.62
6级(高温)	10.39	14.23	36.31	20.13	60.85	22.14
7级(特高温)	5.79	7.93	9.33	5.17	11.62	4.23
URI	0.39		0.46		0.52	

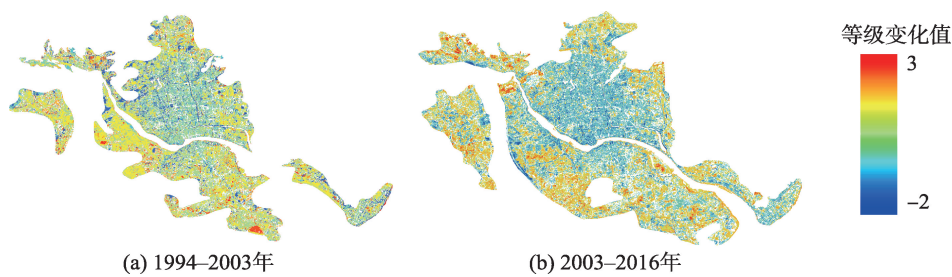


图7 福州市建成区内温度等级时空变化

Fig. 7 Spatio-temporal variations of the LST levels in built-up area of Fuzhou

4.4 热岛斑块的发展变化

为定量探索建成区内热岛斑块的发展变化,本文引入景观生态学中景观格局的研究方法,通过计算3个时相不同水平的景观指数,对分级的正规化温度影像进行统计和分析。

景观指数是能够高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置某些方面的简单定量指标。通过景观指数可以对景观的组成特征、空间配置、动态变化等进行定量研究。结合本研究区具体情况,本文在景观水平上选择蔓延度指数(CONTAG),在斑块类型水平上选择斑块密度(PD)和聚合度指数(AI)进行统计计算<sup>[36-37,40-42]</sup>。

表6为3个时相的蔓延度指数(CONTAG),这一指数反映了热环境中不同温度等级的团聚程度,也就是不同温度等级间的连通性。由表6可知,1994-2003年蔓延度指数呈上升趋势,在这9年间

同一温度等级的斑块聚集程度提高,即同一温度等级的斑块相互连通集中分布于一个区域的情况有所增加,而不同温度等级的斑块间连通性下降,即不同温度等级的斑块相邻混合分布的情况有所减少。2003-2016年蔓延度指数呈下降趋势,说明这一时期与前一时期热环境的变化趋势相反,即同一温度等级的斑块聚集程度下降,不同温度等级的斑块间连通性提高。

表7为3个时相高温等级斑块的斑块密度(PD)和聚合度指数(AI)。斑块密度反映某一类型斑块的破碎化程度,斑块密度越大则说明单个斑块的面积越小,这一温度等级的斑块破碎化程度越高。聚合度指数反映某一类型斑块的聚集水平,当一个温度等级的斑块多为离散分布的小斑块时,则AI值较小;当一个温度等级的斑块集中分布或斑块相互联通时,则AI值较大。综合这2个指标可知,在过去20年:

(1)次高温斑块经历了从分散的破碎斑块拓展融合成较大面积斑块的过程,斑块密度大幅下降,集中分布水平有一定提高。且在此时期内,次高温区域的面积与占比均大幅提高,说明该类型斑块从较

表6 3个时相的蔓延度指数(CONTAG)

Tab. 6 Contagion indexes (CONTAG) in 1994, 2003 and 2016, respectively

	1994-05-12	2003-05-29	2016-07-27
CONTAG	40.72	52.38	41.91

表 7 3 个时相热岛温度等级斑块密度(PD)和聚合度指数(AI)  
Tab. 7 Patch Density (PD) and Aggregation Index (AI) of high temperature patches

温度等级	1994-05-12		2003-05-29		2016-07-27	
	PD	AI	PD	AI	PD	AI
5 级(次高温)	53.75	62.53	36.40	67.33	17.52	67.42
6 级(高温)	76.08	50.79	24.68	79.45	67.44	64.80
7 级(特高温)	73.68	68.77	113.70	51.75	102.20	37.25

小的离散分布的斑块变为聚集成片分布的斑块,已成为高温等级斑块的主要组成部分,它的发展变化对福州市建成区高温区域的发展变化有重要作用。

(2)高温斑块经历了从破碎到融合再到破碎的过程,斑块密度先降后升,聚合度指数先升后降。这说明在 1994-2003 年这一时期高温斑块经历了扩张、聚合的过程,构成成片覆盖的高温区域,成为热岛斑块的主要部分;而在 2003-2016 年这一时期虽然高温斑块的面积与面积占比均上升,但它不再聚集成片覆盖一个区域而是变为较为破碎的斑块广泛分布于次高温斑块中。

(3)特高温斑块经历了进一步破碎化的过程,斑块密度大幅提高,同时聚合度指数大幅下降超过 30,且斑块面积和面积占比均略有下降,这说明在过去 20 年特高温斑块从较为集中分布变为零星分布于其他温度等级的斑块中,也进一步验证了从图 6 观察到的趋势:特高温区域的斑块在过去约 20 年变得破碎而分散。

## 5 结论

利用 HUTS 算法得到的更高分辨率城市地表温度影像,具备更清晰的细节和纹理,能够突出原始分辨率热红外影像所不能表达的细小温度差异,从而为本研究开展更高精度的热环境变化分析提供了坚实的基础。归一化的地表温度影像可以去除不同影像之间的季相差异,实现时间轴上不同年份之间的热环境对比分析。进一步引入景观生态学中的景观指数,定量分析研究区 3 种高温等级斑块的发展变化,特别是近 20 年不同等级斑块的形态变化。

结果表明,在过去 20 年,随着城市化的快速发展,福州市中心城区的热环境发生了较大的变化。一方面,高温等级区域随着城市扩展而扩展,同时伴随着城市化过程部分原为低温等级区域

不断向高温等级区域转变,高温等级区域占建成区的比重从不足 50%提高甚至超过了 65%,温度等级升高的区域多集中在鼓楼区北部、晋安区中东部、仓山区和闽侯县;另一方面,随着城市更新,在上世纪 90 年代已完成城市化的鼓楼区南部和台江区有大量的高温等级区域在过去 20 年经历了温度等级下降的过程,仓山区的西北部和马尾区的部分地区在最近 10 年也经历了温度等级下降的过程。与此同时,福州市的城市热岛比例指数(URI)则从 0.39 上升为 0.52,说明这一时期福州市的热岛效应明显加强,特高温、高温和次高温 3 个等级区域的总占比不断提高,面积不断扩大。景观指数分析结果表明,同一温度等级的斑块集中连片分布的情况减少,不同温度等级的斑块相间分布成为主流。高温和特高温斑块均历经了破碎化、离散化的过程,市中心的高温集聚现象有所缓解,次高温斑块成为高温等级斑块的主体。

福州城市热环境在过去 20 年的明显变化与建成区下垫面状况的变化密不可分,主要是城市拓展和城市规划带来的建筑密度的变化和城市绿地的增加。未来研究中,可以结合长时间尺度的土地利用类型数据、城市 3D 模型等数据,进一步探索热环境变化的驱动因素,为城市规划和市政建设提供科学决策支持。

## 参考文献(References):

- [1] Voogt J A, Oke T R. Thermal remote sensing of urban climates[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,86(3): 370-384.
- [2] Taha H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat[J]. Energy & Buildings, 1997,25(2):99-103.
- [3] Coutts A M, Harris R J, Phan T, et al. Thermal infrared remote sensing of urban heat: hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning[J]. Remote Sensing of Environment, 2016,186:637-651.

- [4] 宋轩,段金龙,杜丽平.城市热岛效应研究概况[J].气象与环境科学,2009,32(3):68-72. [ Song X, Duan J L, Du L P. Overview of the urban heat island effects[J]. Meteorological and Environmental Science, 2009,32(3):68-72. ]
- [5] 孟丹,李晓娟,宫辉力,等.北京地区热力景观格局及典型城市景观的热环境效应[J].生态学报,2010,30(13):3491-3500. [ Meng D, Li X J, Gong H L, et al. Landscape patterns of the thermal environment and typical urban landscape effect linked with thermal environment in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010,30(13):3491-3500. ]
- [6] Lakshmi V, Zehrhuhs D. Normalization and comparison of surface temperatures across a range of scales[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002,40(12):2636-2646.
- [7] Bechtel B, Klemen Zaksek, Hoshyaripour G. Downscaling land surface temperature in an urban area: a case study for Hamburg, Germany[J]. Remote Sensing, 2012,4(10): 3184-3200.
- [8] Bonafoni S. Downscaling of Landsat and MODIS land surface temperature over the heterogeneous urban area of Milan[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016,9(5):2019-2027.
- [9] 范鹏宇.基于热红外遥感影像的空间降尺度研究[D].福州:福建师范大学,2013. [ Fan P Y. Spatial downscaling of land surface temperature retrieved from remotely sensed thermal infrared imagery[D]. Fuzhou: Fujian Normal University Master's thesis, 2013. ]
- [10] Anderson M C, Norman J M, Kustas W P, et al. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(12):4227-4241.
- [11] Hu X F, Weng Q H. Impervious surface area extraction from IKONOS imagery using an object-based fuzzy method [J]. Geocarto International, 2011,26(1):3-20.
- [12] 福州市统计局.2016福州统计年鉴[EB/OL]. <http://tjj.fuzhou.gov.cn/zz/fztjnj/2016fztjnj/#conTar>. [ Fuzhou City Bureau of Statistics. 2016 Fuzhou Statistical Yearbook [EB/OL]. <http://tjj.fuzhou.gov.cn/zz/fztjnj/2016fztjnj/#conTar>. ]
- [13] 赵英时.遥感应用分析原理与方法(第二版)[M].北京:科学出版社,2013. [ Zhao Y S. Principles and methods of remote sensing application analysis (second edition) [M]. Beijing: Science Press, 2013. ]
- [14] Jensen J R. 2015. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective (4th ed). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- [15] 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):2015-2023.
- [16] Jiménez-Muñoz J C, Cristobal J, Sobrino J A, et al. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009,47(1):339-349.
- [17] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2014,11(10):1840-1843.
- [18] 徐涵秋,林中立,潘卫华.单通道算法地表温度反演的若干问题讨论——以 Landsat 系列数据为例[J].武汉大学学报·信息科学版,2015,40(4):487-492. [ Xu H Q, Lin Z L, Pan W H. Some issues on retrieval of land surface temperature of Landsat thermal data with single-channel algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015,40(4):487-492. ]
- [19] 王炳忠,申彦波.我国上空的水汽含量及其气候学估算[J].应用气象学报,2012,23(6):763-768. [ Wang B Z, Shen Y B. Atmospheric vapor content over China and its climatological evaluation method[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012,23(6):763-768. ]
- [20] 全金玲,占文凤,陈云浩,等.遥感地表温度降尺度方法比较——性能对比及适应性评价[J].遥感学报,2013,17(2): 374-387. [ Quan J L, Zhan W F, Chen Y H, et al. Downscaling remotely sensed land surface temperature: A comparison of typical methods[J]. Journal of Remote Sensing, 2013,17(2):374-387. ]
- [21] Dominguez A, Kleissl J, Luvall J C, et al. High-resolution urban thermal sharpener (HUTS)[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(7):1772-1780.
- [22] Rouse J W J, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS[A]. NASA Special Publication, 1973,351:309.
- [23] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001,76:213-238.
- [24] Smith R B. The heat budget of the earth's surface deduced from space [EB/OL]. [https://yceo.yale.edu/sites/default/files/files/Surface\\_Heat\\_Budget\\_From\\_Space.pdf](https://yceo.yale.edu/sites/default/files/files/Surface_Heat_Budget_From_Space.pdf).
- [25] Yale University. Yale guide to Landsat 8 image processing [EB/OL]. <http://surfaceheat.sites.yale.edu/understanding-landsat-8>.
- [26] Sibandze P, Mhangara P, Odindi J, et al. A comparison of normalized difference snow index (NDSI) and normalized difference principal component snow index (NDPCSI) techniques in distinguishing snow from related land cover types[J]. South African Journal of Geomatics, 2014, 3(2):197-209.
- [27] Lamchin M, Lee J Y, Lee W K, et al. Assessment of land cover change and desertification using remote sensing



- technology in a local region of Mongolia[J]. *Advances in Space Research*, 2016,57:64-77.
- [28] Masek J G, Lindsay F E, Goward S N. Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973- 1996, from Landsat observations[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000,21(18):3473-3486.
- [29] 肖鹏峰,刘顺喜,冯学智,等.基于中分辨率遥感图像的土地利用与覆盖分类系统构建[J].*中国土地科学*,2006,20(2):33-38. [ Xiao P F, Liu S X, Feng X Z, et al. A land use/cover classification system based on medium resolution remote sensing data[J]. *China Land Science*, 2006,20(2):33-38. ]
- [30] 李乐,徐涵秋.杭州市城市空间拓展及其热环境变化[J].*遥感技术与应用*,2014,29(2):264-272. [ Li L, Xu H Q. Urban expansion and thermal environmental changes in Hangzhou City of East China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014,29(2):264-272. ]
- [31] 何春阳,史培军,陈晋,等.北京地区城市化过程与机制研究[J].*地理学报*,2002,57(3):363-371. [ He C Y, Shi P J, Chen J, et al. Process and mechanism of urbanization in Beijing area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002,57(3):363-371. ]
- [32] 徐涵秋,陈本清.不同时相的遥感热红外图像在研究城市热岛变化中的处理方法[J].*遥感技术与应用*,2003,18(3):129-133. [ Xu H Q, Chen B Q. An image processing technique for the study on urban heat island changes using different seasonal remote sensing data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003,18(3):129-133. ]
- [33] 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. ]
- [34] 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. ]
- [35] Xu H Q, Chen B Q. Remote sensing of the urban heat island and its change in Xiamen City of SE China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004,16(2):276-281.
- [36] 乔治,田光进.北京市热环境时空分异与区划[J].*遥感学报*,2014,18(3):715-734. [ Qiao Z, Tian G J. Spatio-temporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(3):715-734. ]
- [37] 王乐.基于RS的西安市地表温度反演及城市热环境研究[D].西安:长安大学,2015. [ Wang L. Inversion of land surface temperature of Xi'an and the research of urban thermal environment based on RS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. ]
- [38] 宋彩英.基于Landsat8的地表温度像元分解算法研究[D].南京:南京大学,2015. [ Song C Y. An effective approach of pixel decomposition for land surface temperature of Landsat 8[D]. Nanjing: Nanjing University Master's thesis, 2015. ]
- [39] Mendenhall W, Scheaffer R L, Wackerly D D. *Mathematical Statistics With Applications*(Third Edition) [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1986,48(3):394-395.
- [40] 陈爱莲,孙然好,陈利顶.基于景观格局的城市热岛研究进展[J].*生态学报*,2012,32(14):4553-4565. [ Chen A L, Sun R H, Chen L D. Studies on urban heat island from a view of landscape pattern: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012,23(4):4553-4565. ]
- [41] 王红红,邢立新,潘军,等.城市景观格局对热环境影响遥感研究[J].*环境保护科学*,2012,38(4):44-48. [ Wang H H, Xing L X, Pan J, et al. Research on the impact of urban landscape pattern on thermal environment using remote sensing[J]. *Environmental Protection Science*, 2012,38(4):44-48. ]
- [42] 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):3890-3901. [ Xu H Q. Analysis on urban heat island effects based on the dynamics of biophysical descriptors of urban surfaces[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011,31(14):3890-3901. ]