

DOI: 10.5846/stxb202003140536

花利忠, 孙凤琴, 陈娇娜, 唐立娜. 基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应——以厦门为例. 生态学报, 2020, 40(22): 8147-8157.

Hua L Z, Sun F Q, Chen J N, Tang L N. Quantifying the cool-island effects of urban parks using Landsat-8 imagery in a coastal city, Xiamen, China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8147-8157.

# 基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应 ——以厦门为例

花利忠<sup>1</sup>, 孙凤琴<sup>1</sup>, 陈娇娜<sup>2</sup>, 唐立娜<sup>3,\*</sup>

1 厦门理工学院计算机与信息工程学院, 厦门 361024

2 厦门市气象服务中心, 厦门 361013

3 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

**摘要:**城市公园主要由水体和绿色植被等景观构成,其形成的公园冷岛(Park cool island, PCI)已成为减缓城市热岛效应的重要途径之一。采用景观生态学中的景观营造理念规划设计城市公园或优化公园空间结构有助于增强公园冷岛效应,进一步改善局地城市热环境。选择沿海城市——厦门市为研究对象,基于 2013 年 8 月的 Landsat-8 OLI / TIRS 遥感影像和 Google Earth 高分影像数据,首先提取了研究区 15 个公园的土地利用信息,采用改进的地表温度单通道算法,获取了城市公园地表温度数据,并采用缓冲区分析、景观格局指数和多元统计等方法定量分析公园内部平均地表温度、城市公园冷岛强度(即降温幅度)、公园冷岛影响距离(即对周边区域的降温范围)三者的主要影响因子,并利用景观生态学原理初步剖析了城市公园景观营造的原则。结果显示:(1)公园面积和公园建设用地面积是影响公园平均温度的关键因子( $R^2=0.915$ ),这两个因子与公园平均温度均呈显著非线性相关;公园面积存在阈值 55 hm<sup>2</sup>左右;(2)公园冷岛 PCI 强度由公园绿地面积、公园建筑面积和面积-周长形状指数(P/A)三个因子决定( $R^2=0.911$ );公园冷岛 PCI 强度与公园绿地面积呈显著非线性正相关,与公园建筑面积呈显著非线性负相关,与面积-周长形状指数(P/A)呈显著线性负相关;在确保公园绿地面积达到一定阈值时,应该尽量降低公园建筑面积,增加公园形状复杂度,有利于其 PCI 强度的增加,缓解城市热岛效应;(3)公园冷岛影响距离由公园面积和公园水体面积比例决定( $R^2=0.719$ ),公园冷岛影响距离与两者呈显著正相关;绿地公园中提高公园水体的面积比例,有助于增大公园冷岛的影响距离;(4)城市公园的规划与设计,需要运用景观生态学的原理,从缓解城市热岛效应的角度,充分考虑公园大小、形状、土地利用类型组成比例及空间配置等因素。

**关键词:**城市热岛;厦门;景观生态;地表温度;公园冷岛

## Quantifying the cool-island effects of urban parks using Landsat-8 imagery in a coastal city, Xiamen, China

HUA Lizhong<sup>1</sup>, SUN Fengqin<sup>1</sup>, CHEN Jiaona<sup>2</sup>, TANG Lina<sup>3,\*</sup>

1 College of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China

2 Xiamen Meteorological Service Center, Xiamen 361024, China

3 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

**Abstract:** Urban parks mainly consist of green space and water, which can form park cool islands (PCIs), which substantially alleviate the urban heat island effect. The concept of landscape creation in landscape ecology can facilitate the rational planning of new urban parks and the optimization of the spatial structure of parks, which help to enhance PCIs and improve the local urban thermal environment. Xiamen, a coastal city in China, was taken as a case study. Landsat-8

**基金项目:**福建省自然科学基金项目(2020J01265);国家自然科学基金项目(41471366)

**收稿日期:**2020-03-14; **网络出版日期:**2020-09-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lntang@iue.ac.cn

Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor imagery data from August 2013 were acquired. A land use type map with a total of 15 urban parks was derived from high-spatial-resolution Google Earth images. Land surface temperature was estimated via an improved single-channel algorithm. Methods including buffer analysis, the landscape pattern index, and multivariate regression were applied to evaluate the key factors of average surface temperature of parks, PCI intensity (i.e., the cooling amplitude), and effective cooling length ( $L_{\max}$ ). Additionally, based on the concept of landsenses ecology, landsense principles for the creation of urban parks were proposed. The results indicate the following: (1) average temperature (AvT) inside the parks depends on the park size and built-up land area, and both of these factors are non-linearly correlated to AvT ( $R^2 = 0.915$ ). The threshold value of the park size is approximately 55 hm<sup>2</sup>; (2) The PCI intensity is mainly determined by the area of green space, the built-up land area inside the park, and the park perimeter-area ratio (PAR). Green space area has a positive impact on PCI intensity, however, the built-up land area and PAR have a negative impact on PCI intensity ( $R^2 = 0.911$ ). On the premium of keeping a certain park green space area, it is critical to reduce the built-up area and increase the complexity of the geometric shape of the parks, which is conducive to increasing their PCI intensity and alleviating the urban heat island effect; (3)  $L_{\max}$  is mainly determined by park size and the percentage of water area, and both of these factors have a positive impact on  $L_{\max}$  ( $R^2 = 0.719$ ). On the premium of maintaining a certain park area, it is proposed to enhance the proportion of water bodies in the parks, which helps to increase the  $L_{\max}$  value of urban parks; and (4) in the planning and design of urban parks, the concept of landsenses ecology could be employed to consider park size, land use types, the shape index, and the spatial configuration inside the parks to mitigate urban heat island effects.

**Key Words:** Urban heat islands; Xiamen; Landsenses ecology; land surface temperature; park cool island

随着全球城市化进程的急剧加快,城市热岛效应已经成为当今全球面临的最严峻的生态环境问题之一<sup>[1]</sup>。以水体和绿色植被等景观构成的城市公园所形成的“冷岛”被认为是缓解城市热岛效应、改善城市局地热环境的重要途径之一<sup>[2-5]</sup>。而最近几年来,景感生态学、景感学和景感营造等新理论的提出为缓解城市热环境问题提供了新的理论指导。生态学家赵景柱等<sup>[6]</sup>在2016年首次提出了景感生态学概念,指出它是研究土地利用规划、建设与管理的科学,并提出了景感生态规划、建设和管理的综合分析框架;之后,2018年赵景柱等<sup>[7]</sup>把景感生态学的研究范畴进行升华,拓展到景感学(即广义景感生态学),同时阐述了景感学和景感营造的概念,剖析了景感营造的多种途径和原则,提出了景感学研究的总体框架。石龙宇等<sup>[8]</sup>把人体的主要感觉类型归纳为八种,即美感、听觉、味觉、嗅觉、触觉、风感、方向感和心理反应,同时列举了对应感觉类型的景感生态学规划内容和方法,并指出规划者应该按照景感生态学原理进行景感营造,制定适宜方案。

景感生态学是一个综合物联网、地理信息系统和专家系统的框架,它意在确保土地利用的设计和规划符合环境可持续发展<sup>[9]</sup>。随着城市化的快速发展,为了实现合理景感组成要素与人们的舒适感受之间的相对平衡,景感生态学为城市建设和规划提供了新思路和方法,已成为土地利用合理设计和规划的重要理论依据之一<sup>[10]</sup>。目前景感生态学的应用案例研究不断增多。一些学者以中国大运河的香河段为案例,分别在声感规划<sup>[9]</sup>、环境物联网<sup>[10]</sup>和湿地恢复的措施及规划<sup>[11]</sup>等方面都应用了景感生态学的思路。Zheng等<sup>[12]</sup>以福建平潭岛为例,通过研究城市景感格局演变与大风日数减少之间的关系,提出了优化和选择景感器格局的框架和指南,进而最大限度地减少城市地表大风日数。Ren等<sup>[13]</sup>在桉树人工林生物量的尺度扩展的研究中,结合了景感生态学中的谜码数据和趋善化模型<sup>[14]</sup>,以解决生态模型在估计森林生物量方面的不确定性问题。上海崇明岛生态工业园的规划与设计中“日月耀五洲”的理念集中体现了景感生态学的思路,借助环境物联网技术,该景感工业示范园集光伏发电、淡水养殖、观光农业等多种产业功能于一体,实现了清洁能源与生态农业的科学发展<sup>[15]</sup>。

按照景感生态学和景感学的原理,城市公园不仅是城市居民休闲游憩活动和文化传播的自然场所,而且

也充当了夏季烈日下宜人气候的空间载体。城市公园作为城市中的一种重要景观,其承载的宜人气候,通过公园地表温度(或公园气温)来反映。在人体的八种感觉类型中,温度属于风感,人们主要通过人体感官中的皮肤来快速感知环境温度的适宜性<sup>[8]</sup>。人们赋予公园丰富的愿景,如公园作为城市重要的“绿肺”,不仅有美化城市景观的作用,更重要的是对局地人居环境的气候进行调节。在夏季,城市公园的绿地和水体降温效果尤为明显,本身成为显著的冷岛,而且研究证实城市大型公园绿地能够降低公园周边地区的温度,进而降低周边建筑的冷却能源<sup>[3]</sup>。合理的城市公园景观营造,意在缓解城市热岛,提供健康的局地人居环境,促进城市热环境的可持续发展。城市公园的景观营造应该包括公园大小、形状、结构组成和公园结构配置等。合理的规划公园或优化公园结构,使人产生生理和心理的满足感,不仅有助于缓解局地城市热岛,也能实现降低噪音污染和增加氧气供给等多种生态功能。

近年来,国内外学者对许多城市公园景观的热环境效应进行了大量研究<sup>[16]</sup>,取得一系列研究成果。如基于实地气象观测数据分析特定公园对周边小气候的影响<sup>[17-18]</sup>;分析公园面积、周长等形态特征、绿地面积比重、水体面积比重等结构因子的降温效应<sup>[19-22]</sup>;基于景观生态学方法<sup>[23-24]</sup>分析公园景观空间结构对公园周边的热环境效应<sup>[25]</sup>。但这些城市的公园冷岛(Park cool island, PCI)效应研究采用的遥感数据源主要是 Landsat TM/ETM+,对于新的 Landsat-8 数据源应用不多;研究多以内陆城市为主<sup>[26]</sup>,对于海湾型城市公园的研究较少。

随着城市化的快速推进,厦门市城市建设用地快速扩展、人口急剧增长,城市景观格局发生了巨大的变化,导致城市热岛的热环境效应日益严重。如何利用有限的城市绿地尤其是城市公园最大程度缓减城市热岛效应,成为城市建设与规划者亟待解决的生态问题之一。本文基于 Landsat-8 OLI(Operational Land Imager)/TIRS(Thermal Infrared Sensor)影像和改进的单通道算法反演厦门地表温度(LST),基于 Google Earth 高分影像提取多个典型公园作为研究对象,获取了城市公园热环境数据,采用缓冲区分析、景观格局指数和多元统计等方法研究城市公园对周边区域的冷岛效应,探索城市公园内部平均地表温度、城市公园冷岛强度和公园冷岛影响距离的关键影响因子。本研究对于营造合理的城市公园布局、公园规划建设和改善城市局部人居环境有一定的指导意义。

## 1 研究区概况

厦门市(17°53'—118°26'E, 24°23'—24°54'N)地处福建省东南部九龙江入海处,与漳州和泉州接壤,与台湾、澎湖列岛隔海相望<sup>[27]</sup>(图1)。研究区陆地面积为 1699.39 km<sup>2</sup>,地貌以丘陵为主,台地和阶地广泛分布于山间,地形复杂多样,地势由西北向东南倾斜,呈阶梯状下降;沿海部分由九龙江河口区、马銮湾、杏林湾和同安湾组成,该区总体上形成了山、海、城和湖相互交融的景观。该区属于亚热带海洋性季风气候,气温变化小,年平均气温 20.9℃,年均降水量为 1388 mm。厦门城市总体规划修编中提出构建“一岛一带双核多中心”的海湾城市空间格局,其中“一岛”为厦门岛,“一带”为环湾城市带,“双核”指厦门岛和厦门东部两个市级中心;“多中心”指的就是思明、湖里、海沧、集美、同安、翔安等区级中心。基于厦门市国民经济和社会统计公报<sup>[28]</sup>,2019 年底,研究区常住人口 429 万人,城镇化率 89.2%,其中厦门岛内常住人口比重占全市人口的 47.79%;GDP 总量 5995.04 亿元,其中厦门岛 GDP 占全市 53.27%。

## 2 研究材料与方法

### 2.1 数据源

本研究的数据源为 2013 年 8 月 4 日厦门市的 Landsat-8 遥感影像数据和同期的 Google Earth 的公园影像。研究采用的软件包括 ArcGIS 10.3、Erdas Imagine 2011 和 Fragstat 4.2。Landsat-8 搭载有陆地成像仪(OLI)和热红外传感器(TIRS),共包括 11 个波段,其中 2 个热红外波段。对遥感影像图像进行预处理主要包括 3 部分:(1)由于在该期遥感数据中,研究区的城区周边的山体林地区域覆盖着极少的云量,因此需要对这

些云量进行手动勾绘然后掩模去除(图2中的白色区域);(2)对遥感影像进行配准,其配准误差小于0.5个像元;(3)对遥感影像进行大气校正<sup>[29]</sup>。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 城市公园土地利用信息提取与景观特征指标选取

选取厦门市15个代表性公园,基于高空间分辨率的Google Earth(1m)影像,通过人工目视解译提取各个公园的边界,并对其内部土地覆盖类型进行分类(图1),包括绿地(主要由乔木林组成)、水体和建筑用地。为了研究城市公园对周围环境的冷岛效应,参考景观生态学中景观参数定义和先前研究,选择城市公园面积(park size)、周长面积比指数(perimeter-area ratio, PAR)、以圆为标准的形状指数(landscape index, LSI)、绿地面积(green space area)、水体面积(water area)、绿地面积比例(percentage of green space area)、水域面积比例(percentage of water area)、人工建筑用地面积比例(percentage of built-up land area)、公园重心到最近海边的距离共9个景观格局特征参数。指标选取不仅考虑了基于表征数量的面积指标,而且包括表征结构的比例指标、形状指标和考虑海水对公园的影响。

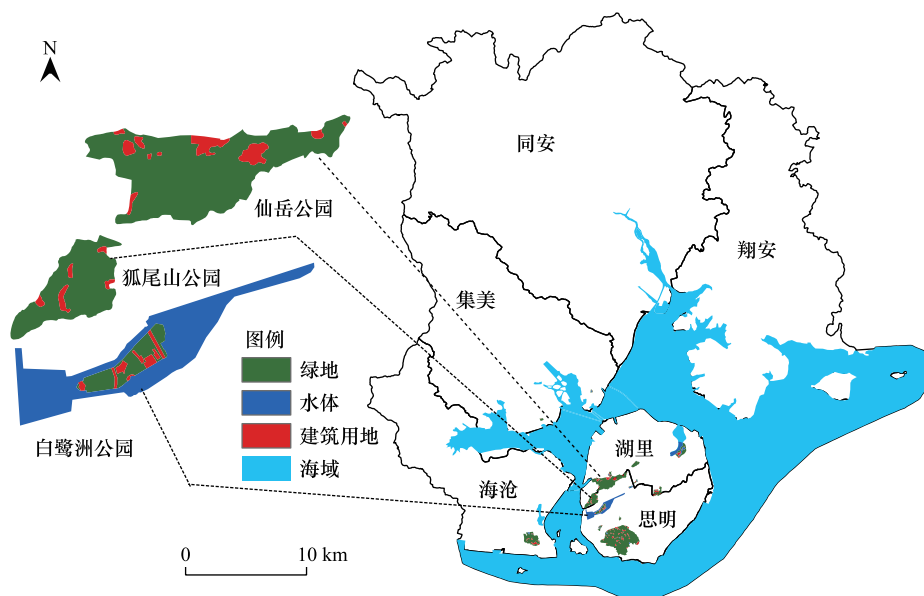


图1 研究区位置、公园空间分布及公园土地利用分类图

Fig.1 Location of study area, showing the urban parks and the landuse types

### 2.2.2 改进版的单通道算法

针对Landsat-8影像,多种地表温度算法被开发。其中,2014年Jimenez-Munoz和Sobrino<sup>[30]</sup>提出改进版的单通道算法SC<sup>JMS</sup>被广为应用。该新算法中修订了Planck函数的 $\gamma$ 和 $\delta$ 两个参数的计算方法,该算法明显地提高地表温度计算精度。虽然Landsat-8 TIRS传感器有10和11两个热红外波段,但第11波段的定标参数尚不稳定,因此美国地质调查局(USGS)建议采用单通道(或单窗)的算法而不是劈窗算法来反演地表温度。本研究使用Landsat-8影像的第10波段和改进版单通道算法来计算厦门市的地表温度,具体公式和参数含义如表1所示。

### 2.2.3 城市公园冷岛效应强度和影响距离计算

基于缓冲区分析法,计算公园对其周边环境的冷岛效应强度和影响距离。根据公园边界,以100 m为间距,向外建立多级缓冲区,直到1200 m。采用ArcGIS强大的空间处理功能,将各缓冲区域与地表温度图叠置,用分区统计方法建立得到各缓冲区域内的平均地表温度。城市公园对周围热环境的降温作用表现为两个方面:一是公园冷岛强度,即降温的幅度有多大;二是公园冷岛的影响距离,即降温影响的范围是多少。城市公园对

周围热环境的调节机制如下:由于公园与周边的热环境(地表温度)不同,两者之间则进行热量和水汽交换,这样使得周边区域的热环境趋于缓和(即降温效应),进而改善公园周边的局地气候,局地气候环流的强度决定着公园降温的影响范围<sup>[25]</sup>。城市公园冷岛效应公式见式(1)。

表 1 修正的单通道算法公式及其参数含义

Table 1 Revised single channel algorithm SC<sup>JMS</sup> and its parameters definition

| 公式<br>Equation                                                           | 参数含义<br>Parameters definition                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $LST = \gamma * [(\psi_1 L_s + \psi_2) / \varepsilon + \psi_3] + \delta$ | LST 是陆地表面温度, $L_s$ 是遥感传感器处辐射强度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ); $\gamma$ 和 $\delta$ 是 Planck 函数的两个重要参数;                                          |
| $\gamma \approx T_s^2 / (b_\gamma L_s)$                                  | $\psi_1, \psi_2$ , and $\psi_3$ 是水汽含量的函数; $\varepsilon$ 是地表发射率, 采用 Sobrino 等 <sup>[30-31]</sup> 提出的基于 NDVI 估算地                                                       |
| $\delta \approx T_s - T_s^2 / b_\gamma$                                  | 表发射率的方法; 对于第 10 波段, $b_\gamma$ 取值为 1324;                                                                                                                             |
| $L_s = M_L \cdot DN + A_L$                                               | DN 指像元灰度值, $M_L$ 指波段偏移系数, $A_L$ 指波段增益系数                                                                                                                              |
| $\psi_1 = \frac{1}{\tau}$                                                | $\tau, L \uparrow$ 和 $L \downarrow$ 分别指大气透射率, 大气上行辐射和下行辐射, 这 3 个参数可以通过大气校正参数计算程序进行计算 ( <a href="https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/">https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/</a> ) |
| $\psi_2 = -L \uparrow - L \downarrow / \tau, \psi_3 = L \downarrow$      |                                                                                                                                                                      |

$$PCI = T_b - T_{\text{park}} \quad (1)$$

式中, PCI 为城市公园冷岛强度(或公园最大降温幅度), 其值越大说明城市冷岛效应越大;  $T_{\text{park}}$  是公园内平均温度,  $T_b$  是距离公园边界  $L_{\text{max}}$  处的温度;  $L_{\text{max}}$  指公园冷岛效应的最大距离<sup>[2, 4]</sup>。  $L_{\text{max}}$  的计算方法为: 以各公园缓冲带的距离为自变量, 以缓冲带内公园平均温度为因变量绘制曲线, 在曲线图中寻求缓冲区内的平均地表温度急剧改变或达到相对平缓的位置, 该位置对应的距离为  $L_{\text{max}}$ , 它意味着公园对周边环境的最大的降温影响范围。城市公园因其面积大小和结构不同, 其冷岛效应可能不同, 导致各公园曲线拐点变化可能不同, 因此其影响距离  $L_{\text{max}}$  可能有较大差异。同时, 在每个公园的缓冲区内剔除了较大面积的植被区和水体等因素, 特别是厦门海外城市, 需要剔出海水的影响, 以减少这些因素对公园降温效应的干扰。较大的 PCI 和较大的  $L_{\text{max}}$  值, 说明城市公园具有较强的冷岛效应, 反映城市公园对周围热岛效应缓解和对热环境的调节作用较大。

### 3 结果与分析

#### 3.1 城市公园地表温度特征

图 2 显示厦门市地表温度及公园温度的空间分布。不包括海域, 研究区陆地地表平均温度为  $(31.26 \pm 3.26)^\circ\text{C}$ , 城市建筑用地平均温度  $(35.15 \pm 2.23)^\circ\text{C}$ , 公园平均温度  $(29.66 \pm 1.48)^\circ\text{C}$ 。可见公园温度不仅低于建筑用地温度  $5.49^\circ\text{C}$ , 也低于陆地温度  $1.60^\circ\text{C}$ 。高温区域分布沿着海沧湾、马銮湾、杏林湾和同安湾和厦门岛西北部呈现海湾型分布的特征, 形成了海沧保税区、新阳工业区、灌口工业区、杏林工业区、集美北部工业区、同安工业区、厦门岛西北港口区、厦门现代物流园区(机场、物流园区和海港码头)等多个高温组团, 热岛效应非常显著。低温区分布较散, 海域和厦门岛外 4 个城区的周边山体林地呈现出大范围的低温区, 形成显著的冷岛区。在城区内部, 零星分布的城市公园和水体也呈现较明显的冷岛区。表明城市绿地和水体对城市热岛的降温效应非常显著。

图 3 显示了研究区公园面积与温度的关系曲线。随着公园面积的增加, 公园平均温度在不断降低, 但并非线性降低, 两者为非线性的对数关系。所有公园中, 思明区的植物园面积最大, 为  $615.06 \text{ hm}^2$ , 其平均温度也最低为  $28.95^\circ\text{C}$ ; 集美区的敬贤公园面积最小  $4.76 \text{ hm}^2$ , 其平均温度最高达  $33.46^\circ\text{C}$ 。图 3 显示公园面积从  $1 \text{ hm}^2$  增加到  $55 \text{ hm}^2$  时, 公园温度降低  $3^\circ\text{C}$  左右; 但面积从  $55 \text{ hm}^2$  增加到  $100 \text{ hm}^2$  时, 公园温度仅降低  $0.5^\circ\text{C}$  左右。比如狐尾山公园  $96.01 \text{ hm}^2$ , 其平均温度  $29.49^\circ\text{C}$ , 比植物园的平均温度仅降低  $0.54^\circ\text{C}$ 。因此, 公园面积

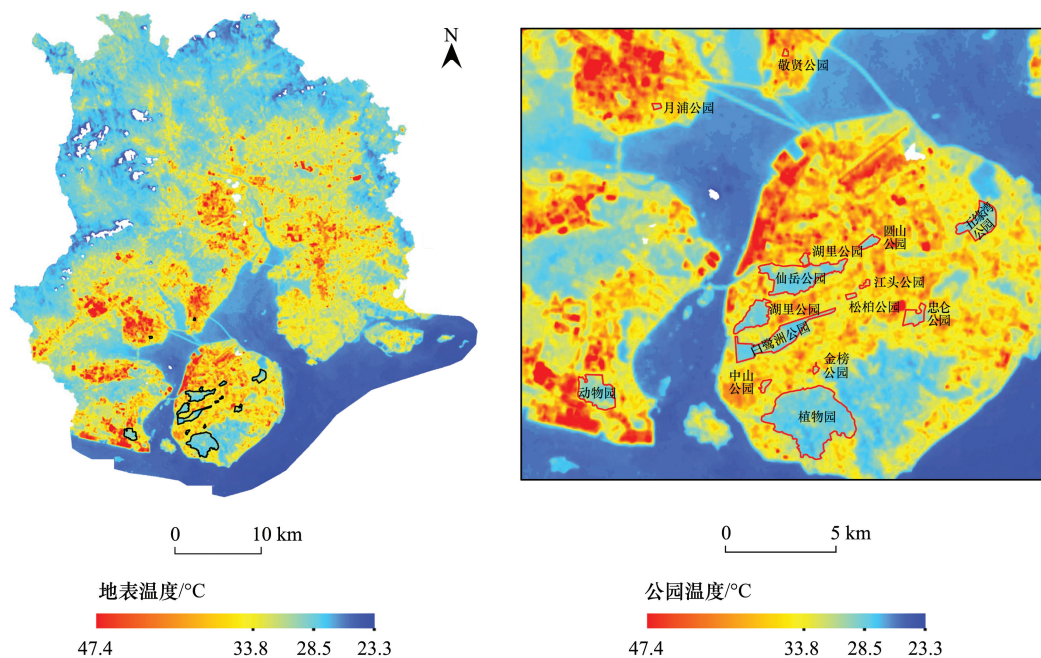


图2 厦门地表温度空间分布和公园温度分布

Fig.2 Maps showing urban land surface temperature (LST) and urban parks LST

可能存在某个临界值,公园面积增加到该值后,若继续增大公园面积,其实对公园热环境的改善不显著。由于城市土地寸土寸金,在规划设计公园时,为了获得较低的土地面积投土、资金投入和较高的公园降温效应的收益,研究区公园面积可控制在  $55 \text{ hm}^2$  左右。

表2显示城市公园地表温度和它的影响因子的多元回归关系。在多元回归分析中,公园面积和公园建筑用地面积两个因子都被保留了下来。公园面积与公园建筑用地面积与公园地表温度 LST 显著相关,说明二者都是影响公园温度的重要因素。式(2)定量表达了公园面积,公园建筑用地面积与公园地表温度之间的关系,方程的决定系数  $R^2$  达 0.915。公园建筑面积与公园地表温度正相关关系,公园建筑面积的增大会导致公园地表温度的增加。因为公园建筑用地(包括道路等)属于不透水面,其不仅具有高吸热率和高储热性的特征,而且其缺乏植被覆盖,蒸腾蒸发作用较小,因此地表热平衡受到破坏,热量更多地以显热的形式交换而导致地表温度快速上升,产生明显的增温现象<sup>[32]</sup>。回归模型中两个因子的标准化系数看出,标准化公园面积系数是公园建筑用地面积系数的2倍多,说明公式(2)中公园面积因子的贡献大于后者。在规划设计公园时,同样面积的公园,应该尽量减少建筑用地的面积,这样会降低公园的平均温度,进而利于增强公园冷岛效应。

$$y = -1.321 \ln(x_1) + 0.556 \ln(x_2) + 35.218 \quad (R^2 = 0.915) \quad (2)$$

式中,  $x_1$  为公园面积( $\text{hm}^2$ ),  $x_2$  为建设用地面积( $\text{hm}^2$ ),  $y$  为公园平均温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

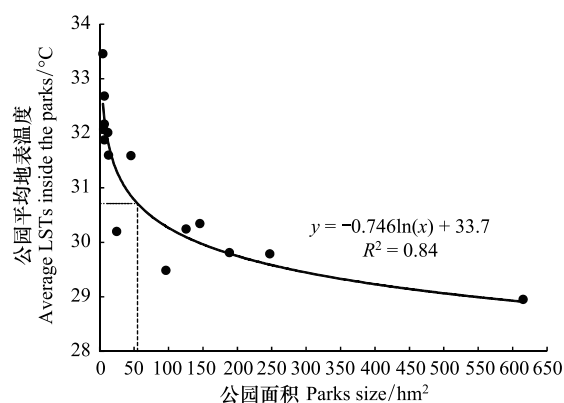


图3 公园面积与公园平均温度的关系

Fig.3 Relationship between urban parks areas and average LSTs of urban parks

LSTs, Land surface temperatures

表 2 城市公园地表温度与其影响因子的多元回归分析结果

Table 2 Multivariate regression of LST and its impacting factors of urban parks

| 自变量<br>Independent                                    | 标准化系数<br>Std. Coefficient | t 检验<br>t test | 显著性<br>Significance | 模型标准误差估计<br>Std. error of estimation/℃ |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------|----------------------------------------|
| 公园面积 Park size/hm <sup>2</sup>                        | -1.622                    | -7.027         | 0.000 **            | 0.418                                  |
| 公园建筑面积<br>Built-up land area of parks/hm <sup>2</sup> | 0.758                     | 3.284          | 0.007 *             |                                        |

\*\* 表示变量在 0.01 水平上显著相关; \* 表示变量在 0.05 水平上显著相关

### 3.2 城市公园冷岛 PCI 强度分析

图 4 显示了研究区公园绿地面积与 PCI 强度的关系曲线。随着公园绿地面积的增加,公园的 PCI 强度不断降增加,但并非线性增加,两者为非线性的对数关系。所有公园的 PCI 强度都大于 2.4 ℃,即集美敬贤公园具有最小的 PCI 强度 2.49 ℃;最大 PCI 强度接近 6 ℃,为 5.63 ℃的海沧动物园(面积 145.42 hm<sup>2</sup>)。而且图 4 还表明,当公园绿地面积增加到 55 hm<sup>2</sup>时,公园的 PCI 强度逐渐减缓,继续增加公园绿地面积,PCI 强度增加不明显。公园绿色植被降温的主要原因有:(1)公园绿色植被具有光合作用和蒸腾作用,能够吸收周围环境中的热量,同时向周围环境散发/释放水分,因此降低了周围空气温度<sup>[33]</sup>;(2)绿色植被通过冠层遮荫,阻挡太阳辐射,减少与地面的能量交换,从而降低地面对空气的增温<sup>[33-34]</sup>;(3)较大的绿地公园,其绿色植被光合作用、蒸

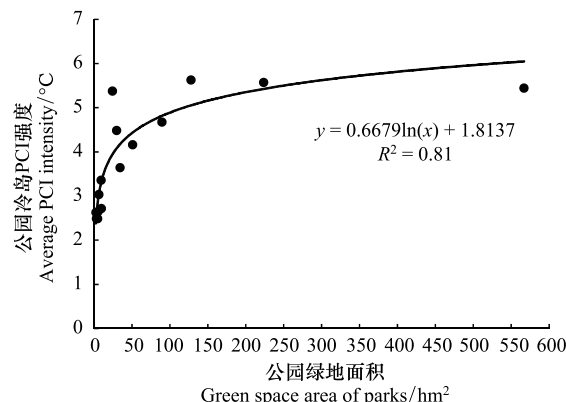


图 4 公园绿地面积与公园冷岛 PCI 强度的关系

Fig.4 Relationship between green land areas and average PCI intensity for urban parks

PCI, park cool island

腾作用和遮荫作用都比较强烈,能够与周边的热环境两者之间则进行较强的热量和水汽交换,因而其 PCI 强度较大,但随着公园面积的增加,PCI 强度并非一直增大。如植物园的面积是仙岳公园面积的 2.5 倍,但其 PCI 强度分别是 5.45 ℃和 5.57 ℃,两者仅仅相差 0.12 ℃。本研究暗示着公园绿地面积存在某个临界值,公园面积达到该值后,若继续增大公园面积,PCI 强度趋于稳定,其对公园热环境的改善不显著。因此,从公园所投入的建设面积与其降温效应的收益角度来看,公园绿地面积控制在 55 hm<sup>2</sup>内较为合理。

表 3 显示了各公园冷岛 PCI 强度与其影响因子的多元回归关系。其中 PCI 强度与公园绿地面积、公园建筑面积、周长面积比 PAR 指数三个因子均在 0.05 的水平上显著相关,因此在回归方程中都被保留下来。水体面积比例对冷岛 PCI 强度的影响不太显著,所以在回归方程中被排除。PCI 强度与公园绿地面积因子呈现正相关对数关系,但与公园建筑面积、周长面积比 PAR 指数成负相关关系。公园绿地面积因子的标准化系数大于后两者,说明它在回归方程中,公园绿地面积因子的贡献大于后两者。公式(3)定量表达了公园绿地面积,公园建筑用地面积,公园形状指数与公园地表温度 PCI 之间的关系。PCI 强度与公园周长面积比 PAR 呈线性负相关关系,当 PAR 增大时,PCI 强度则变小。而公园的形状越复杂,则 PAR 越小,引起 PCI 强度变大。一方面,公园建筑用地面积的增加,即不透水面比例提高,将导致地表温度的明显增加;而降低不透水面的面积,增加公园绿地和水面可以明显地降低地表温度,缓解城市热岛效应<sup>[35]</sup>。另一方面,绿地公园形状越复杂,公园承载的冷空气与其周边环境的热量流交换越便利,导致其对周边的热环境影响力越强,即 PCI 强度变大<sup>[19, 25]</sup>。因此公园中,减少公园建筑用地面积,增加绿地公园的形状复杂度,有利于其 PCI 强度的增加,便于缓解城市公园周围的热岛效应,即边界复杂的公园,比同等条件下边界简单的公园降温效果好。

$$y = 0.661 \ln(x_1) - 0.415 \ln(x_2) - 11.036x_3 + 3.416 \quad (R^2 = 0.911) \quad (3)$$

式中,  $x_1$  为公园绿地面积 ( $\text{hm}^2$ ),  $x_2$  为建设用地面积 ( $\text{hm}^2$ ),  $x_3$  为公园周长与面积比值 ( $\text{km}/\text{hm}^2$ ),  $y$  为公园 PCI ( $^{\circ}\text{C}$ )。

表 3 城市公园冷岛 PCI 强度与其影响因子的多元回归分析结果

Table 3 Multivariate regression of PCI and its impacting factors of urban parks

| 影响因子<br>Independent                                      | 标准化系数<br>Std. coefficient | $t$ 检验<br>$t$ test | 显著性<br>Significance | 模型标准误差估计<br>Std. error of estimation/ $^{\circ}\text{C}$ |
|----------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|----------------------------------------------------------|
| 公园绿地面积<br>Green space area of parks / $\text{hm}^2$      | 0.891                     | 3.444              | 0.005 **            | 0.412                                                    |
| 公园建筑面积<br>Built-up land area of parks / $\text{hm}^2$    | -0.615                    | -2.908             | 0.014 *             |                                                          |
| 周长面积比指数 (P/A)<br>Perimeter-area ratio (PAR) of parks     | -0.615                    | -2.667             | 0.022 *             |                                                          |
| 公园水体面积比例<br>Percentage of water area inside the parks /% | 0.301                     | 0.769              | 0.095               |                                                          |

\* \* 表示变量在 0.01 水平上显著相关; \* 表示变量在 0.05 水平上显著相关

Cao 等<sup>[3]</sup>在研究日本名古屋的城市公园的冷岛效应时,建立了该区域的 PCI 预测模型,在他们的模型中 PCI 强度与公园中乔木和灌木的面积之和与公园形状指数 LSI 的比值成对数关系。本研究建立的 PCI 回归模型类似于 Cao 等的研究,也使用了公园绿地的面积和公园的形状指数两个因子。

### 3.3 城市公园冷岛影响距离 $L_{\max}$ 分析

表 4 显示了各公园冷岛 PCI 的影响距离及其影响因子的多元回归关系,其中公园面积和公园水体面积比例两个因子在 0.05 水平上显著相关,因此在回归模型中都被保留下来。PCI 的影响距离  $L_{\max}$  与这两个因子都呈现正相关关系,而且  $L_{\max}$  与公园面积成对数关系。随着公园面积的增加,  $L_{\max}$  开始增长较快,但当公园面积大于一定阈值后,  $L_{\max}$  增加放缓。公式(4)定量表达了公园面积、公园水体面积比例与 PCI 的影响距离  $L_{\max}$  之间的关系。  $L_{\max}$  与公园水体面积比例线性正相关,因此公园中水体面积的增加,有利于其增加 PCI 的影响距离,因此更容易缓解城市公园周围的热岛效应。本研究中五缘湾公园 ( $125.37 \text{ hm}^2$ ) 的公园冷岛影响距离  $L_{\max}$  达 1000 m,该公园是以水体为主的公园,水体面积比例达 51.28%。植物园是以森林为主的公园(植被覆盖度 92.17%),但水体比例低于 1%,虽然其面积为五缘湾公园的 4.9 倍,其  $L_{\max}$  值为 900 m,仍然低于五缘湾公园。所有公园中,以森林为主的金榜公园(植被覆盖度 95.11%)具有最低的  $L_{\max}$  值(100 m),相比而言,敬贤公园的面积虽然小于金榜公园,但敬贤公园具有 27.04%的水体面积,  $L_{\max}$  值达 200 m。因此,水体面积比例较大的公园,比同等条件下水体面积较小的公园降温效果好。为了有减缓城市公园的周边热环境效应,使城市公园冷岛的影响距离  $L_{\max}$  增大,在保证公园绿地面积达到一定规模时,应该提高公园水体的面积比例。

$$y = 129.33 \ln(x_1) + 3.8781x_2 - 53.932 \quad (R^2 = 0.719) \quad (4)$$

式中,  $x_1$  为公园面积 ( $\text{hm}^2$ ),  $x_2$  为公园水体面积比例 (%),  $y$  为公园降温距离 (m)。

表 4 城市公园冷岛效应的影响距离  $L_{\max}$  与其影响因子的多元回归分析结果

Table 4 Multivariate regression of effective cooling length for PCI and its impacting factors of urban parks

| 影响因子<br>Independent                                      | 标准化系数<br>Std. Coefficient | $t$ 检验<br>$t$ test | 显著性<br>Significance | 模型标准误差估计<br>Std. error of estimation/m |
|----------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|----------------------------------------|
| 公园面积 Park size / $\text{hm}^2$                           | 0.758                     | 4.952              | 0.000 **            | 159.68                                 |
| 公园水体面积比例<br>Percentage of water area inside the parks /% | 0.361                     | 2.357              | 0.036 *             |                                        |

\* \* 表示变量在 0.01 水平上显著相关; \* 表示变量在 0.05 水平上显著相关

## 4 结论与讨论

以水体和绿色植被等景观构成的城市公园所形成的城市冷岛是改善局地城市热环境的一个重要手段。

由于快速城市化导致的城市土地资源异常紧缺,如何让宝贵的公园景观最大程度发挥冷岛降温效应,实现改善城市热环境的高效益,已成为当前亟待解决的生态问题之一。本研究基于 Landsat-8 和 Google Earth 遥感数据,以厦门市 15 个公园为对象,探索了公园平均地表温度、城市公园冷岛强度和公园冷岛影响距离的主要影响因素。

公园内部平均温度与公园面积和公园建筑用地面积两个因子显著相关,与林地或水体面积无显著相关性。公园面积(配置植被和水体)越大、公园建筑用地面积越低,公园内温度越低,公园内的冷岛效应则越显著。但随着公园面积逐渐增加,公园平均温度的下降速率趋于平缓,本研究区存在一个公园面积的阈值  $55 \text{ hm}^2$  左右;因此,进行公园规划设计时,需要综合平衡所投入的公园总体建设面积大小与其降温效应的总体收益。

公园对其周边的热环境有显著的缓解作用。厦门市 15 个公园中,公园冷岛 PCI 强度范围为  $2.49\text{—}5.62 \text{ }^\circ\text{C}$ ,公园冷岛影响距离为  $100\text{—}1000 \text{ m}$  之间。公园冷岛 PCI 强度主要受公园绿地面积、建设用地面积及公园周长与面积比值 3 个因子的影响。公园绿地面积越大、建设用地面积越小,公园周长面积比越小,公园冷岛 PCI 强度越大。公园边界形状复杂,有助于增强公园冷岛 PCI 强度,利于公园的降温效应。公园冷岛影响距离  $L_{\max}$  与公园面积、水体面积比例显著正相关,公园面积越大且水体面积比例越高,则  $L_{\max}$  越大。

赵景柱等<sup>[7]</sup>提出了景感营造的 6 个主要原则,本研究认为,为了缓解城市局部热岛效应,从规划与设计城市公园应至少涉及到了 2 个原则:方位的顺脉性和营造过程的渐进性原则。在方位的顺脉性方面,景感营造的设计者规划公园时,需要考虑公园的特点、周边相关生态系统的特点、公园内部空间要素布局的需要,设定公园的位置、面积大小、公园组成及空间配置。这些人为规划的公园未必能达到较满意的公园冷岛 PCI 和最远的冷岛影响距离,因此,公园景感营造的过程是渐进性的。即使已建立的公园,其位置和公园面积大小无法改变,但公园的内部组成和空间结构可以进行适当调整。

表 5 总结了本研究与相关城市公园冷岛效应的研究。城市公园的冷岛效应首先体现在对公园内部小气候的影响。城市公园的“冷岛效应”面积存在阈值,超过该阈值,其冷岛效率增加缓慢,所以进行公园景感营造,需要首先确定公园面积大小。但这个阈值在不同城市可能不同,本研究和广州<sup>[20]</sup>、北京<sup>[25]</sup>的公园类似,公园阈值为  $55 \text{ hm}^2$  左右,重庆山城的公园阈值<sup>[36]</sup>仅为  $14 \text{ hm}^2$ 。设计太小的公园面积,比如小于  $2 \text{ hm}^2$ <sup>[3]</sup>,这样的冷岛效应不明显。

公园冷岛效应也体现在对公园周围一定距离内的显著影响,包括 PCI 强度和冷岛影响距离  $L_{\max}$  两个参数。表 5 显示这两个参数在不同的城市有一定的差异,墨西哥城的公园冷岛作用距离  $L_{\max}$  甚至达  $2 \text{ km}$ <sup>[16]</sup>。因为不同的城市公园不仅经纬度不同,而且同一个城市的公园内部土地利用组成比例、形状、空间配置等因子往往也不同,因此,影响着公园冷岛 PCI 强度和  $L_{\max}$ 。但目前对公园冷岛效应的关键因子等方面存在诸多不确定性<sup>[16]</sup>。表 5 也证实不同城市,公园冷岛效应的关键因子有一定的差异。表 5 显示,绿地面积、水体面积、形状指数、三维绿量、时间尺度(如季节变化)、乔木和灌木林的面积、建筑用地面积比例、和空气相对湿度等因子可能是某些城市公园冷岛效应的重要因子。除了这些因子,风也是缓解城市热岛的因子之一,因为良好的空气流通可以带走城市中的热量。先前的研究<sup>[37-38]</sup>表明福州之所以演化为“火炉”城市,除了城市不透水面比例不断增加,植被和水体比例降低外的原因外,另一个重要原因就是其城市通风廊道受阻,即由于开发建设的高密度、高层建筑犹如巨大屏风阻挡了该区域的主要海风入口。城市(或公园)的通风廊道通常以道路为载体,因此为了减缓城市热岛,如何规划构建与当地主导风向一致的林荫大道、适度增加路网密度、建立与空气流通方向一致的、低、中层建筑、限制建筑高度、减少建筑密度和增加通风空间等,应该成为景感营造中的一个研究重点。此外,人为活动排放的热量对公园冷岛效应的影响,目前鲜有报道。在城市公园规划设计时,需要综合考虑这些因子,从而更好的发挥公园对周边环境的降温效应,改善城市的热环境,提高城市的“宜居性”。

表 5 主要城市公园冷岛效应的研究案例结果  
Table 5 Current key cases of cool island of urban parks

| 城市名称<br>City name | 公园面积阈值<br>Threshold value of<br>park size                 | 公园冷岛 PCI 强度与冷岛<br>影响距离 $L_{\max}$<br>PCI intensity and its effective<br>cooling length | 公园冷岛效应的影响因子<br>Influence factors of park cool island effects                                  | 参考文献<br>References |
|-------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 广州                | 最佳绿地面积 0.42—54<br>hm <sup>2</sup> 之间                      | PCI:1.9—4.3 ℃<br>$L_{\max}$ :14—432 m                                                  | 水体面积比例高的公园和长宽比较大(比值 $L>2$ )的公园其降温效果都比较好;                                                      | [20]               |
| 日本名古屋             | 公园面积至少需要大于<br>2 hm <sup>2</sup> ,PCI 明显;                  | 夏季平均 PCI 为 1.30 ℃;<br>春季 1.16 ℃;<br>秋季 0.43 ℃                                          | PCI 强度受季节影响;PCI 强度由公园内乔灌木的面积和公园 LSI 指数决定;                                                     | [3]                |
| 北京                | 公园水体面积 50 hm <sup>2</sup><br>左右                           | PCI:1.23—7.17 ℃;<br>$L_{\max}$ :300—2400 m                                             | PCI 强度受水体面积、三维绿量和建筑面积比例等因子影响;冷岛影响距离 $L_{\max}$ 与公园林地和水体的面积正相关,且水体面积影响更显著;                     | [25]               |
| 上海                |                                                           | 平均 PCI 1.55 ℃;<br>$L_{\max}$ :50—200m;                                                 | 公园面积、形状、建筑用地面积比例、水体面积比例等是 PCI 强度的重要影响因子;                                                      | [22]               |
| 西安                | 公园水体面积比例<br>≥30%;                                         | PCI:0.5—2.5 ℃;<br>$L_{\max}$ :79—500 m;                                                | PCI 强度与公园绿地面积、水体面积呈显著正相关关系;                                                                   | [21]               |
| 西安                | 公园面积 130—150 hm <sup>2</sup> ;<br>水体面积 20 hm <sup>2</sup> | PCI:0.04—1.3 ℃;<br>$L_{\max}$ :120—600 m;                                              | PCI 强度与绿地平均邻近度存在极强的正相关性;                                                                      | [26]               |
| 重庆                | 14 hm <sup>2</sup>                                        | PCI:0.5—3.8 ℃;                                                                         | 空气相对湿度与 PCI 强度线性正相关;                                                                          | [36]               |
| 厦门                | 公园面积 55hm <sup>2</sup> 左右                                 | PCI:2.49—5.63 ℃;<br>$L_{\max}$ :100—1000 m;                                            | PCI 强度由公园绿地面积、建筑面积和面积-周长形状指数因子决定;冷岛影响距离 $L_{\max}$ 与公园面积和水体面积比例显著正相关,水体面积比例增加有利于增大 $L_{\max}$ | 本研究                |

充分利用景感生态学的理念,后续的许多问题需要进一步研究;本研究选取了 15 个公园,后续的研究将扩展公园样本进行更为深入分析;随着时间的推进,不仅气候发生变化,而且公园的内部结构也可能发生变化(如土地利用类型比例变化、树种搭配变化和植被结构变化等),因此需要进行时间序列的公园冷岛效应研究;目前反演地表温度采用 Landsat-8 影像,其热红外波段的空间分辨率较低(100 m),导致混合像元问题,因此对研究结果有一定的影响。可考虑采用高分五号卫星 40 m 空间分辨率的热红外影像、10 m 多光谱分辨率的哨兵 Sentinel-2 影像并结合地表温度细化算法,获得高空间分辨率的地表温度进行分析;公园冷岛的影响因子比较多,可增加风因子、公园内树种类型、植被蓄积量和其他合适的景观格局指数等因子进行分析。

参考文献 (References):

[1] Kong F H, Yin H W, Wang C Z, Cavan G, James P. A satellite image-based analysis of factors contributing to the green-space cool island intensity on a city scale. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13(4): 846-853.

[2] 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.

[3] Cao X, Onishi A, Chen J, Imura H. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 96(4): 224-231.

[4] Ren Z B, He X Y, Zheng H F, Zhang D, Yu X Y, Shen G Q, Guo R C. Estimation of the relationship between urban park characteristics and park cool island intensity by remote sensing data and field measurement. *Forests*, 2013, 4(4): 868-886.

[5] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80(4): 386-395.

[6] Zhao J Z, Liu X, Dong R C, Shao G F. Landsenses Ecology and ecological planning toward sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 293-297.

[7] Zhao J Z, Yan Y, Deng H B, Liu G H, Dai L M, Tang L N, Shi L Y, Shao G F. Remarks about landsenses ecology and ecosystem services. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(3): 196-201.

[8] 石龙宇, 赵会兵, 郑拴宁, 于天舒, 董仁才. 城乡交错带景感生态规划的基本思路与实现. *生态学报*, 2017, 37(6): 2126-2133.

- [ 9 ] Dong R C, Yu T S, Ma H, Ren Y. Soundscape planning for the Xianghe Segment of China's grand canal based on landsenses ecology. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 343-350.
- [ 10 ] Wu G, Tan L B, Yan Y, Tian Y, Shen Y, Cao H M, Dong M T. Measures and planning for wetland restoration of Xianghe Segment of China's Grand Canal. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 326-332.
- [ 11 ] Zheng R B, Zhang T H, Liu Z F, Wang H W. An IoT system designed for ecological and environmental management of the Xianghe segment of China's Grand Canal. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2016, 23(4): 372-380.
- [ 12 ] Zheng S N, Yu B. Landsenses pattern design to mitigate gale conditions in the coastal city-a case study of Pingtan, China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2017, 24(4): 352-361.
- [ 13 ] Ren Y, Zhang C, Zuo S D, Li Z W. Scaling up of biomass simulation for *Eucalyptus* plantations based on landsenses ecology. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2017, 24(2): 135-148.
- [ 14 ] 赵景柱. 关于生态文明建设与评价的理论思考. *生态学报*, 2013, 33(15): 4552-4555.
- [ 15 ] Zheng S, Cui K, Sun S, Wu J, Qiu Q, Tian Y. Planning and design based on landsenses ecology: the case study of Chongming island landsenses ecol-industrial park. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(5): 435-442.
- [ 16 ] 余兆武, 郭青海, 孙然好. 基于景观尺度的城市冷岛效应研究综述. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 636-642.
- [ 17 ] 史欣, 吴统贵, 徐大平, 刘燕堂, 栗娟, 肖以华. 广州帽峰山森林公园的"冷岛"效应分析. *中国城市林业*, 2005, 3(3): 46-48.
- [ 18 ] 庞新坤, 孙然好. 城市公园景观秋冬季动态热效应. *生态学报*, 2015, 35(12): 4196-4202.
- [ 19 ] 徐丽华, 岳文泽. 城市公园景观的热环境效应. *生态学报*, 2008, 28(4): 1702-1710.
- [ 20 ] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森. 广州市城区公园对周边环境的降温效应. *生态学报*, 2010, 30(18): 4905-4918.
- [ 21 ] 冯晓刚, 石辉. 基于遥感的夏季西安城市公园"冷效应"研究. *生态学报*, 2012, 32(23): 7355-7363.
- [ 22 ] 阮俊杰. 城市公园对夏季热环境的影响——以上海市中心城区为例. *生态环境学报*, 2016, 25(10): 1663-1670.
- [ 23 ] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [ 24 ] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. *生态学报*, 2001, 21(11): 1885-1892.
- [ 25 ] 冯悦怡, 胡潭高, 张力小. 城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响. *生态学报*, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [ 26 ] 石蕾洁, 赵牡丹. 城市公园夏季冷岛效应及其影响因素研究——以西安市中心城区为例. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(5): 154-161.
- [ 27 ] 花利忠, 崔胜辉, 黄云凤, 尹锴, 熊永柱. 海湾型城市半城市化地区空间扩展演化——以厦门市为例. *生态学报*, 2009, 29(7): 3509-3517.
- [ 28 ] 厦门市统计局, 国家统计局厦门调查队. 厦门市 2019 年国民经济和社会发展统计公报. (2020-03-20)[2020-05-01]. [http://www.xm.gov.cn/zfxgk/xxgkznm/gmzgan/tjgb/202003/t20200320\\_2433223.htm](http://www.xm.gov.cn/zfxgk/xxgkznm/gmzgan/tjgb/202003/t20200320_2433223.htm).
- [ 29 ] 徐涵秋. 新型 Landsat 8 卫星影像的反射率和地表温度反演. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 741-747.
- [ 30 ] Jiménez-Muñoz J C, Sobrino J A, Skoković D, Mattar C, Cristóbal J. Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(10): 1840-1843.
- [ 31 ] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Soria G, Romaguera M, Guanter L, Moreno J, Plaza A, Martinez P. Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 316-327.
- [ 32 ] 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.
- [ 33 ] 赵伟, 文凤平, 张林波, 高艳妮, 何珏霖. 厦门市绿色植被降温服务功能核算及其时空动态特征. *环境科学研究*, 2019, 32(1): 85-94.
- [ 34 ] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 徐海龙, 李俊生, 蒲英霞. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征. *生态学报*, 2018, 38(12): 4234-4244.
- [ 35 ] Xu H Q, Shi T T, Wang M Y, Fang C Y, Lin Z L. Predicting effect of forthcoming population growth-induced impervious surface increase on regional thermal environment: Xiong'an New Area, North China. *Building and Environment*, 2018, 136: 98-106.
- [ 36 ] Lu J, Li C D, Yang Y C, Zhang X H, Jin M. Quantitative evaluation of urban park cool island factors in mountain city. *Journal of Central South University*, 2012, 19(6): 1657-1662.
- [ 37 ] 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.
- [ 38 ] 王琳, 徐涵秋. 快速城市化下福州市的热环境变迁. *同济大学学报: 自然科学版*, 2017, 45(9): 1336-1344.