城市公园及周边景观格局对冷岛效应的影响
——以福建省福州市为例

刘晟龙[1]，谢慧黎[2]，陈凌秀[1]，戴洪霞[1]，张 娇[1]，许梦杰[1]，陈思韬[1]，刘兴诏[1]
（1.福建农林大学 风景园林与艺术学院，福建 福州 350002；2.科廷大学 设计与建筑环境学院，澳大利亚 珀斯 6102）

摘　要：［目的］分析福州城市公园及周边景观格局对冷岛效应的影响，量化不同冷岛效应类型公园降温效果及景观配置特征，为了解城市公园冷岛效应、缓解城市高温提供科学依据。［方法］根据《福州市城市公园名录》筛选 23 个城市公园，基于 Landsat 8，GF-1 等遥感数据采用辐射传输方程反演地表温度，分析公园规模、形状、公园及其周边景观组成、植被覆盖、建筑高度以及经济发展水平要素与冷岛效应的相关关系；拟合公园面积与累计冷岛效应梯度对数函数曲线，计算公园效率阈值；基于降温效果划分公园冷岛效应类型并分析各类型降温特点与公园配置。［结果］①福州市主城区热岛效应显著，公园降温效果明显。②公园冷岛效应与公园的规模、形状以及公园和周边景观组成要素相关性显著，与植被覆盖要素相关性较弱，与建筑高度、经济发展水平要素无显著相关性。③福州城市公园的降温效率阈值为 0.22 hm^2。④基于归一化公园平均温度和累计冷岛效应梯度将公园划分为强冷岛效应型、较强冷岛效应型以及弱冷岛效应型 3 类。不同类型公园有着不同的降温效果以及景观格局分别适合布置于郊区、市区以及用地局促的人流密集区。［结论］未来在公园规划布局中应充分考虑公园冷岛效应类型及其景观格局，合理布局公园规模和景观组成，以求用最小公园规模最大限度地缓解城市热岛效应。

关键词：城市公园；冷岛效应；景观格局；效率阈值；福州市
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0296-10　　**中图分类号：**X22，TU986

文献参数：刘晟龙，谢慧黎，陈凌秀，等.城市公园及周边景观格局对冷岛效应的影响[J].水土保持通报，2025，45（1）：296-305. Liu Shenglong，Xie Huili，Chen Lingxiu，et al. Influence of urban parks and surrounding landscape patterns on cold island effect [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45（1）：296-305. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.031；CSTR：32312.14.stbctb.2025.01.031.

Influence of urban parks and surrounding landscape patterns on cold island effect
—A case study of Fuzhou City，Fujian Province

Liu Shenglong[1]，Xie Huili[2]，Chen Lingxiu[1]，
Dai Hongxia[1]，Zhang Jiao[1]，Xu Mengjie[1]，Chen Sitao[1]，Liu Xingzhao[1]
（1.*College of Landscape Architecture and Art*，*Fujian Agriculture and Forestry University*，*Fuzhou*，*Fujian* 350002，*China*；2.*School of Design and the Built Environment*，*Curtin University*，*Perth* 6102，*Australia*）

Abstract：［Objective］The influence of urban parks and surrounding landscape patterns on the cold island effect in Fuzhou City，Fujian Province，was analyzed，and the cooling impacts and landscape configurations of parks with different types of cold island effect were quantified. in order to provide a scientific basis for understanding the cold island effect of urban parks and alleviating high urban temperatures. ［Methods］Twenty-three parks were selected from the list of urban parks in Fuzhou City，and the radiative transfer equation was used to invert the land surface temperature based on Landsat 8 and GF-1 as well as other remote sensing data. For each park，the correlations between the scale，shape，internal and surrounding landscape components，vegetation coverage，building height，and economic development and the exerted cold island

收稿日期：2024-07-17　　**修回日期：**2024-10-22　　**采用日期：**2024-10-22
资助项目：福建省科技创新项目“基于山水林田湖草系统的闽江流域生态安全格局”（KY-090000-04-2021-012）；福建农林大学科技创新专项基金项目“城市蓝绿空间冷岛效应的驱动机制及优化策略研究”（KFB23171）
第一作者：刘晟龙（2000—），男（汉族），福建省福安市人，硕士研究生，研究方向为城乡资源环境与空间规划。Email：liusl9241@163.com。
通信作者：刘兴诏（1984—），男（汉族），山东省滕州市人，博士，副教授，主要从事城乡资源环境与空间规划研究。Email：xzliu@fafu.edu.cn。

effect were analyzed. A logarithmic function curve was fitted between park area and the cumulative gradient of the cold island effect to calculate the cooling efficiency threshold. The cooling effect was used as basis to divide the types of cold island effect of parks, and the respective cooling characteristics and park configurations were analyzed. [Results] ① The heat island effect in the main urban area of Fuzhou City was significant, and the cooling effect of the parks was obvious provided noticeable cooling. ② The cold island effect of parks was significantly correlated with the scale, shape, and internal and surrounding landscape components and weakly correlated with vegetation coverage, while there were no significant correlations with building height and economic development. ③ The cooling efficiency threshold of parks in Fuzhou City was 0.22 hm^2. ④ The types of cold island effect of parks were divided into strong, sub-strong, and low based on the normalized average temperature and cumulative gradient of the cold island effect. Each type hads distinct cooling effects and landscape patterns suitable for suburban, urban, and crowded areas with limited land. [Conclusion] Future park planning and layout should consider the types of cold island effect of parks and respective landscape patterns, and park scale and landscape composition should be rationally distributed to minimize the park scale and achieve maximum alleviation of the urban heat island effect.

Keywords: urban park; cold island effect; landscape pattern; cooling efficiency threshold; Fuzhou City

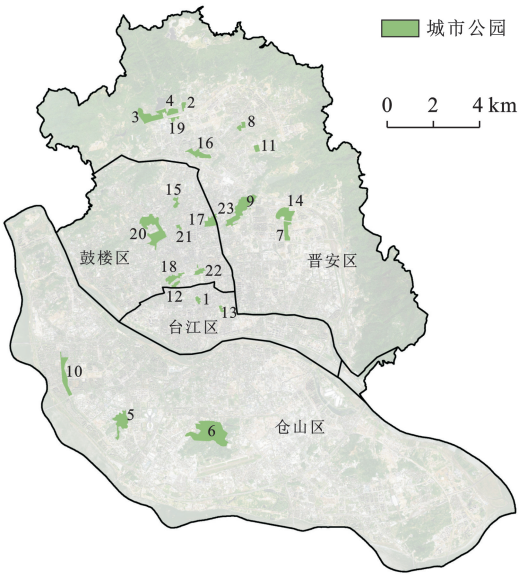
随着城市化进程的不断深入，城市建成区范围不断扩大[1]，城市下垫面变化、人为排放 CO_2 以及大量能源消耗，导致城市区域温度远高于郊区温度，即热岛效应。城市热岛效应的加剧造成极端高温天气频现，城市居民健康风险增加，病死率呈上升趋势[2]，对经济、社会、生态等多方面造成了严重的破坏。高温导致城市内部“高温—能源消耗—热岛效应—高温”的恶性循环将对城市的可持续发展造成威胁[3]。因此如何缓解城市热岛效应，改善城市小气候并提升居民生活质量有着重要意义。

绿地和水体作为城市中的天然冷岛有着较强的降温效果。绿地通过植被的蒸腾和遮荫作用，直接反射和吸收部分太阳辐射，降低了地表对短波辐射的吸收从而降低温度[4]。水体则是因其高比热容以及通过蒸发促进空气流动而作为降低温度的重要因素[5]。城市公园因其具有高绿地和水体比例，通常被作为冷岛效应主要的研究对象[6]。目前城市公园在缓解热岛效应的研究主要探究公园景观格局与城市降温效应的之间关系，并取得了一系列的研究成果。如：陈力行等[7]通过 Landsat 8 及 Sentinel-2 遥感影像数据，揭示出公园面积与公园的降温范围、降温效率等呈显著相关性。徐梦耀等[8]进一步证实了公园的周长和面积等因素对公园的降温区域的正向影响。刘艳芬等[6]基于遥感影像数据反演地表温度，明确了福州城市公园面积、周长及形状指数对降温距离、幅度、梯度有正向促进作用。Chen 等[9]通过遥感技术分析公园内的植被指数（NDVI，NDISI 等）与地表温度，指出公园尺度与降温面积之间存在密切的相关性。综上所述，现有研究强调了公园的规模、形状、绿化覆盖率等因素对城市热岛效应的缓解具有显著影响，为城市绿地规划和建设提供了重要的参考依据。尽管对城市公园冷岛效应研究已取得诸多进展，但当前研究体系仍存在局限性。一方面，研究焦点局限于公园景观格局对冷岛效应的影响，而较少探讨公园周边景观格局对冷岛效应的潜在贡献。另一方面，多数研究侧重于冷岛效应与景观配置等指标的相关性分析，却鲜有对不同公园冷岛效应能力的具体分析。鉴于此，本研究拟以“火炉城市”福州市为例，以其主城区城市公园为研究对象，分析公园及其周边景观格局与公园冷岛效应相关性分析，计算公园降温最佳效率阈值，量化公园冷岛效应能力并进一步探讨不同冷岛效应类型城市公园缓解热岛效应的优化策略。

1　研究区概况

福州市（118°08′—120°31′E，25°15′—26°39′N）是福建省省会，位于福建省东部、闽江下游及沿海区域。地貌属于河口盆地，气候为典型亚热带季风气候，温暖湿润，降雨充沛，年均降雨量为 900～2 100 mm。研究区为福州主城区（图 1），包括鼓楼区、仓山区、台江区和晋安区部分街道共计 39 个街道。第 7 次人口普查数据显示，福州市主城区人口 299.24 万人，占总人口的 36.09%，而主城区面积为 3.16×10^4 hm^2，仅占福州总面积 2.58%。随着城市化的推进和人口密度的不断增加，城市热岛效应愈发严重，成为名副其实的“火炉城市”。因此，研究福州市主城区公园冷岛效应以缓解高温压力迫在眉睫。本次研究以《福州市城市公园名录》和谷歌地图影像为依据选取研究区域。为了减少其他因素对研究的干扰，基于前人筛选规则排除具有以下特征的城市公园：①规模小于 900 m^2；

②与大面积水体相连；③靠近研究区边界的公园[10]。此外，有研究[11]表明，河流的最佳降温辐射范围为 200 m。考虑到福州闽江可能对周边城市公园冷岛效应影响显著，因此为降低对试验结果影响，剔除临近闽江两岸 300 m 范围内的公园，最终选取 25 个公园进行研究，其中合并相连或间隔较近的公园，最后确定 23 个研究区域(图 1)，最小面积为 1.07 hm^2，最大 121.04 hm^2。



注：1 号为茶亭公园；2 号为斗顶公园；3 号为动物园赤桥公园；4 号为儿童公园；5 号为飞凤山公园；6 号为高盖山生态公园；7 号为鹤林生态公园；8 号为井店湖公园；9 号为金鸡山公园；10 号为金山公园；11 号为涧田湖公园；12 号为黎明湖公园；13 号为南公园；14 号为牛岗山公园；15 号为屏山公园；16 号为琴亭湖公园；17 号为温泉公园；18 号为乌山历史风貌区；19 号为新店古城遗址公园；20 号为西湖公园、左海公园；21 号为冶山春秋园；22 号为于山风景名胜公园；23 号为洋下公园。

图 1 福州市公园位置分布

Fig.1 Distribution of urban park locations in Fuzhou City

2 研究方法

2.1 数据来源和预处理

研究选用 2021 年 9 月 27 日的 Landsat 8 卫星遥感数据进行地表温度反演，空间分辨率 30 m，大气状况良好；选用 2020 年 6 月高分 1 号(GF-1 号)遥感影像数据，空间分辨率 2 m，经辐射定标、大气校正、影像裁剪以及统一坐标等预处理操作，基于谷歌地图人工目视解译将城市用地类型分为水体、绿地以及不透水面 3 类。研究表明公园周围的社会经济发展、人类活动等其他因素将对公园冷岛效应造成影响[12]。因此，将建筑高度以及经济社会发展情况纳入公园周边景观特征指标，以更加全面分析公园周边景观格局对冷岛效应的影响。建筑高度数据源于 Wu 等[13]构建的 10 m 空间分辨率栅格数据，经济社会发展数据采用 Chen[14]等校准后的扩展 NPP-Ⅶ RS 夜间灯光数据。

2.2 地表温度反演与等级划分

常用的地表温度反演方式包括：单窗算法、劈窗算法以及辐射传输方程法。有研究表明辐射传输方程法相较于前者更加接近地表温度实测值[15]。因此本研究采用辐射传输方程法反演地表温度。其具体操作包括：在 ENVI 5.6 平台，将修正后的遥感影像经混合像元分解法计算植被覆盖度，随后计算地表比覆盖率并利用辐射传输方程模型计算黑体辐射亮度值，最后通过 Planck 公式计算获得地表温度[16]。地表温度计算公式为：

$$B_{(t)}=[L_\lambda-L\uparrow-\tau\cdot(1-\varepsilon)L\downarrow]/\tau\cdot\varepsilon \quad (1)$$

式中：$B_{(t)}$ 为黑体辐射亮度；L_λ 为卫星传感器在波段的辐射强度值为大气上行辐射强度值；$L\uparrow$，$L\downarrow$ 分别为大气向上和向下的辐射亮度值；τ 为大气在热红外波段的透过率；ε 为地表比辐射率。

$$T=\frac{K_2}{\ln\left[\frac{K_1}{B(t)}+1\right]} \quad (2)$$

式中：K_1，K_2 为系数；T 为地表温度。

地表温度等级采用标准差法划分，将研究区地表温度划分为低温、中温、次高温、高温和极高温区 5 个等级(表 1)。计算公式为：

$$D_T=X\pm a\cdot s \quad (3)$$

式中：D_T 为不同等级的温度区间；X 为地表平均温度；s 为地表平均温度方差；a 为方差倍数。

表 1 地表温度等级划分

Table 1 Classification of land surface temperature

等 级	地表温度区间
低温区	$D_T<X-0.75$ s
中温区	$X-0.75$ s$<D_T<X-0.25$ s
次高温区	$X-0.25$ s$<D_T<X+0.25$ s
高温区	$X+0.25$ s$<D_T<X+0.75$ s
极高温区	$D_T>X+0.75$ s

2.3 地表温度曲线构建与冷岛效应表征指标计算

张晓东等[17]研究发现，公园的冷岛效应辐射距离主要在 200～300 m，在 100 m 内降温效果最好。因此在 ArcGIS 软件中根据地表温度反演结果以公园边界为起点向外划定 10 个半径为 30 m 的缓冲区，并通过叠置分析计算各缓冲区平均温度。以缓冲区温度(T)为因变量，各缓冲区与公园边界的距离(l)为自变量绘制地表温度曲线，并采用三次多项式对地表温度曲线进行拟合，多项式拟合公式为：

$$T(l)=al^3+bl^2+cl+d \tag{4}$$

式中:l 为缓冲区与公园边界距离;a,b,c,d 为系数。

以往研究表明,三次多项式能够较好地拟合公园周围地表温度和距离的关系,且这种拟合只能在一定范围内,一旦超出范围,温度会呈现稳定或者回落的状态,即达到公园的降温极限[8]。通过对多项式求导,一阶导数为 0 时的点为公园降温转折点,在此之后随着距离的增加地表温度趋于平缓或降低。将转折点与公园边界的距离定为公园最大降温距离(PD),其缓冲区面积为公园降温辐射范围(PCA),辐射范围与公园面积的比值为降温效率(PE)。由于公园冷岛效应是一个非线性过程,仅采用最大影响角度指标不能全面描述公园冷岛效应特征,还需要考虑空间累计角度指标[18]。因此研究额外选取公园累计冷岛效应强度(PI)和累计冷岛效应梯度(PG)指标进行分析(表 2)。

表 2　冷岛效应表征指标定义和含义

Table 2　Characterization indicators, definitions and meanings of cold island effect

指 标	定 义	含 义
公园平均温度(T_{MEAN})	公园内部气温平均值	公园内部平均气温
最大降温距离(PD)	公园边界至第一个转折点的距离	公园降温的最大距离
降温辐射范围(PCA)	公园边界至第一个转折点之间的缓冲区距离	公园降温的辐射范围
降温效率(PE)	公园降温辐射范围与公园面积的比值	公园单位面积产生降温效果的面积
累计冷岛效应强度(PI)	第一个转折点温度与公园平均温度的累计差值占总降温幅度的比值	公园累计降温比
累计冷岛效应梯度(PG)	第一个转折点温度与公园平均温度的累计差值占总降温距离的比值	公园单位距离的累计降温量

部分冷岛效应指标计算公式:

$$\mathrm{PE}=\frac{\mathrm{PCA}}{P_A} \tag{5}$$

$$\mathrm{PI}=\frac{\mathrm{PD}\cdot(T_{\mathrm{PD}}-T_{\mathrm{MEAN}})-\int_O^{\mathrm{PD}}T(l)\,\mathrm{d}l}{\mathrm{PD}\cdot\mathrm{PT}} \tag{6}$$

$$\mathrm{PG}=\frac{\mathrm{PD}\cdot(T_{\mathrm{PD}}-T_{\mathrm{MEAN}})-\int_O^{\mathrm{PD}}T(l)\,\mathrm{d}l}{\mathrm{PD}} \tag{7}$$

式中:P_A 为公园面积;T_{PD}为转折点温度。

2.4　景观格局指标选取与处理

本研究选取的景观格局指标分为规模、形状、公园景观组成、周边景观组成、植被覆盖、建筑以及经济发展水平 7 个要素。各要素具体指标详见表 3。为量化景观格局与冷岛效应的关系,将景观格局指标与冷岛效应表征指标进行相关性分析。由于公园样本少于 50,因此采用 S-W 检验判断其是否符合正态分布,并对检验结果呈现正态分布的指标进行 Pearson 相关性分析,非正态分布指标则进行 Spearman 相关性分析。

2.5　冷岛效应效率阈值(TV_OE)量化

公园冷岛效应是非线性的过程,扩大公园规模以提升冷岛效应的方式不仅经济成本高,且降温效果不显著。在达到阈值前,公园降温效果随着面积增大而提升,但是提升速度逐渐降低。当达到效率阈值时,公园降温效率达到最佳,之后增加公园面积,降温效果提升不再明显。因此确定公园冷岛效应效率阈值能最大限度缓解城市高温的同时减少城市土地资源的浪费,为优化公园布局提供决策支持。以 PG 为因变量,P_A 为自变量构建对数回归函数〔$y=\ln(x)+b$〕,有研究表明小规模的公园其 PG 可能不为正值,因此将公园的效率阈值(TV_OE)定为函数斜率为 1 时的 $P_A(P_1)$与 PG 为 0 时的 $P_A(P_0)$的最大值。即函数斜率为 1 时,若斜率为 1 时,P_1 大于 PG 为 0 时的 P_0,则公园冷岛效应阈值面积为 P_1,反之为 P_0[6]。

表 3　景观格局要素、指标和单位

Table 3　Elements, indicators and units of landscape pattern

要 素	指 标
规 模	P_A 公园面积/hm^2 P_C 公园周长/m
形 状	P_{LSI}形状指数 P_{RPA}周长面积比
公园景观组成	P_{WA}水体面积/hm^2 P_{WP}水体比例/% P_{GA}绿地面积/hm^2 P_{GP}绿地比例/% P_{IA}不透水面面积/hm^2 P_{IP}不透水面比例/%
周边景观组成	B_{WA}水体面积/hm^2 B_{WP}水体比例/% B_{GA}绿地面积/hm^2 B_{GP}绿地比例/% B_{IA}不透水面面积/hm^2 B_{IP}不透水面比例/%
植被覆盖	P_{NDVI}公园归一化植被指数 B_{NDVI}缓冲区归一化植被指数
建 筑	B_{BH}建筑高度/m
经济发展水平	B_{NTL}夜间灯光数据/($W\cdot cm^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot \mu m^{-1}$)

2.6　公园冷岛效应类型分类和识别

从冷岛效应表征指标中选取 T_{MEAN}表征公园冷

岛效应降温能力，PG 表征冷岛效应降温速率，将指标进行归一化处理并绘制散点图。基于图像结果划分公园类型，量化各公园类型的景观格局指标并分析冷岛效应特征和景观配置。

3 结果与分析

3.1 地表温度空间分析

研究区热岛效应显著（图 2）。其中，次高温区域主要集中在仓山区中部，晋安区中部和南部。高温区和极高温区零散分布。低温区位于晋安区东、北部的森林空间以及仓山区南部的闽江。此外，主城区中存在零散公园相较于周围环境温度显著降低，说明城市公园对于缓解城市热岛效应具有关键作用。

公园由于其景观格局不同导致其降温效果也有所不同。其中洋下公园降温距离最远，达到 279 m，鹤林生态公园最近，仅为 27 m。公园降温辐射范围最大的是西湖公园、左海公园，辐射范围达到 105.27 hm^2；最小的是南公园，为 4.34 hm^2。

在 23 个研究区域中，3 号（动物园、赤桥公园）以及 19 号（新店古城遗址公园）没有呈现明显的降温曲线，即随着缓冲区距离增加，地表温度下降。其原因可能是 3 号受湖顶山等周围巨型绿地斑块的影响，使得公园冷岛效应表现效果较差；19 号可能是由于公园内部水体绿地比例小，不透水面比例高，下垫面吸收热量造成公园降温效果差。

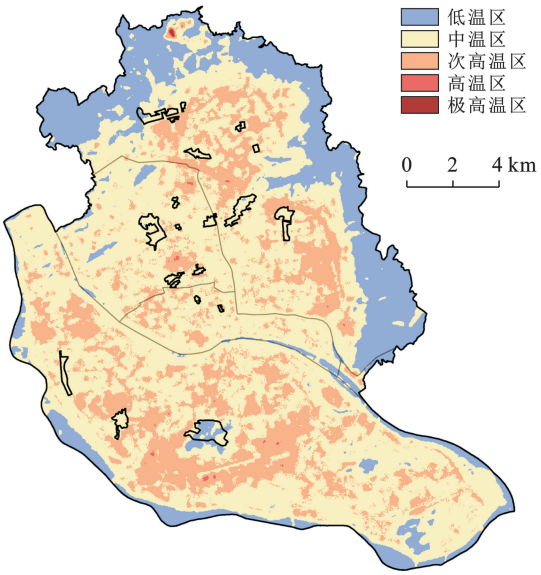


图 2 福州市地表温度反演结果

Fig.2 Land surface temperature inversion results of Fuzhou City

3.2 景观格局与冷岛效应相关性分析

选取冷岛效应显著的 21 个公园，在 SPSS 中对其景观特征指标进行检验。其中 P_{LSI}，B_{GP}，B_{NDVI}，B_{BH}，B_{NTL} 呈现正态分布，其余指标呈现非正态分布。相关性分析结果详见表 4。整体上公园规模、形状要素与冷岛效应相关性较为显著，而公园及其周边景观组成、植被覆盖要素主要和 T_{MEAN}，PCA 呈现相关性，建筑、经济发展水平要素与冷岛指标无显著相关性。

表 4 冷岛效应与景观格局相关性

Table 4 Correlation between cold island effect and landscape pattern

要素	指标	T_{MEAN}/℃	PD/m	PCA/hm^2	PE	PI	PG/℃
规模	P_A/hm^2	−0.613**	0.277	0.761**	−0.555**	0.540*	0.534*
	P_C/m	−0.661**	0.290	0.784**	−0.483*	0.590**	0.583**
形状	P_{LSI}	−0.526*	0.184	0.631**	−0.131	0.543*	0.531*
	P_{RPA}/m^{-1}	0.537*	−0.291	−0.695**	0.540*	−0.480*	−0.478*
公园景观组成	P_{WA}/hm^2	−0.753**	0.346	0.721**	−0.253	0.643**	0.625**
	P_{WP}	−0.513*	0.272	0.329	0.173	0.420	0.408
	P_{GA}/hm^2	−0.474*	0.188	0.662**	−0.595**	0.436*	0.432
	P_{GP}	0.032	0.055	0.096	−0.184	−0.002	0.001
	P_{IA}/hm^2	−0.351	0.107	0.501*	−0.618**	0.236	0.235
	P_{IP}	0.536*	−0.420	−0.567**	0.018	−0.597**	−0.585**
周边景观组成	B_{WA}/hm^2	−0.809**	0.768**	0.779**	0.312	0.657**	0.643**
	B_{WP}	−0.509*	0.574**	0.411	0.516*	0.389	0.375
	B_{GA}/hm^2	−0.826**	0.735**	0.977**	−0.042	0.829**	0.818**
	B_{GP}	−0.341	0.173	0.357	−0.101	0.358	0.349
	B_{IA}/hm^2	−0.722**	0.691**	0.870**	0.078	0.739	0.736
	B_{IP}	0.566**	−0.414	−0.449*	−0.158	−0.432	−0.412
植被覆盖	P_{NDVI}	−0.355	0.258	0.327	−0.052	0.254	0.249
	B_{NDVI}	−0.716**	0.252	0.536*	−0.039	0.531*	0.493*
建筑	B_{BH}/m	−0.181	0.204	−0.053	0.150	−0.013	−0.031
经济发展水平	B_{NTL}/(W·cm^{-2}·sr^{-1}·μm^{-1})	0.366	−0.139	−0.417	0.189	−0.383	−0.377

注：**，* 分别代表在 0.01 和 0.05 水平上具有显著性；各指标释义详见表 2—3。

3.2.1　公园景观格局与冷岛效应相关性　规模要素方面,P_A 和 P_C 均与 T_{MEAN},PE 呈显著负相关,与 PCA,PI 以及 PG 呈显著正相关。形状要素方面,P_{LSI}与 P_{RPA}和冷岛效应指标相关性整体呈现相反趋势。景观组成要素方面,水体指标 P_{WA}与 T_{MEAN}呈极显著负相关,与 PCA,PI,PG 呈极显著正相关;绿地指标 P_{GA}和 PE,T_{MEAN}呈显著负相关,和 PCA,PI 呈显著正相关;不透水面指标 P_{IP}与 PCA,PI 和 PG 呈显著负相关。

3.2.2　周边景观格局与冷岛效应相关性　周边景观组成要素中,水体指标 B_{WA}与 T_{MEAN}呈显著负相关,与 PD,PCA,PI, PG 呈显著正相关;绿地指标 B_{GA}与 T_{MEAN}呈显著负相关,与 PD,PCA,PI 以及 PG 呈显著正相关;不透水面指标中,B_{IA}与 PD,PCA 呈显著正相关,B_{IP}和冷岛指标相关性与 B_{IA}相反。植被覆盖要素中 B_{NDVI}与 T_{MEAN}呈极显著负相关,与 PCA,PI 和 PG 呈显著正相关;表征公园周边建筑高度和区域经济发展水平的 B_{BH},B_{NTL}均与冷岛效应指标无显著相关性关系。

3.3　公园冷岛效应分析

3.3.1　效率阈值量化　基于成本效益角度的边际效用递减规律确定效率阈值[19]。构建 PG 与 P_A 对数曲线拟合方程式:

$$y=0.163\ \ln(x)+0.248 \qquad (R^2=0.212)$$

计算对数回归函数斜率为 1 时 P_A 为 0.16 hm^2,当 PG 为 0 时 P_A 为 0.22 hm^2。因此公园冷岛效应效率阈值为 0.22 hm^2,当 P_A 进一步增大,降温效果提升不再显著。

3.3.2　公园冷岛效应类型分析　根据散点图结果将公园降温效果分为 3 类(图 3),分别为强冷岛效应型、较强冷岛效应型以及弱冷岛效应型公园(表 5)。将景观格局指标平均值归一化处理后结果为:①强冷岛效应型公园(图 4)数量有 3 个,多分布在仓山区。其公园温度最低,降温能力最强,降温速率最高。对比其他景观格局,该类型公园面积、周长最大,形状最为复杂。这与之前的学者研究结果符合,说明城市公园的规模以及形状指数与公园降温效应呈显著正相关[6]。公园以及缓冲区范围内绿地比例和植被覆盖均最高,植被遮荫作用有利于公园迅速降低温度,提高热舒适性。其缓冲区不透水面比例在公园中最低。由于公园体量较大且通常位于城市郊区,其周围的夜间灯光数据较低。②较强冷岛效应型公园(图 5)有 11 个,在 3 类公园中数量最多。公园多分布在鼓楼区和晋安区,公园缓冲区范围内建筑高度以及夜间灯光数据在 3 类公园中最高,说明公园主要分布于人口较密集的商业区等市中心区域。其整体降温能力以及速率略逊于强冷岛效应型公园,但是降温速率显著高于弱冷岛效应型公园。③弱冷岛效应型公园(图 6)有 7 个。公园无论是降温能力还是降温速率在 3 类公园中最弱,主要分布在研究区的中北部区域。其公园面积、周长和形状指数最小,这意味着公园面积较小且边界规则,无法有足够的水体和绿地面积缓解高温。另外,公园以及缓冲区的水体比例低,降温效果较弱。不透水面比例最高,铺地容易继续热量导致温度上升,影响公园的降温效果。

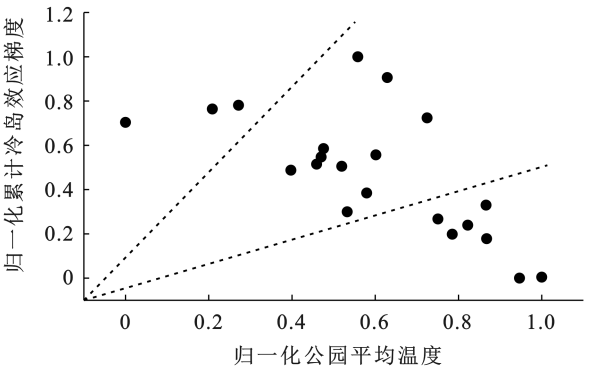


图 3　公园冷岛效应指标散点图及分类

Fig.3　Scatter plot and classification of cold island effect indicators in parks

表 5　公园冷岛效应指标平均值和公园名称

Table 5　Average value of cold island effect indicators and name of parks

公园类型	公园数量	平均温度(P_{MEAN})/℃	累计冷岛效应梯度(PG)/℃
强冷岛效应型	3	32.12	1.03
较强冷岛效应型	11	34.47	0.82
弱冷岛效应型	7	36.45	0.26

注:①强冷岛效应型包括:高盖山生态公园、金鸡山公园、西湖公园、左海公园;②较强冷岛效应型包括:茶亭公园、飞凤山公园、井店湖公园、金山公园、黎明湖公园、牛岗山公园、屏山公园、琴亭湖公园、温泉公园、乌山历史风貌区、洋下公园;③弱冷岛效应型包括:斗顶公园、儿童公园、鹤林生态公园、涧田湖公园、南公园、冶山春秋园、于山风景名胜公园。

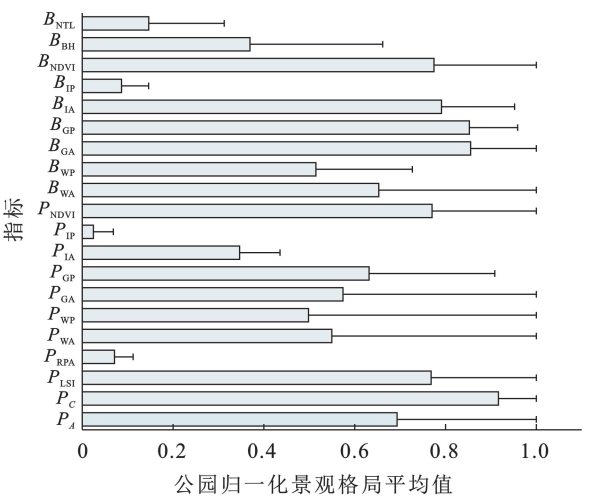


图 4　强冷岛效应型公园归一化景观格局平均值

Fig.4　Average value of normalized landscape pattern of strong cold island effect parks

综上所述，不同的景观配置的公园在降温效果上存在差异。随着城市不断更新发展，用地愈发紧张，建设大规模的公园绿地以缓解城市高温的可行性受到限制。因此，如何权衡公园冷岛效应和城市用地，最大限度降低城市温度，又节约土地资源显得格外重要。

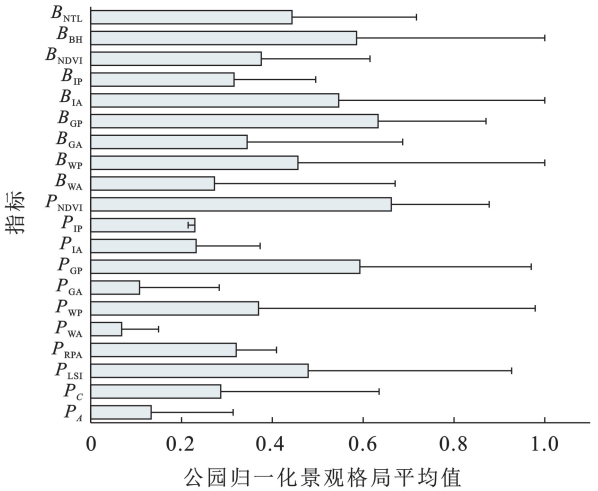


图 5 较强冷岛效应型公园归一化景观格局平均值

Fig.5 Average value of normalized landscape pattern of sub-strong cold island effect park

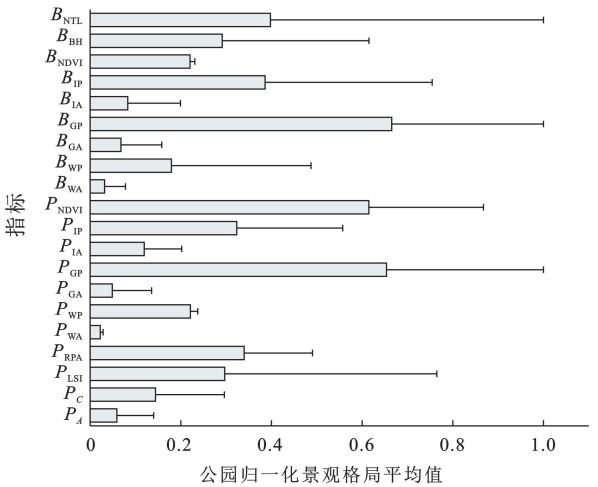


图 6 弱冷岛效应型公园归一化景观格局平均值

Fig.6 Average value of normalized landscape pattern of low cold island effect parks

4 讨论

4.1 福州市热岛效应显著

福州热岛效应严重与城市自然地理、城市发展扩张等诸多复杂因素密不可分。福州市为亚热带季风气候，城市夏季酷热潮湿。地貌属典型的河口盆地，四周群山包围，山地、丘陵占全区土地总面积的72.68%，其中山地占 32.41%，丘陵占 40.27%。城市虽然沿海分布，但是起伏的地形导致海风仅从城市东南角涌入，不利于城中空气流动。而且有研究[20]指出，福州受到自西向东的陆风以及东南角海风的双重影响，在主城区处交汇并形成障碍区，造成风速减慢，进一步阻碍城市中心区温度的降低。此外随着城市化发展，城市结构和不透水面会吸收白天的太阳辐射并在夜间缓慢释放，造成城市夜间降温较慢。再加之近年来城市人口激增，城市居民生产生活排放大量热量最终造成福州温度居高不下。

4.2 公园冷岛效应主要影响因素

①在公园规模要素。P_A 和 P_C 对公园的冷岛效应指标相关性基本一致，公园周长和面积越大，公园温度越低，降温范围越大，公园累计降温比例以及单位距离降温量越高，这与 Peng 等和朱云凤等[18,21]的结果一致。②形状要素方面。有研究[10]表明公园形状越复杂，越能加快公园与周围环境热量交换，促进公园降温，调控区域热环境的作用。说明公园形状越复杂，公园降温幅度越大，其降温能力和速率越高。这也与本研究结果相同。但也有学者[22]研究发现，公园边界越平滑，其内外温差越大，降温能力更好。Jaganmohan[23]研究发现，不同规模绿地的形状复杂程度对地表温度的影响也不同，因此研究结果存在差异的原因可能是受到公园规模的影响，即不同规模的公园其形状与冷岛效应的相关关系也不同。③景观组成要素方面。有研究[24]表明水体和绿地在降温效果上具有一定的协同效应，增加二者面积能够有效降低公园温度，并增加公园的降温范围，提高公园降温能力和速率。这与本研究结果相同，即公园及其缓冲区水体和绿地面积均对降低温度有正向影响，且缓冲区范围中的水体、绿地面积与冷岛效应指标的相关性要强于公园内水体绿地面积。此外，从结果还可以看出，随着面积增加水体降温效率要优于绿地，这也与前人[25]研究结论相同。公园不透水面与冷岛效应指标相关性结果表明，增加公园不透水面比例会阻碍公园冷岛效应。由于不透水面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产生明显的增温现象[26]。④植被覆盖要素方面。P_{NDVI} 与冷岛效应指标相关性较弱，这与 Qiu 等[27]结果相同，但也有部分学者得出相反的结论[28]。崔凤娇[29]研究指出 NDVI 对观测平台有较大依赖性，而且植被受到季节影响较大，容易造成结果存在出入。测量方式受到云层、大气条件影响，且光照条件也会影响结果准确性。可见其与降温效果的相关性尚存在争议，还需要进一步探究。⑤在建筑高度以及经济发展水平方面。有学者[25]认为较高的建

筑高度对公园冷岛效应造成负面影响。由于高大的建筑容易遮挡城市通风廊道，削弱公园周边空气流动，造成高温长时间滞留，从而减弱公园降温效果。而本研究结果显示 B_{BH} 与 B_{NTL} 均与冷岛效应指标无显著相关关系。这可能是由于数据精度过低导致，建筑高度栅格数据分辨率为 10 m，夜间灯光数据分辨率 500 m。由于城市公园规模存在一定差异，数据精度严重影响了小面积的公园的计算，造成结果与实际情况存在差异。

综上所述，公园 P_A，P_C，P_{LSI}，P_{RPA}，P_{WA}，P_{GA}，P_{IP} 以及 B_{WA}，B_{GA} 是公园冷岛效应的主要影响因素，对公园冷岛效应具有重要的作用该结果与前人的研究结果基本相同。

4.3　公园效率阈值差异性

通过求导对数回归函数得出福州城市公园冷岛效应效率阈值为 0.22 hm^2，这与刘艳芬等[6]福州公园冷岛效应阈值为 0.768～50 hm^2 的结论差异较大。造成差异的原因可能是所选公园样本受外界因素的影响，有研究[11]表明河流最佳降温范围为 200 m，水体斑块最佳效率阈值为 0.70 hm^2[12]。而刘艳芬[16]在选取公园时采用 Liu[1]的筛选规则，仅筛除与大型水体相连的公园。部分与闽江临近而不相连的公园在计算公园效率阈值时，降温效果易受到闽江的影响造成结果不准确。而本研究在筛选公园时，排除福州闽江降温辐射范围内的公园，能够避免周围大面积水体对公园的干扰，提升了研究结果的准确性。另外，效率阈值虽然能从“成本—效益”角度分析公园最佳阈值，即权衡公园面积与公园的降温效果。但是其通常忽略底线阈值以及饱和阈值的分析，对于一些生态环境紧张或充裕的区域，采用效率阈值评定对降温效果不如底线阈值或饱和阈值更具有实际价值[30]。因此接下来的研究应该侧重于公园的生态水平，针对不同环境的公园提出对应最佳阈值。

4.4　不同公园类型的优化策略

诸多研究[6]表明公园降温效果不会随着规模大小以及景观要素面积增加而持续提升，而是呈现逐渐平缓最终趋于稳定的趋势。当今城市用地紧张，采用无端扩张公园的方式缓解高温压力的策略并不实际。因此应该针对不同功能和类型的公园进行合理布局。本研究将福州城市公园划分为强冷岛效应型、较强冷岛效应型以及弱冷岛效应型公园 3 类。城市不同区域因发展定位与方向不同，对于城市公园的需求也有所不同。在未来规划布局以及优化城市公园时应该充分考虑其功能性，在提供降温作用的同时，尽可能创造更多经济、社会以及文化层面价值。因此本研究以绿色可持续为导向，从设计和规划层面分别对 3 类公园分别讨论。①强冷岛效应型公园有着最强的降温能力和范围，但降温效率要远低于另外两类公园。在景观格局方面，这类公园以及缓冲区内有着大量的绿地和水体，植被覆盖茂密，通过水体的高比容和低热传导性以及植被的遮荫作用使得公园有着最为显著的降温效果。因此在设计层面该类型公园要合理开发，最大限度的保持公园自然基底，减少对非硬质地面的破坏。在规划层面，由于其规模庞大，并不适合布置于市中心、住宅附近等人流密集和用地紧张的区域，应布置于郊区等人烟较少，有相对充足发展空间的城乡结合处，在提供良好的降温效果的同时，还具有保持生物多样性、固碳释氧、防洪抗涝等生态功能[16]。②较强冷岛效应型公园规模上明显小于强冷岛效应型公园，但是其依然有着较好降温能力和较高降温速率，在 3 类公园中性价比最高。原因是公园水体、绿地比例较高，能够有效缓解高温压力。在设计层面，要控制不透水面比例，提高水体比例，以进一步加快和提高公园的降温速率和能力。在规划中可以作为市区公园、综合性公园布置于城市中，最大限度缓解温度、创造微气候的同时，提供科普教育、文化宣传等文化服务功能以满足居民的日常生活需求。③弱冷岛效应型公园，无论是降温能力还是降温速率均低于前两类公园。这类公园规模较小且其中不透水面比例较高，削弱了其有效降温的能力。因此在设计层面，公园应控制或减少不透水面面积比例，并提高公园水体面积，通过增加非硬质用地促进热量在水体与空气间传输以降低周围环境的温度。在规划层面，这类公园虽然在降温能力和降温速率低于前两类公园，但是其规模小巧，可以广泛布置于居住区、办公区等用地局促的中心城区。通过增加公园边界复杂程度，促进公园降温效果，在提供一定降温作用的同时，为居民提供出行锻炼、游憩放松等的活动场所。

5　结 论

（1）福州市主城区热岛效应明显。城市公园呈现显著的冷岛效应。

（2）公园规模要素、形状要素和公园及其周边景观组成是冷岛效应主要影响因素，与冷岛效应相关性显著；而植被覆盖要素与冷岛效应相关性较弱；建筑和经济发展要素与冷岛效应无明显相关性。

（3）通过构建公园面积与累计冷岛效应梯度对数曲线，得出公园最佳面积阈值为 0.22 hm^2。

（4）基于公园降温效果将公园划分为强冷岛效应型、较强冷岛效应型以及弱冷岛效应型 3 类。强冷

岛效应型适用于郊区公园,较强冷岛效应型适用于市区、综合性公园,弱冷岛效应型适用布置于市中心等人流密集区域。

参考文献(References)

[1] Liu Xiaoping, Huang Yinghuai, Xu Xiaocong, et al. High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015 [J]. Nature Sustainability, 2020,3:64-570.

[2] Wang Jun, Chen Yang, Liao Weilin, et al. Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities [J]. Nature Climate Change, 2021,11:1084-1089.

[3] 王美雅,徐涵秋.中外超大城市热岛效应变化对比研究[J].自然资源遥感,2021,33(4):200-208.
Wang Meiya, Xu Hanqiu. A comparative study on the changes in heat island effect in Chinese and foreign megacities [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021,33(4):200-208.

[4] Gunawardena K R, Wells M J, Kershaw T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity [J]. Science of the Total Environment, 2017,584:1040-1055.

[5] Moyer A N, Hawkins T W. River effects on the heat island of a small urban area [J]. Urban Climate, 2017,21:262-277.

[6] 刘艳芬,黄茹鲜,艾婧文,等.福州市城市公园的冷岛效应及其影响因素[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(3):295-303.
Liu Yanfen, Huang Ruxian, Ai Jingwen, et al. The cold island effect and its influence on urban parks in Fuzhou City, China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024,48(3):295-303.

[7] 陈力行,邓雅丽,张樱子,等.成都市城市公园景观特征的"冷岛效应"研究[J].中国园林,2023,39(5):132-138.
Chen Lixing, Deng Yali, Zhang Yingzi, et al. Study on cold island effect of landscape characteristics of urban parks in Chengdu [J]. Chinese Landscape Architecture, 2023,39(5):132-138.

[8] 徐梦耀,国巧真,杨光,等.城市公园降温指标与地表热场耦合关系[J].中国环境监测,2023,39(3):120-128.
Xu Mengyao, Guo Qiaozhen, Yang Guang, et al. Study on the coupling relationship between urban park cooling index and surface thermal field [J]. Environmental Monitoring in China, 2023,39(3):120-128.

[9] Chen Mo, Jia Wenxiao, Yan Liang, et al. Quantification and mapping cooling effect and its accessibility of urban parks in an extreme heat event in a megacity [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,334:130252.

[10] Yang Gaoyuan, Yu Zhaowu, Jørgensen G, et al. How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? A seasonal perspective [J]. Sustainable Cities and Society, 2020,53:101932.

[11] 杨清源,邓睿,汤伟宏,等.城市空间水体热环境效应研究:以重庆市主城七区为例[J].西安理工大学学报,2024,40(1):15-26.
Yang Qingyuan, Deng Rui, Tang Weihong, et al. Research on thermal environment effect of water bodies in urban space: A case study of seven districts of Chongqing [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2024,40(1):15-26.

[12] Peng Jian, Liu Qianyuan, Xu Zihan, et al. How to effectively mitigate urban heat island effect? A perspective of waterbody patch size threshold [J]. Landscape and Urban Planning, 2020,202:103873.

[13] Wu Wanben, Ma Jun, Banzhaf E, et al. A first Chinese building height estimate at 10 m resolution (CNBH-10 m) using multi-source earth observations and machine learning [J]. Remote Sensing of Environment, 2023,291:113578.

[14] Chen Zuoqi, Yu Bailang, Yang Chengshu, et al. An extended time series (2000—2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. Earth System Science Data, 2021,13(3):889-906.

[15] 阚增辉,刘朝顺,李志军.基于Landsat-8热红外数据的太湖地区地表温度反演与热岛效应分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2016(4):129-138.
Kan Zenghui, Liu Chaoshun, Li Zhijun. Retrieval of land surface temperature based on Landsat-8 thermal infrared data and heat island effect analysis over the Taihu Lake region [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2016(4):129-138.

[16] 赵海月,胡淼,朱建宁,等.高密度中心城区蓝绿空间冷岛效应及其影响因素:以北京五环路以内地区为例[J].生态学报,2023,43(12):4904-4919.
Zhao Haiyue, Hu Miao, Zhu Jianning, et al. Blue-green space cooling effect and its influencing factors in metropolitan area: A case study on the area within the Fifth Ring Road in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(12):4904-4919.

[17] 张晓东,赵银鑫,马风华,等.基于遥感数据的银川市城市公园对城市热环境降温效应分析[J].水土保持通报,2021,41(5):338-347.
Zhang Xiaodong, Zhao Yinxin, Ma Fenghua, et al. Analysis on cooling effect of urban parks on urban thermal environment in Yinchuan City based on remote sensing

[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(5):338-347.

[18] Peng Jian, Dan Yuzhuo, Qiao Ruilin, et al. How to quantify the cooling effect of urban parks? Linking maximum and accumulation perspectives [J]. Remote Sensing of Environment, 2021,252:112135.

[19] Yu Zhaowu, Yang Gaoyuan, Zuo Shudi, et al. Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020,49:126630.

[20] Zheng Zefeng, Lin Xinlu, Chen Li, et al. Effects of urbanization and topography on thermal comfort during a heat wave event: A case study of Fuzhou, China [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,102:105233.

[21] 朱云凤,王红,覃书鸿,等.基于多源数据的南京市公园降温效应研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2024,48(3):285-294.
Zhu Yunfeng, Wang Hong, Qin Shuhong, et al. Research on the cooling effect of parks in Nanjing based on multi-source data [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2024,48(3):285-294.

[22] 赵芮,申鑫杰,田国行,等.郑州市公园绿地景观特征对公园冷岛效应的影响[J].生态学报,2020,40(9):2886-2894.
Zhao RuiShen Xinjie, Tian Guohang, et al. The influence of landscape characteristics of a park green space on the park cool island effect in Zhengzhou City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(9):2886-2894.

[23] Jaganmohan M, Knapp S, Buchmann C M, et al. The bigger, the better? the influence of urban green space design on cooling effects for residential areas [J]. Journal of environmental quality, 2016,45(1):134-145.

[24] 连欣欣,刘兴诏,李倩,等.城市“蓝绿空间”的降温效应研究进展[J].南方林业科学,2021,49(2):68-72.
Lian Xinxin, Liu Xingzhao, Li Qian, et al. Research advances on the cooling effect of “urban blue-green space” [J]. South China Forestry Science, 2021,49(2):68-72.

[25] 杨朝斌,张亭,胡长涛,等.蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素:以苏州市为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):677-688.
Yang Chaobin, Zhang Ting, Hu Changtao, et al. Spatial-temporal characteristics of the cooling island for blue-green space and its driving factors in Suzhou, China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(3):677-688.

[26] 花利忠,孙凤琴,陈娇娜,等.基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应:以厦门为例[J].生态学报,2020,40(22):8147-8157.
Hua Lizhong, Sun Fengqin, Chen Jiaona, et al. Quantifying the cool-island effects of urban parks using Landsat-8 imagery in a coastal city, Xiamen, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(22):8147-8157.

[27] Qiu Kuanbiao, Jia Baoquan. The roles of landscape both inside the park and the surroundings in park cooling effect [J]. Sustainable Cities and Society, 2020,52:101864.

[28] Bartesaghi-Koc C, Osmond P, Peters A. Quantifying the seasonal cooling capacity of ‘green infrastructure types’ (GITs): An approach to assess and mitigate surface urban heat island in Sydney, Australia [J]. Landscape and Urban Planning, 2020,203:103893.

[29] 崔凤娇,邵锋,齐锋,等.植被对城市热岛效应影响的研究进展[J].浙江农林大学学报,2020,37(1):171-181.
Cui Fengjiao, Shao Feng, Qi Feng, et al. Research advances in the influence of vegetation on urban heat island effect [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2020,37(1):171-181.

[30] 董建权,彭建.绿地空间降温效应综述:景观调控视角[J].生态学报,2024,44(4):1336-1346.
Dong Jianquan, Peng Jian. Review on cooling effect of greenspace: Perspective of landscape regulation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(4):1336-1346.