

DOI: 10.20103/j.stxb.202408252013

谢慧黎, 刘晟龙, 戴洪霞, 尤美子, 肖逸, 江伊婧, 刘兴诏. 供需匹配视角下的城市绿地降温效益评估——以福州市主城区为例. 生态学报, 2025, 45(23): - .

Xie H L, Liu S L, Dai H X, You M Z, Xiao Y, Jiang Y J, Liu X Z. Assessment of urban green space cooling benefits from a supply-demand matching perspective: a case study of Fuzhou city's main urban area. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(23): - .

供需匹配视角下的城市绿地降温效益评估

——以福州市主城区为例

谢慧黎^{1,2}, 刘晟龙¹, 戴洪霞¹, 尤美子^{3,4}, 肖逸⁵, 江伊婧¹, 刘兴诏^{1,*}

1 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002

2 科廷大学设计与建筑环境学院, 珀斯 6102

3 上海纽约大学城市设计与科学实验室, 上海 200120

4 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200120

5 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095

摘要: 快速城市化和城市热岛效加剧了城市居民对降温服务的需求。城市绿地(UGS)作为重要的自然基础设施,在缓解热环境、降低热暴露方面发挥着关键作用。然而,高密度城市空间资源紧张,如何在有限的UGS资源下实现降温服务的高效供给与公平分配,亟需开展系统的供需匹配研究。构建了UGS降温服务供需匹配评价框架,并以福州市主城区为例,量化评估UGS降温服务供给效益、居民需求以及其供需匹配关系,识别不同圈层之间的梯度差异,并结合城市现状提出差异化的UGS优化策略。结果表明:1)福州市主城区UGS平均降温距离为226.03m,平均降温强度为0.43℃;2)整体呈现供不应求状态,降温服务赤字达 2.77×10^7 人·℃;3)供需匹配关系呈现出从内环“高需-低供”向外环“高供-低需”的城乡梯度特征。研究为城市热环境治理与UGS资源优化配置提供了方法支持与决策参考。

关键词: 城市绿地;供需匹配;降温效益;城乡梯度;福州市主城区

Assessment of urban green space cooling benefits from a supply-demand matching perspective: a case study of Fuzhou city's main urban area

XIE Huili^{1,2}, LIU Shenglong¹, DAI Hongxia¹, YOU Meizi^{3,4}, XIAO Yi⁵, JIANG Yijing¹, LIU Xingzhao^{1,*}

1 College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 School of Design and the Built Environment, Curtin University, Perth 6102, Australia

3 Shanghai Key Laboratory of Urban Design and Urban Science, Shanghai New York University, Shanghai 200120, China

4 School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200120, China

5 College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

Abstract: Rapid urbanization and the intensification of the urban heat island effect have significantly increased the demand for effective cooling services among urban residents. As a vital component of nature-based infrastructure, urban green spaces (UGS) play a key role in mitigating urban heat and reducing thermal exposure. While existing research has extensively examined the biophysical cooling effects of UGS, many studies have overlooked their function as a spatially distributed public service infrastructure that should be aligned with residents' actual thermal needs. In high-density cities with limited green space resources, assessing the spatial equity and efficiency of UGS cooling services requires a supply-demand

基金项目: 上海纽约大学上海市城市设计与城市科学重点实验室开放课题(2023JLi_LOUD);福建农林大学科技创新专项基金(KFB23171)

收稿日期: 2024-08-25; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xzliu@fafu.edu.cn

perspective. To address this gap, this study proposes a supply-demand evaluation framework that integrates UGS cooling capacity, the cumulative effects of multiple UGS patches, and population-based demand. The main urban area of Fuzhou City, a subtropical coastal city in China that is increasingly affected by extreme heat, is selected as the case study. Two indices—Cooling Supply Index (CSI) and Cooling Demand Index (CDI)—are used to quantify the supply of UGS cooling benefits and thermal demand, and to evaluate their spatial matching characteristics. Multi-temporal high-resolution remote sensing data, area of interest datasets, WorldPop gridded population, and census data are integrated to derive spatial patterns at a 100 m × 100 m grid scale. The study also identifies urban-rural gradients across inner-, central-, and outer-ring districts to inform targeted planning. The results showed that: (1) UGS cooling distances in Fuzhou range from 11 to 757 m, with 92% of green spaces exhibiting effective cooling within 30—430 m, and an average cooling distance of 226.03 m. Cooling intensity ranges from 0.02 to 2.83 °C, with a mean of 0.43 °C. (2) Spatial patterns reveal that high cooling supply areas are concentrated in the central and outer-ring districts. In contrast, thermal demand is more widespread and intensifies toward the inner city, forming a “periphery-to-core” gradient. The overall supply remains insufficient, resulting in a total deficit of 2.77×10^7 person · °C. (3) Supply-demand mismatches follow a clear urban-rural gradient, where inner-ring areas experience high demand but insufficient supply, and outer-ring areas possess abundant cooling resources but low demand. Central-ring districts present the most severe mismatches, with substantial areas of both service shortage and underutilized supply. Based on the identified mismatch patterns and the Fuzhou Green Space System Plan (2021—2035), the study proposes differentiated strategies to enhance the effectiveness and equity of UGS cooling service provision. The findings offer methodological support and practical guidance for improving urban heat resilience and optimizing the allocation of green infrastructure resources.

Key Words: urban green space; supply-demand mapping; cooling benefit; urban-rural gradient; Fuzhou City's main urban area

在全球变暖和快速城市化的双重压力下,极端高温事件日益频发,城市气温不断突破历史峰值,严重威胁居民健康与日常生活^[1]。城市热岛效应作为气候变化在城市环境中的直接表现,已成为制约城市可持续发展的关键挑战。城市绿地(UGS)因其显著的冷岛效应被广泛认为是缓解城市热环境、提升居民福祉的重要手段^[2-3]。除降温作用外,UGS 还提供了空气净化、水源涵养、土壤保持等多种生态系统服务^[4],是基于自然的解决方案中的核心组成部分^[5]。然而,传统城市扩张往往以牺牲 UGS 为代价,不仅破坏了城市生态系统,也进一步加剧了城市热岛效应^[3],导致城市中心与边缘区域的热环境呈现出显著差异^[6],应结合区域特征采取因地制宜的调控措施。福州市作为典型的亚热带沿海城市,多次被评为火炉城市之首,城市热岛现象日趋严重。2023 年 12 月,《福建省适应气候变化行动方案》将福州市确定为气候适应型城市试点,明确提出强化 UGS 在应对高温与城市内涝中的作用。在此背景下,如何将 UGS 建设与优化纳入城市气候治理体系,并通过科学评估提升其服务效率,成为城市规划与气候适应研究的重要议题。

已有研究多基于遥感影像反演城市地表温度(LST)^[3],评估 UGS 的降温范围、强度、面积、梯度、效率阈值等降温效应,及其与景观结构之间的关系^[2,7-8],为理解 UGS 降温机制提供了理论基础。然而,这类研究多聚焦于“供给侧”,强调 UGS 自身降温能力,忽略了城市居民对降温服务的实际需求,亦未能从供需匹配层面揭示 UGS 降温服务的空间公平性。在密度城市中,亟需在有限的 UGS 资源约束下实现对居民降温需求的高效响应,因而有必要开展供需匹配评估,以提升资源配置效率并增强社会公平性。部分研究从服务可达性角度量化 UGS 为城市居民提供的降温效益^[9]。如:Zuo 等评估了 UGS 周围 15min 步行区域内居民以 UGS 代替空调降温意愿,并据此换算节能效益^[10];Shi 等分别使用 10min 和 30min 步行可达范围测算了服务人口数量^[11];Xiao 等则构建了基于降温能力-可达性-城市发展的综合降温服务指数^[9]。尽管这些研究在 UGS 降温服务供需进行了有益探索,但仍存在三项不足:其一,不同 UGS 降温强度与作用范围存在显著差异,难以一概

而论;其二,忽略了多个 UGS 服务叠加效应;其三,未充分考虑人口对降温服务的实际需求强度。这些因素将影响评估结果的准确性与适用性。此外,城市不同圈层在开发强度、人口密度、基础设施与绿地分布方面存在显著差异,这种空间结构性特征决定了 UGS 服务供给与需求之间可能存在规律性的空间错配现象^[12-13]。尤其在城市快速扩展背景下,中心城区 UGS 紧缺与外围 UGS 冗余并存的状态愈发突出,如何识别并响应这种城乡梯度差异,是实现资源公平配置与城市气候韧性提升的关键环节。

基于此,本研究以福州市主城区为例,构建了 UGS 降温服务供给指数(CSI)和需求指数(CDI),并通过综合考量各 UGS 服务强度和范围测算 UGS 实际供给效益,以及现阶段居民实际降温需求,探寻 UGS 降温服务效益以及其供需匹配格局。此外,将研究区划分为内环区、中环区和外环区,系统分析 UGS 服务供给、需求与供需匹配效率的城乡梯度差异。最后,以福州市规划政策为响应基础,提出针对性的 UGS 优化策略。本研究围绕以下核心问题展开:(1)如何量化 UGS 的降温服务的供需关系?(2)城市内部不同圈层在 UGS 服务供需关系上是否存在结构性空间分异?(3)如何基于评估结果结合城市空间现状提出差异化的 UGS 优化策略?本研究构建了“服务供给-需求响应-空间匹配”的评估框架,旨在为城市热环境治理中的资源优化配置、居民福祉提升以及区域间的资源公平分配与协调发展提供科学参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

福州市是福建省省会,总面积 11968km²,属亚热带季风气候,夏季极端高温天气频发。建成区绿化覆盖率 43.54%,人均公园绿地面积 14.98m²,生态基础良好。截至 2022 年底,福州市常住人口总数为 844.8 万人,地区生产总值 12308.23 亿元,城镇化率 73.27%。本研究选取福州市主城区作为研究区域,该区域人口密度最高,极端高温天气对居民影响更为显著。核心区域人口密度高达 800 人/km²,而部分发展不完全的区域仅为 30 人/km²^[14]。2022 年研究区经历了 50—75 天日最高气温超过 35℃ 的高温天气,其中 8 月 31 日温度达到 41.4℃,突破建站以来的历史最高气温纪录^[15]。此外,为避免边缘效应^[16],并确保位于研究区边缘附近的 UGS 也能获得完整的地表温度(LST)数据支持,以准确量化其降温效益,本研究在研究区外扩展 600 m 缓冲区纳入研究范围(图 1)。根据福州市空间结构特点,本研究以一环线和二环线为界,将研究区分为内环区、中环区和外环区。内环区历史悠久,人口和建筑密度大,土地利用效率高,经济活动集中,是福州最早开发的核心区域。中环区经历了较大规模的城市扩展和改造,涵盖农业和工业用地,人口和建筑密度较高,属城乡过渡带。外环区发展较晚,以城乡结合部为主,人口和建筑密度相对较低,具有较大的发展潜力。

1.2 数据获取与预处理

1.2.1 地表温度

选取研究区无云、且当日最高气温高于 35℃ 的遥感影像作为基础数据,为减少数据误差对研究结果造成的影响,采用辐射传输方程法对 LST 反演并取三幅遥感影像的平均值^[9](图 1),数据获取自地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)的 2021 年 7 月 22 日、2021 年 9 月 27 日和 2022 年 7 月 12 日 Landsat 8 遥感影像,空间分辨率 30m。此外,由于本研究关注的是城市热环境对人的影响,而 LST 通常高于气象站测得的气温,特别是在白天的城市建成区。因此,本研究将 LST 与 2022 年福州市气象站夏季观测的平均气温(<http://fj.cma.gov.cn/fzsqxj/>)进行线性回归校正,以更接近实际气温。

1.2.2 绿地数据

以百度地图 AOI 数据为基底(<https://map.baidu.com/>),参考《福州市城市绿地系统规划(2021—2035)》,对照高精度遥感影像(<https://www.gditu.net/>)进行位置修正与增补,建立城市绿地矢量数据库。根据以往 UGS 冷岛效应研究中选取的面积范围、计算便利性及遥感影像分辨率,将 0.15km²作为 UGS 最小面积阈值,合并空间上相连接或距离 30m 范围内的 UGS^[17],并剔除面积远大于其他绿地的巨型斑块绿地^[11]。最终,共选取 644 个城市绿地作为本次研究对象。

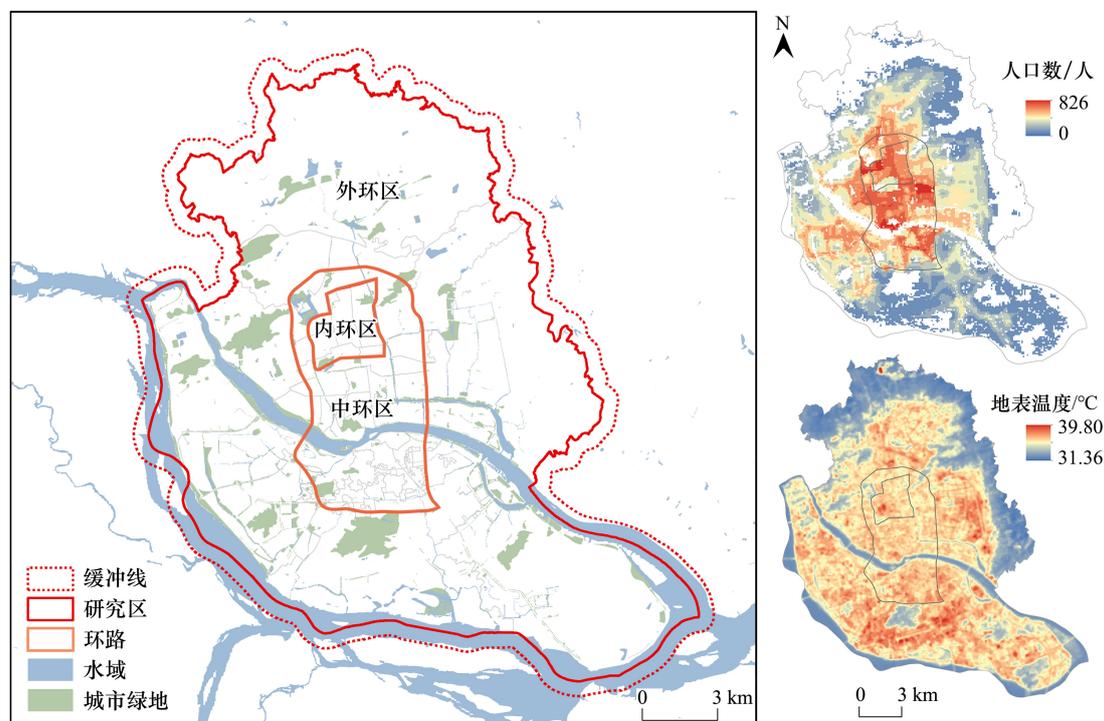


图1 福州市主城区概况

Fig.1 Spatial overview of Fuzhou City's main urban area

1.2.3 人口数据

城市居民作为绿地服务的受益方,人口数量的空间分布数据精度决定了结果的准确性。因此,本研究以网格作为人口计算单元,基于 Worldpop 平台 (<https://hub.worldpop.org/>) 获取的 2020 年 100m 分辨率的人口分布数据,剔除位于 UGS 范围内的人口,并以街道为修正单元,结合全国第七次人口普查数据 (<https://tjj.fuzhou.gov.cn/>) 对居民人口数据进行校正。

1.2.4 其他数据

行政边界获取自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>),结合 Google 地图高精度影像 (<https://www.google.com/maps>) 及《福州市城市综合交通规划(2020—2035)》(<https://tjj.fuzhou.gov.cn/>) 获取一环和二环信息。本研究所涉及的数据均统一为 WGS_1984_UTM_zone_50N 投影坐标系。

2 研究方法

2.1 城市绿地降温服务效应

本研究采用降温距离(CD)和降温强度(CI)表征城市绿地服务能力。考虑到 LST 数据空间分辨率为 30m,且已有研究表明 UGS 最大降温效应通常在 500m 范围内^[8,11,18],因此,从每个 UGS 边界向外构建 20 个宽度为 30m 的缓冲区,提取各缓冲区内的平均 LST 值。为更准确反映温度随距离变化的非线性趋势,采用三次多项式将缓冲距离与平均 LST 进行拟合,该方法已被证明能更有效地刻画二者之间的关系^[18-19]。为了减少相邻 UGS 对降温效果的潜在影响,平均 LST 值计算过程中剔除了相邻 UGS^[9]。通常情况下,降温效果会随着缓冲距离的增加而降低,直至出现转折点^[8,14]。该转折点对应的缓冲距离即为 CD,其对应的 LST 值与 UGS 内部 LST 均值间的差值为 CI(图 2)^[20]。

$$T(r) = ar^3 + br^2 + cr + d \quad (1)$$

式中, r 为 UGS 边界向外的缓冲距离, $T(r)$ 为距离 UGS 边界 r 处的平均 LST, a 、 b 、 c 和 d 分别为拟合曲线的三

次项系数和常数项。

2.2 降温服务供给指数与需求指数

基于 UGS 降温服务效应构建降温服务供给指数(CSI)和降温服务需求指数(CDI)。首先将 CD 作为降温服务阈值,搜索各绿地降温服务阈值范围内的受益人群,并通过人绿间距离及 UGS 降温服务效应估算该空间位置的 UGS 降温效益总量。由于同一位置人群可能同时受到多个 UGS 的降温服务,因此,该位置的降温服务供给总效益为其所受所有 UGS 服务的叠加(图 2)。研究表明,人体的舒适温度区间在 24—28℃ 之间^[21],夏季人们在 26℃ 或更高的空调房中感觉舒适^[22],因此本研究将高于 26℃ 的区域定义为具有降温服务需求的区域。CSI 和 CDI 综合考虑了实际温度与人口数量,单位为人·℃,用于衡量热环境改善的服务或需求总量,是一种融合人口规模与温度强度的综合指标。计算公式如下:

$$CSI_i = \sum_j \frac{d_{ij}}{CD_j} \times CI_j \times POP_i \quad (2)$$

$$CDI_i = (LST_i - 26) \times POP_i \quad (3)$$

式中, CSI_i 和 CDI_i 分别为网格 i 的降温服务供给指数与需求指数, d_{ij} 为网格 i 到绿地 j 边界的距离, CD_j 和 CI_j 为绿地 j 的降温距离与降温强度, POP_i 和 LST_i 分别为网格 i 修正后的人口数量与地表温度。

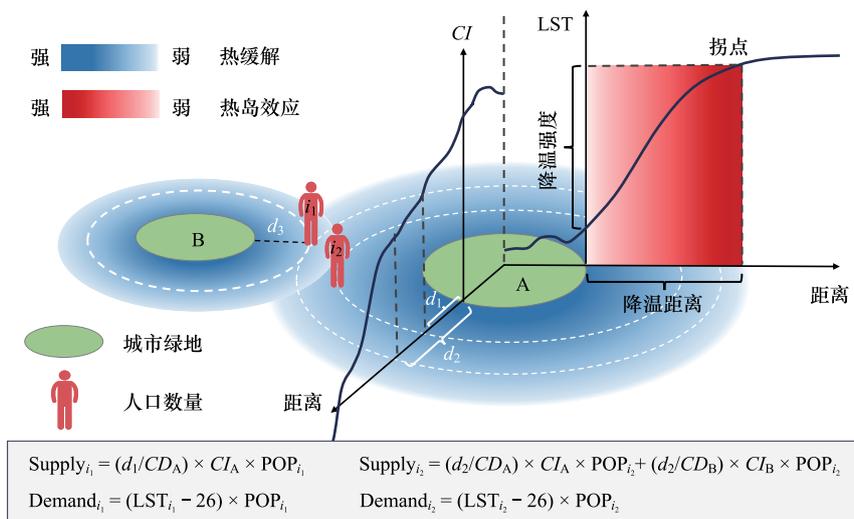


图 2 城市绿地降温服务供给与需求计算示意图

Fig.2 Calculation diagram of the supply and demand of urban green space cooling service

CI: 降温强度; CI_A : 绿地 A 的降温强度; CI_B : 绿地 B 的降温强度; CD: 降温距离; CD_A : 绿地 A 的降温距离; CD_B : 绿地 B 的降温距离; POP: 人口数量; POP_{i_1} : i_1 所在位置的人口数量; POP_{i_2} : i_2 所在位置的人口数量; LST: 地表温度; LST_{i_1} : i_1 位置的地表温度; LST_{i_2} : i_2 位置的地表温度

2.3 供需匹配

采用供需间的差值以及供需匹配对应关系评价 UGS 降温服务情况。公式如下:

$$A_i = CSI_i - CDI_i \quad (4)$$

式中, A_i 代表网格 i 的降温服务的供给量与人类需求量之间的差异程度。差值大于 0 表示需求大于供给, 该区域降温服务充足, 且具有一定的缓冲能力应对未来需求的潜在增加以及环境变化带来的影响; 小于 0 则该地区 UGS 提供的降温服务供不应求, 居民感到的热岛效应更为显著。

供给为 0 的区域划为服务空白区。本研究仅探讨有人口居住的区域, 且研究区全域地表温度均高于 26℃, 因此不存在需求为 0 的情况。将供给与需求结果标准化处理至 -1 到 1 之间, 供或需大于 0 的区域为高值区, 小于 0 则为低值区, 并将供给与需求一一映射为高供-高需、高供-低需、低供-高需和低供-低需区^[13]。

供给与需求之间不存在绝对的平衡,本研究将供需匹配关系空间制图,目的在于识别出 UGS 降温效益的相对平衡与不平衡区域,以便将不平衡区域作为未来城市规划和管理的重点。

3 结果与分析

3.1 城市绿地降温效应

研究区共有 469 个绿地具有降温效应,主要集中分布在外环区。福州市主城区 UGS 平均降温距离为 226.03m,平均降温强度 0.43℃。内环区 UGS 平均 CD 与 CI 最高(表 1),这主要源于内环区热岛效应更为显著,UGS 与周边区域间形成了更强的温差梯度,从而增强了局部冷岛效应。此外,部分内环区域的 UGS 具有较高植被覆盖率和良好的管护措施,进一步提升了其降温能力。相较于面积更大的绿地,面积较小的绿地 CI 和 CD 表现出更大的变异性,说明其服务效应对位置、类型和配置与周边环境条件更为敏感。这表明小型绿地在城市微气候调节中具备更强的局部调控潜力和策略性布局价值。皮尔森相关分析结果显示,CD 与绿地面积间无显著相关性($r=0.011, P=0.808$),CI 呈现正相关关系($r=0.403, P<0.001$)(图 3)。

表 1 具有降温效应的城市绿地统计
Table 1 Statistics of urban green spaces with cooling benefits

区域 District	统计指标 Statistic	降温距离/m Cooling distance	降温强度/℃ Cooling intensity	面积/km ² (占比/%) Area(Ratio)	数量/个(占比/%) Amount(Ratio)
内环区 Inner ring district	平均值	261.38	0.51	337018.51(1.72%)	8(1.71%)
	标准差	150.78	0.34		
	变异系数	0.58	0.67		
中环区 Central ring district	平均值	274.65	0.50	3264651.61(16.69%)	104(22.17%)
	标准差	147.81	0.36		
	变异系数	0.54	0.72		
外环区 Outer ring district	平均值	211.07	0.41	15953891.17(81.58%)	357(76.12%)
	标准差	149.43	0.36		
	变异系数	0.71	0.87		
全域 Whole area	平均值	226.03	0.43	19555561.30(100%)	469(100%)
	标准差	149.43	0.36		
	变异系数	0.66	0.83		

3.2 UGS 降温服务供需关系

福州市主城区城市绿地降温服务的供需关系在空间上呈现出显著的城乡梯度特征。图 4 显示,降温服务供给覆盖范围整体较小,高值区集中在中环区和外环区;而人口需求涉及区域广,从外环到内环逐渐增强,呈现出“由郊区至城心递增”的空间格局特征。研究区内降温服务均成赤字状态,总赤字量达 2.77×10^7 (人·℃),供给严重小于需求,其中严重赤字区主要分布在中环区,面临“人多、热重、绿少”的典型城市热环境矛盾,是亟需改善供需关系的重点区域。

供需匹配类型分布进一步揭示了不同环区的结构性差异(图 4,表 2)。总体上,供需匹配关系随着城市从内环向外环扩展,呈现出从“高需-低供”集中向“高供-低需”主导的梯度转变。外环区以高供-低需和服务空白区为主,分别占该类型总量的 91.76%和 79.79%,覆盖人口占比为 90.14%和 57.61%。尽管外环区域具备丰富的 UGS 资源,但由于人口密度较低且分布分散,整体供需匹配效率不高,存在一定程度的资源闲置。中环区是供需矛盾最为突出的区域,其中低供-高需类占比达 39.71%,覆盖人口达 96,287 人(占比 45.4%);同时该区也是高供-高需类型的重要集聚区,网格数量占比为 35.74%,服务人口达 25.24 万人,占比 43.52%,反映出中环区在绿地供给和高降温需求与之间存在显著不匹配。内环区虽然面积有限,但仍存在一定比例的低供-高需区(25 个网格,6,638 人)和服务空白区(473 个网格,16.28 万人),表明部分老城区受历史发展限制,绿地供给不足的问题依然存在。

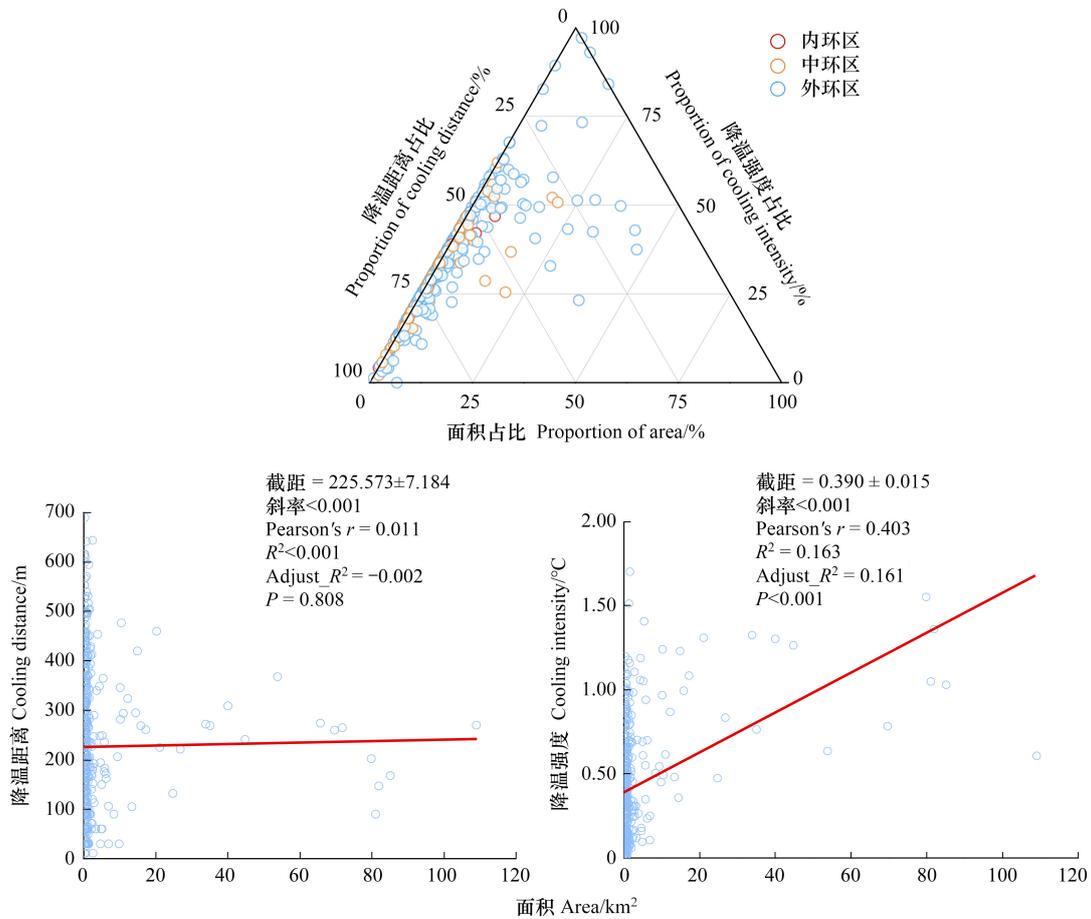


图 3 城市绿地降温效应

Fig.3 Urban green space cooling effect

表 2 供需匹配分区统计表

Table 2 Supply-demand matching subdivision statistics

供需匹配关系 Supply-demand matching	分区统计 Partition statistics	网格数量 Grids number	占比/% Ratio	人口数量 Population	占比/% Ratio
低供-低需 Low supply-Low demand	内环区	6	0.27	873	0.47
	中环区	71	3.24	8095	4.35
	外环区	2114	96.49	177301	95.19
	全域	2191 (6.79%)	100.00	186269 (6.22%)	100.00
低供-高需 Low supply-High demand	内环区	25	2.75	6638	3.13
	中环区	361	39.71	96287	45.40
	外环区	523	57.54	109170	51.47
	全域	909 (4.58%)	100.00	212095 (7.09%)	100.00
高供-低需 High supply-Low demand	内环区	16	1.76	2262	2.20
	中环区	59	6.48	7877	7.66
	外环区	835	91.76	92680	90.14
	全域	910 (4.59%)	100.00	102819 (3.44%)	100.00
高供-高需 High supply-High demand	内环区	98	4.47	29543	5.09
	中环区	783	35.74	252378	43.52
	外环区	1310	59.79	298032	51.39
	全域	2191 (11.04%)	100.00	579953 (19.38%)	100.00
服务空白区 Service gap areas	内环区	473	3.47	162773	8.52
	中环区	2284	16.74	647415	33.87
	外环区	10887	79.79	1101123	57.61
	全域	13644 (68.75%)	100.00	1911311 (63.87%)	100.00
总计 Total		19845 (100.00%)		2992447 (100.00%)	

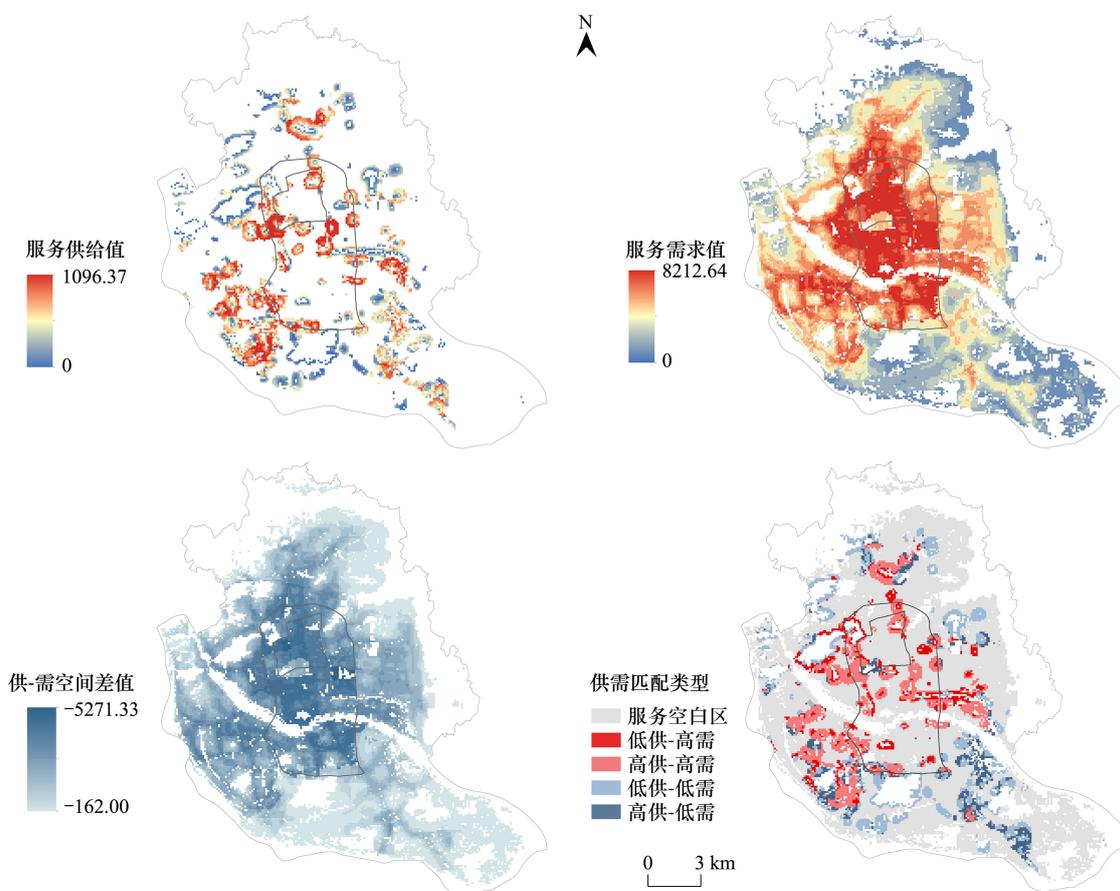


图4 城市绿地降温服务供-需空间分布图

Fig.4 Supply-demand spatial distribution of urban green space cooling service

4 讨论

4.1 城市绿地降温效应的比较分析与福州优化路径探索

采用分位数法将各UGS降温效应空间可视化(图5)。结果显示UGS降温范围处于11—757m,其中92%的UGS降温范围处于30—430m,平均降温范围为226.03m;降温强度在0.02—2.83℃之间,平均值为0.43℃,与以往福州研究整体上具有一致性。Yu等指出福州主城区92%的UGS冷岛半径在30—180m范围内,平均冷岛范围和强度分别为104m和1.78℃^[23];Cai等通过多时段研究指出UGS降温范围在30—450m之间,平均降温范围为238—250m,平均降温强度约为1.80—2.00℃^[24];Liu等研究也表明UGS的中位降温距离约为200m^[25];刘艳芬等发现城市公园降温距离处于100—600m,降温幅度在0.02—8.50℃^[18]。本研究中UGS降温强度相较于其他研究普遍较低,主要原因在于研究过程中根据气象站数据对城市LST做出校正,缩小了研究区内温度差异,从而对UGS的降温效应计算产生抑制效应。尽管不同研究在时间尺度、数据源与评价指标存在差异,但整体上UGS的降温服务在一定范围内面积越大的UGS,其冷岛效应越显著^[8,17,23]。

本研究进一步发现,降温效益供需关系与城市基础设施^[13]、公园建设空间结构^[26]、绿地可达性^[14]、分配公平性^[4]均在福州市主城区出现城乡梯度差异性。受各区域发展阶段、城市形态与功能定位的影响,UGS服务能力与人群需求在空间上存在系统性不匹配,表现出明显的结构性特征。因此,应根据不同区域的实际情况制定针对性的绿地配置与管理策略,以更有效地回应差异化需求,提升城市整体环境质量与供需协调关系。

针对研究区供需失衡现象,本文在整体统筹与分区分类施策的基础上,结合《福州市绿地系统规划(2021—2035年)》提出的“两环一带两廊十楔十四群”结构,提出优化福州市UGS降温服务的策略,以强化降

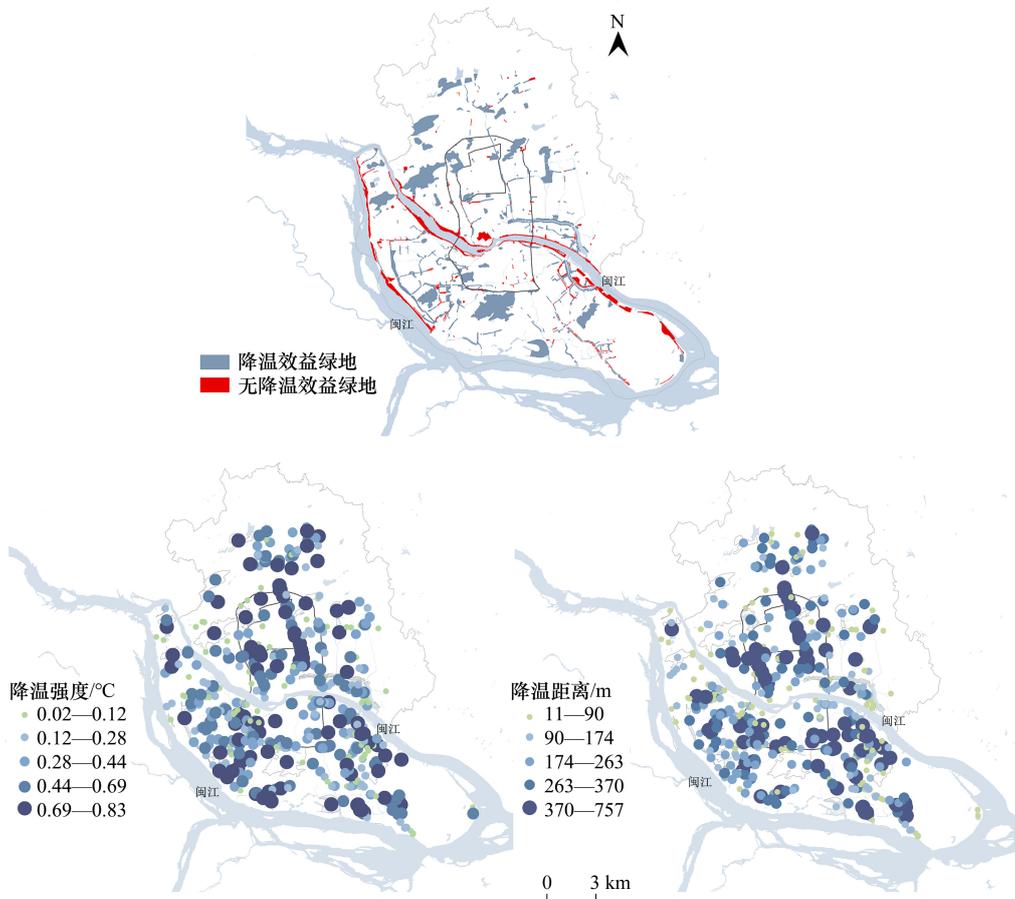


图5 城市绿地降温效应空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of urban green space cooling effect

温服务供需匹配与针对性调控能力。服务空白区和低供-高需区域覆盖了研究区超过 70% 的人口,为减轻环境不公平现象应优先进行干预。在规划实施过程中,可将这些区域与规划中拟建绿地空间对接,优先推进 UGS 布局落地与功能强化,让更多城市居民受益。针对不同城市空间层级,应采取差异化调控策略。内环区因用地高度紧张且人口密度高,降温服务赤字最为严重,建议通过植树增荫、道路绿化、屋顶绿化与垂直绿墙等立体化空间形式提升绿量供给;同时对现有 UGS 进行微更新,提升冠层覆盖与蒸散能力,并结合水景营造提高降温效果^[8]。中环区作为人口导入与城市扩展的主要区域,应重点推动公园群、生态廊道等大型绿地项目与城市风道体系同步建设,提升绿地系统与热风险格局的空间耦合度,缓解 UGS 服务错位问题。外围区 UGS 资源丰富,但开发强度较低,且人口密度低,绿地利用效率有待提升,应重点保护和扩建大型绿地,完善城市绿地生态网络,将城市空间“融合”于绿色自然空间,有效“连接”并提升城乡整体绿地服务效率^[27],并强化其对城市中心区的通风输送与生态补给功能。此外,针对当前未发挥降温效应的 UGS,如闽江沿岸绿地以及街头绿地,应深入挖掘其降温服务潜力。水体和 UGS 均能提供冷岛效应,且水体白天的制冷效应强于 UGS^[19-20],对于大型水域周边 UGS 的降温效益应单独讨论。研究表明,蓝绿一体化可以加强相互的降温潜力,并提供比独立的水体或 UGS 提供更大的降温效益^[28],但现有数据和证据尚不足以充分验证与水体接壤的 UGS 降温效果,本研究对其持谨慎态度^[29]。街头绿地则由于规模较小且分散,难以形成有效的微气候调节区,导致降温能力有限。此外,研究表明公园外的土地利用和地形条件干预了 UGS 的溢出效应,尤其在商业区 UGS 的降温潜力将被削弱^[30]。建议通过增强遮荫、优化植物种类与结构、提升养护质量等措施增强其微气候调节功能。基于城市现有自然肌理构建具有通风导向、蓝绿协同与空间连通的 UGS 冷岛网络,并打破

连接热岛源的关键节点和廊道^[31],推动 UGS 从生态配置向气候适应型系统转型,有效提升城市热环境韧性与人民福祉。

4.2 局限与未来展望

研究尚有不足之处。本研究在分析 UGS 降温服务时已剔除相邻 UGS 的直接影响,但缓冲区内的 LST 仍可能受到周边 UGS 叠加效应及下垫面类型差异的干扰。鉴于研究聚焦于城市尺度的供需匹配空间关系,通过设置最小间距阈值、剔除服务区重叠与基于遥感和土地利用数据的空间筛选以控制主要干扰因素。未来研究可引入更高分辨率的地表数据与物理模型以提升评估精度。UGS 降温效应并非简单的线性距离衰减,而是受到风速、风向、周围建筑环境等多种因素的影响,未来研究应考虑更复杂的模型进行模拟与计算。研究中需求侧的分析并未对人群属性进行区分,不同年龄、健康状况和社会经济背景的人群对环境温度的感受和 demand 存在显著差异,未来研究应细分人群属性以便更精确地评估居民实际需求。

5 结论

本研究从供需匹配视角切入研究,构建了绿地降温服务需求与供给的评价框架,以福州市为例量化评估了高温天气下 UGS 降温效应和降温服务的供需匹配情况,并结合城市现状和规划文件提出了面向不同圈层的 UGS 优化策略。主要结论如下:

1) 福州市主城区 UGS 降温范围介于 11—757m,其中 92% 的 UGS 降温距离为 30—430m,平均为 226.03m;降温强度在 0.02—2.83℃ 之间,平均为 0.43℃。

2) UGS 降温服务供给覆盖范围有限,高值区集中在中环区和外环区;而人口需求分布更广,呈现出“由郊至城”逐步增强的空间梯度特征。研究区整体处于供不应求状态,降温服务赤字显著,赤字总量达 2.77×10^7 (人·℃)。

3) 供需匹配关系在空间上呈现出明显的圈层结构差异,随着城市从内环向外环扩展,呈现出从“高需-低供”集中向“高供-低需”主导的梯度转变。

本研究构建的 UGS 服务供需评价体系将各 UGS 降温效应、实际服务供给与人口需求进行量化。与传统研究常用的人口数量作为需求表征不同,评价单元往往以街道、社区及居住区等较大评价单元,本研究通过对人口数据进行修正,精准定位至 100m×100m 范围,并结合最适生活温度和夏季温度数据测算潜在人口需求。在服务供给方面,同时考虑了服务覆盖人口数、UGS 降温效应的距离衰减及多个 UGS 的叠加后的实际效益,而非仅以可达性或覆盖人口数量进行评估。该框架能够更准确地描绘出供需差异度,并通过直观的空间制图展示供需匹配情况,从而有效地指导以人为本的城市建设策略,有助于政策制定者和城市规划者更好地理解 and 响应城市热环境问题。本研究为提高人民福祉和增强城市韧性提供了新的视角和方法论支持。

参考文献 (References):

- [1] He B J. Cause-related injustice, process-related injustice, effect-related injustice and regional heat action planning priorities: an empirical study in Yangtze River Delta and Chengdu-Chongqing urban agglomerations. *Landscape and Urban Planning*, 2023, 237: 104800.
- [2] Xu Z Y, Zhao S Q. Scale dependence of urban green space cooling efficiency: a case study in Beijing metropolitan area. *Science of The Total Environment*, 2023, 898: 165563.
- [3] Liu H, Huang B Z, Cheng X, Yin M Q, Shang C, Luo Y, He B J. Sensing-based park cooling performance observation and assessment: a review. *Building and Environment*, 2023, 245: 110915.
- [4] Xie H L, Wang X K, Hu X T, Shi Z Y, Lin H, Xie X Q, Chen L X, Dai H X, Zhang J, Xu M J, Liu X Z. Exploring urban green space optimization of the urban walking life circle in Fuzhou, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20 (2): 1180.
- [5] 徐琳琳, 胡文浩, 徐文辉. 国外基于自然的解决方案 (NbS) 研究进展. *中国城市林业*, 2024, 22(3): 1-13.
- [6] You M Z, Huang J X, Guan C H. Are new towns prone to urban heat island effect implications for planning form and function. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104939.

- [7] Chen M, Jia W X, Yan L, Du C L, Wang K. Quantification and mapping cooling effect and its accessibility of urban parks in an extreme heat event in a megacity. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 334: 130252.
- [8] Xiao Y, Piao Y, Pan C, Lee D K, Zhao B. Using buffer analysis to determine urban park cooling intensity: Five estimation methods for Nanjing, China. *Science of The Total Environment*, 2023, 868: 161463.
- [9] Xiao Y, Piao Y, Wei W, Pan C, Lee D K, Zhao B. A comprehensive framework of cooling effect-accessibility-urban development to assessing and planning park cooling services. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 98: 104817.
- [10] Zuo J, Shi M Q, Jia W X, Yan Y, Song X Y, Shen R Z, He J L. Reducing heat exposure from personal cooling strategies to green city construction in China's tropical city. *Science of The Total Environment*, 2024, 927: 171955.
- [11] Shi M Q, Chen M, Jia W X, Du C L, Wang Y T. Cooling effect and cooling accessibility of urban parks during hot summers in China's largest sustainability experiment. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 93: 104519.
- [12] 王森, 曾穗平, 卢黎镛, 艾合麦提·那麦提, 曾坚. 郑州城市形态对热岛强度影响的的城市发展梯度差异. *环境科学*, 2025, 46(3): 1924-1936.
- [13] Xie H L, Wang X K, Wang Z F, Shi Z Y, Hu X T, Lin H, Xie X Q, Liu X Z. Mismatch between infrastructure supply and demand within a 15-minute living circle evaluation in Fuzhou, China. *Heliyon*, 2023, 9(9): e20130.
- [14] Zhou Y H, Xie H L, Liu X Z, Wang X K, Wang Z F. From service capacity to spatial equity: Accurately and comprehensively evaluating urban park green space distribution under multi-trips mode. *PLoS One*, 2024, 19(1): e0296629.
- [15] 福州市统计局, 国家统计局福州调查队. 福州统计年鉴-2022. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [16] Wu J Y, He Q S, Chen Y W, Lin J, Wang S T. Dismantling the fence for social justice Evidence based on the inequity of urban green space accessibility in the central urban area of Beijing. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2020, 47(4): 626-644.
- [17] 赵海月, 胡森, 朱建宁, 黄婷婷, 张颖, 李亚丽, 严梦竹. 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. *生态学报*, 2023, 43(12): 4904-4919.
- [18] 刘艳芬, 黄茹鲜, 艾婧文, 杨柳青, 余坤勇, 刘健. 福州市城市公园的冷岛效应及其影响因素. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2024, 48(3): 295-303.
- [19] Roshan G, Moghbel M. Quantifying the cooling effect of rain events on outdoor thermal comfort in the southern coastal stations of the Caspian Sea. *Journal of Thermal Biology*, 2020, 93: 102733.
- [20] 刘慧民, 钱文琦, 唐路嘉, 巫溢涵, 曾佳颖. 城市生态绿楔土地利用变化及冷岛效应评估——以武汉市为例. *应用生态学报*, 2024, 35(2): 480-488.
- [21] Lan L, Tang J Y, Wargoeki P, Wyon D P, Lian Z W. Cognitive performance was reduced by higher air temperature even when thermal comfort was maintained over the 24-28°C range. *Indoor Air*, 2022, 32(1): e12916.
- [22] Yang W, Zhang G Q. Thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned buildings in humid subtropical climate zone in China. *International Journal of Biometeorology*, 2008, 52(5): 385-398.
- [23] Yu Z W, Guo X Y, Jørgensen G, Vejre H. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 152-162.
- [24] Cai Y B, Wu Z J, Chen Y H, Wu L, Pan W B. Investigate the difference of cooling effect between water bodies and green spaces: the study of Fuzhou, China. *Water*, 2022, 14(9): 1471.
- [25] Liu S, Li X F, Chen L, Zhao Q, Zhao C H, Hu X S, Li J. A new approach to investigate the spatially heterogeneous in the cooling effects of landscape pattern. *Land*, 2022, 11(2): 239.
- [26] You M Z, Guan C H, Lai R W. Spatial structure of an urban park system based on fractal theory: a case study of Fuzhou, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): 2144.
- [27] 肖华斌, 何心雨, 王玥, 王洁宁, 姜芊孜. 城市绿地与居民健康福祉相关性研究进展——基于生态系统服务供需匹配视角. *生态学报*, 2021, 41(12): 5045-5053.
- [28] 陶煜, 刘宛. 北京市主城区地表城市热岛强度格局演变特征及驱动因子空间异质性. *环境科学*, 2024; 1-15. (2024-08-20). <https://link.cnki.net/doi/10.13227/j.hjxx.202405264>.
- [29] Zhou W, Cao W, Wu T, Zhang T. The win-win interaction between integrated blue and green space on urban cooling. *Science of The Total Environment*, 2023, 863: 160712.
- [30] Hamada S, Tanaka T, Ohta T. Impacts of land use and topography on the cooling effect of green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(4): 426-434.
- [31] 董建权, 彭建. 绿地空间降温效应综述: 景观调控视角. *生态学报*, 2024, 44(4): 1336-1346.