

北京市城市公园降温效应评价及其影响因素分析

杨欢^{1,2} 任周鹏^{3,4} 宋佃星^{1,2}

1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 中国·陕西 宝鸡 721013
2. 陕西省灾害检测与机理模拟重点实验室, 中国·陕西 宝鸡 721013
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国·北京 100101
4. 地理信息科学与技术全国重点实验室, 中国·北京 100101

摘要: 城市热岛效应愈发影响居民的生活舒适度, 为了缓解城市热岛效应, 城市公园规划改建时获得更好的降温效应, 本研究选取北京市六环内 26 个城市公园为研究对象, 基于 Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像, 计算城市地表温度 (LST), 利用缓冲区分析、景观格局分析和相关性分析方法, 定量研究了城市公园的降温效果、降温范围和影响因素。结果: 城市公园在研究区域内形成了明显的“冷岛”, 且最大降温距离在 400 米左右, 公园平均在 400 米降温幅度趋近于 0°C; 城市公园 400 米的冷岛指数 (PCI) 与公园面积、形状指数、绿地面积、绿地形状指数、水体面积呈正相关; 公园外围的土地覆盖景观的绿地面积、绿地聚集度和公园 400 米的冷岛指数呈负相关, 不透水面聚集度与公园 400 米的冷岛指数呈正相关。结论: 城市公园降温效应突出, 降温范围存在明显空间衰减规律, 公园内部地表温度受公园面积、绿地面积、水体面积作用显著, 冷岛效应的景观驱动因素有正向驱动的包括公园面积、形状指数、绿地面积、绿地形状指数及水体面积, 其中公园面积的尺度具有敏感性, 而形状指数在各影响因素中解释力较弱, 为非核心因素。由此可见, 在城市公园规划改建时, 首先考虑规模要素, 其次是结构要素, 根据实际适当考虑形态要素。

关键词: 北京市; 城市公园; 地表温度; 冷岛效应; 景观格局; 降温效应

Evaluation of the Cooling Effect of Urban Parks in Beijing and Analysis of Influencing Factors

Yang Huan^{1,2}, Ren Zhoupeng^{3,4}, Song Dianxing^{1,2}

1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, China Shaanxi Baoji 721013
2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, China Shaanxi Baoji 721013
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, China Beijing 100101
4. National Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, China Beijing 100101

Abstract: The escalating urban heat island effect increasingly compromises residents' thermal comfort. To mitigate this effect and enhance the cooling efficiency of urban park planning and renovation, this study selected 26 urban parks within Beijing's Sixth Ring Road as research subjects. Based on Landsat8 OLI/TIRS remote sensing imagery, we calculated land surface temperature (LST) and employed buffer analysis, landscape pattern analysis, and correlation analysis to quantitatively investigate the cooling effects, cooling ranges, and influencing factors of urban parks. Results: Urban parks formed distinct "cold islands" within the study area, with an average LST 3.16 °C lower than the mean LST across Beijing's Sixth Ring Road. The maximum cooling distance extended approximately 400 meters, beyond which the cooling magnitude progressively diminished and approached 0 °C on average. Within parks, LST showed negative correlations with park area, shape index, green space area, green space shape index, and water body area. Conversely, the park cooling island index (PCI) at 400 meters exhibited positive correlations with these factors. Outside parks, the green space area and aggregation degree within the 400-meter buffer zone negatively correlated with PCI, while impervious surface aggregation degree positively correlated with PCI. Conclusion: Urban parks demonstrate significant cooling effects with spatially decaying patterns. Park internal LST is regulated by multiple landscape characteristics, among which park area, green space area, and water body area contribute most

substantially to cooling. Factors positively driving the cold island effect include park area, shape index, green space area, green space shape index, and water body area. Park area exhibits scale sensitivity, whereas shape index exerts weaker explanatory power as a non-core factor. Therefore, during urban park planning and renovation, priority should be given to scale elements, followed by structural elements, with morphological elements incorporated contextually.

Keywords: Beijing; Urban parks; Land surface temperature (LST); Cooling island effect; Landscape patterns; Cooling effect

0 引言

城市化进程的加快导致我国城市下垫面不透水面积和人口密度迅速增加，加剧了城市热岛效应（Urban Heat Island Effect, UHI），引发了一系列生态环境问题，对居民健康产生了一定负面影响^[1]。影响居民生活的城市热岛可分为气温热岛（Atmospheric UHI）和地表热岛（Surface UHI）两种类型^[2]，在定量评估地表城市热岛（SUHI）对居民生活影响的研究中，热红外遥感技术凭借其大范围、周期性获取地表温度信息的优势，已成为反演与监测 SUHI 空间格局和动态变化的核心手段^[2,3]。为有效缓解城市热岛效应及其对居民的不利影响，科学规划与建设城市绿色空间是关键策略^[3,4]。实证研究表明，城市绿地通过显著的降温效应（Cooling Effect），在降低局地地表温度、减小 SUHI 强度方面发挥着至关重要的作用^[5,6]。

综合近年研究，城市绿地（尤其是城市公园）通过显著的降温效应有效缓解城市热岛效应，其作用强度普遍呈现随距离增加而衰减的规律。多项研究表明，景观结构特征（如斑块形状、水体占比等）对降温效率的影响往往大于绿地面积本身^[7,8]。刘宸瑄等指出，提升建成区植被覆盖度与缩小城乡植被覆盖差异可在缓解热岛方面形成协同效应^[9]。另有研究基于同心带模型发现，蓝绿空间的降温效率随距城市中心距离呈先增后减的非线性变化，并在特定阈值内达到最优^[10]。在城市公园尺度上，其降温作用在内部及周边 200 米范围内尤为显著，且绿地斑块的形态特征对热岛缓解的作用常大于面积大小^[11,12]。针对西安市公园的研究进一步表明，公园内部下垫面类型中水体温度最低、绿地次之，不透水地面最高；公园降温效果与面积、形状指数、绿地及水体面积等因素呈正相关^[13,14]。在北京的相关研究中，水体面积被识别为影响公园及其周边温度的关键因子，同时绿地斑块形状复杂性及不透水面分布的分散程度也对温度具有显著影响^[15]。李婷婷等人研究还发现，公园周边温度与距离

的关系符合三次多项式，且公园面积的差异会导致降温效应强度发生明显变化^[16-18]。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

北京是我国的首都和国际大都市，城市化发展速度快，位于华北平原北部，北京市地势西北高、东南低。北京市平原的海拔高度在 20~60 米，山地一般海拔 1000~1500 米，气候为暖温带半湿润半干旱季风气候，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥。北京市六环内区域位于北京市主城区及其周边地区，总面积约为 2278.34 平方千米。该区域以北京前门为中心，其中，三环以内属于传统老城区范围，空间利用趋于饱和；三环外是新增城市空间，常住人口密度高，经济活动强度高，不透水表面积占比不断增加导致六环内区域的热岛强度不断增加，尤其是在夏季，城市中心区的地表温度明显高于郊区，城市公园植被相对密集，绿色空间占比较高，通过植被的蒸腾作用、遮荫效应以及水体的蒸发冷却作用，能够有效缓解局部高温。

1.2 数据来源

(1) Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像来源于美国地质勘探局 (USGS)，文中选取研究区 2022 年夏季 7 月 24 日的遥感影像，图像质量好，云量低于 10%，研究区域内基本无云覆盖。

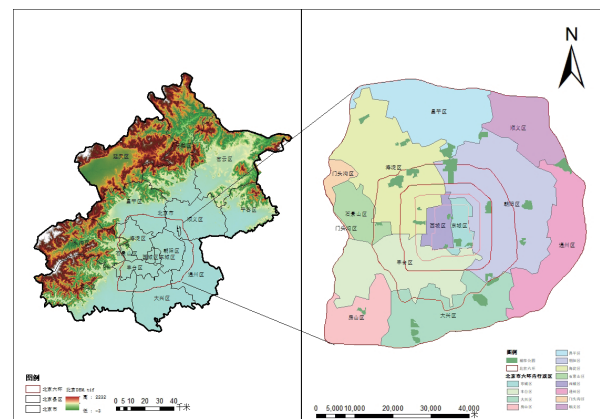


图 1 研究区概况

(2) 土地利用数据是北京大学中国主要城市景观数据集^[22] (空间分辨率为 2.4 m)。由北京大学 DoLab 实验室自主研发的功能分区工具提取获得。依据《城乡用地分类与规划建设用地标准》(GB50137-2011), 城市功能区划分为林地、绿地、农业、水体、交通、未开发、工业、学校机构、商业、一类居住、二类居住、三类居住用地共 12 个景观要素类别, 由于本研究研究对象为城市公园及周边地区, 故将公园内部土地覆盖的林地、绿地、农业用地重分类为植被, 未开发用地, 交通, 工业, 学校机构, 商业, 一、二、三类居住用地重分类为不透水面, 即研究区的土地覆盖分为植被、水体、不透水面三大类。

1.3 研究方法

1.3.1 地表温度计算

USGS 网站下载的 Landsat8 OLI/TIRS C2L2 级别产品可以直接反演地表温度, 在 ENVI5.6.2 中将像元值转化地表温度^[19], 计算公式为:

$$LST = DN * 0.00341802 + 149 - 273.15$$

其中: LST 为地表温度; DN 为像元值, 此处代入 Band10, 单位为摄氏度。

1.3.2 缓冲区分析

缓冲区分析是用来解决邻近度问题的空间分析工具之一, 借助缓冲区分析法, 研究公园对其周边一定范围的降温范围和降温幅度。缓冲区的设置结合相关研究成果和初步实验的结果发现, 城市公园在 0—30 米降温效果最好^[13], 因此选择以 30 米为间距向外设置多个缓冲区, 缓冲区个数取决于公园的最大降温范围, 根据以往的研究, 生成 600 米的缓冲带, 部分缓冲带示意图如图 2。

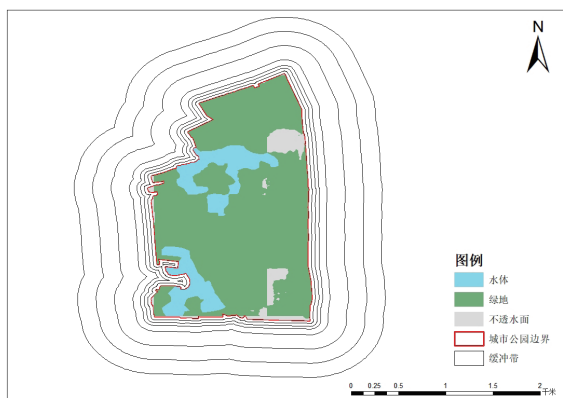


图2 公园缓冲区示意图

1.3.3 景观格局分析

景观格局 (Landscape Pattern) 表征特定地域内景观

要素类型在空间维度上的结构化特征与空间异质性, 其核心内涵涵盖多尺度景观单元的类型组成、数量构成及空间配置关系。景观格局指数可划分为斑块 (Patch)、类型 (Class) 和景观 (Landscape) 三个层级。本研究将土地覆盖类型重分类为植被覆盖、水体及不透水面三类, 并基于 Fragstats 平台计算景观格局指数。在景观特征量化层面, 于类型水平选取绿地面积、水体面积、不透水面面积、绿地形状指数与绿地聚集度; 于景观水平选取公园总面积、公园形状指数作为核心量化指标^[20,21]。

2 结果分析

2.1 地表温度计算结果

城市热岛效应空间分异性显示如图 3, 北京市六环内平均地表温度分布呈现空间异质性, 六环内地表温度值域为 21.7—57.9℃, 大范围高温区主要分布于中心城区, 热岛空间格局呈现由中心向外围扩散的圈层结构特征, 在研究区东部、西部和北部形成了热岛边缘的大范围低温区, 中心城区低温区域空间分布零散, 主要集中在河流和公园周边, 尤其在城市公园内部形成典型冷岛效应。本研究采用空间分析方法对 26 个样本公园进行定量研究, 分别沿边界向外生成 600 米缓冲带, 并用 ArcGIS10.8 的分区统计工具和叠加分析工具将公园及缓冲带和地表温度叠加, 统计公园内部及每个缓冲带的平均地表温度。构建冷岛指数量化公园对周边环境的降温效应, 计算公式如下:

$$PCI = T_R - T_P$$

式中, PCI 为公园冷岛指数, TR 为公园一定距离缓冲区的平均地表温度, TP 为公园内部平均地表温度。

实验表明, 研究区 26 个样本公园中仅温榆河公园冷岛指数为负值 (PCI < 0), 公园空间区位显示温榆河公园位于研究区东北部的低温区, 且公园内部有大量下垫面类型属于不透水面, 热力调节功能下降, 其余公园的冷岛指数均大于 0, 即公园内部地表温度均低于公园 600 米缓冲区内平均地表温度, 具有显著降温效应。统计显示, 有 17 个公园在 600 米范围内的平均地表温度均低于北京市六环内平均地表温度, 有 9 个公园分别在不同范围以外出现温度回升现象, 主要原因是公园自身特点、公园区位和公园周边土地利用的不同, 综合结果可以看出城市公园能够有效缓解公园周边夏季城市热岛效应。

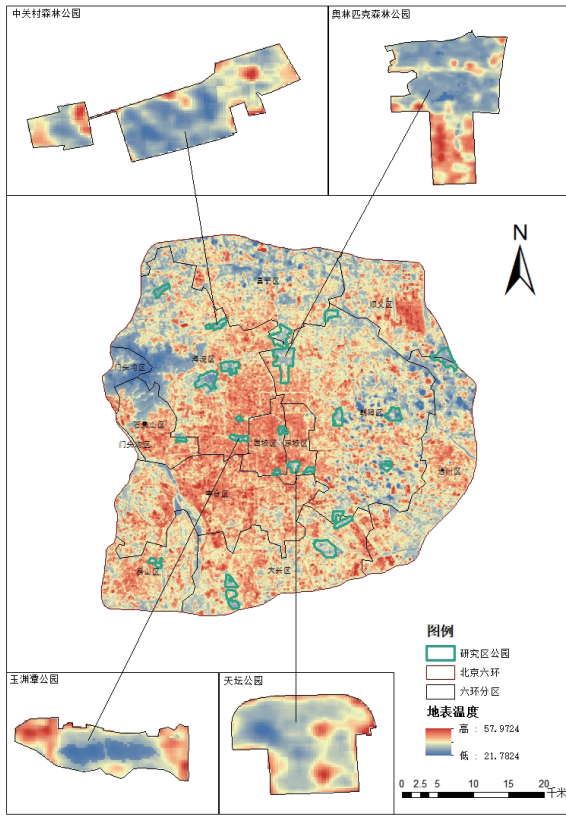


图3 城市热岛空间异质性

2.2 公园对周边环境的降温效应

基于 ArcGIS 10.8 平台，沿公园斑块边界向外依次建立 20 个宽度为 30 米的同心环缓冲区，总范围达 600 米。通过统计各缓冲带内平均地表温度，以缓冲距离为自变量、平均地表温度为因变量进行曲线拟合与相关性分析。结果显示，二者关系主要呈现两种拟合模式，所有拟合 R^2 均高于 0.95，反映出降温效应存在显著空间异质性。经三次多项式拟合发现，一类曲线呈先升后降趋势（图 4a），另一类则持续上升（图 4b），表明公园在一定范围内具有明显的降温效应变化。进一步通过计算拟合曲线斜率发现，在 350 - 450 米区间内斜率出现明显波动。综合判定，当缓冲距离超过 400 米时，降温效应趋于不显著。

本研究采用降温梯度分析法，量化公园降温效应的衰减特征，定义公园降温梯度是公园内部和各个缓冲带相较于外部邻近缓冲带的温度差， $\Delta T = TR - T(R-1)$ ，其中 R 表示缓冲带序列（ $R=1-20$ ，对应 30-600 m），随着距离的增加， ΔT 呈现下降的趋势，说明随着距离的均匀增加公园的降温梯度不断减小，0-30m 缓冲带降温效应最显著，为 0.62°C，300-330m 降温效率衰减 67%，400m 内梯度值变化明显，400m 后衰减速率趋近于零，表明城市公园

最大有效降温距离阈值为 400 米。

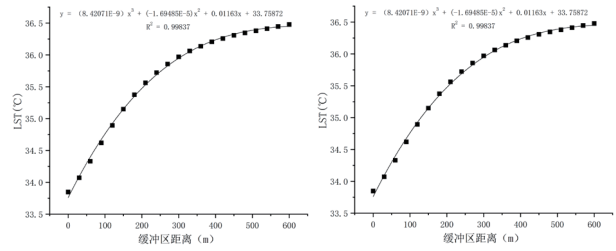


图4a

图4b

图4 公园地表温度随距离变化曲线

2.3 公园自身因素对公园降温效应的影响

基于 400 米有效降温阈值构建的冷岛强度指数，根据公园降温距离和公园内部地表温度拟合曲线，求出公园周边 400 米距离的冷岛指数（PCI），进行公园景观指数和 PCI 指数的相关性分析，如图 5 所示，公园面积和冷岛指数的 R^2 为 0.5109，公园面积与 PCI 指数呈正相关，当公园面积小于 800ha 时，相关性较强，公园面积越大，对周围环境的降温效果越好。公园形状指数和 PCI 指数的 R^2 为 0.3576，相关性较弱，但公园形状越复杂，公园的降温效果也随着增加，说明城市公园的形状指数对公园的降温效果的影响有一定局限。

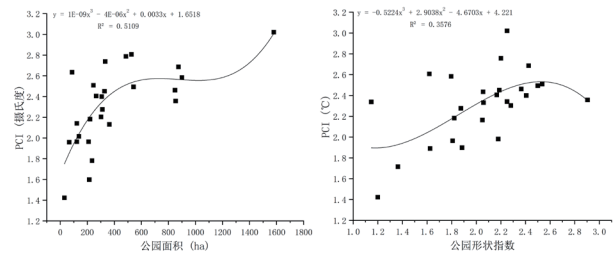


图5 公园的面积、形状指数对公园降温效果的影响

公园绿地和水体的景观指数可以影响公园内部的地表温度，如图 6 通过研究公园绿地和水体的景观指数与降温效果的相关性发现，公园绿地面积与 PCI 指数的 R^2 为 0.5593，随着公园内部绿地面积的增加，公园的 PCI 指数随之增加，即公园的降温效果越好。绿地形状指数与 PCI 指数的相关性显示同公园形状指数与 PCI 指数的相关性一致，呈正相关， R^2 为 0.418，绿地形状越复杂，公园的降温效果越明显。同样排除没有水体的公园，计算其余公园 400 的 PCI 指数和公园水体面积的相关性发现， R^2 为 0.4252，在水体面积小于 150ha 时，公园水体面积与 PCI 指数呈正相关，随着水体面积的增加，公园的降温效果越好。

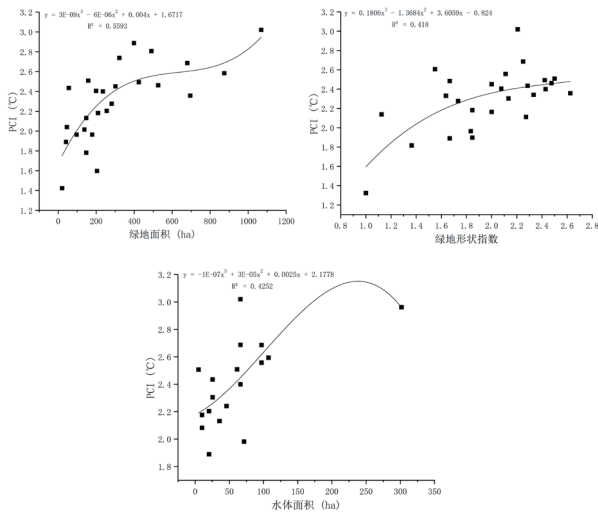


图6 公园的绿地面积、绿地形状指数、水体面积对公园降温效果的影响

2.4 公园周围土地覆盖景观特征对降温效应的影响

公园降温效应不仅受公园自身因素的影响，公园周边的土地覆盖情况也对公园的降温效应有一定影响，绿地面积和绿地聚集度与公园 400 米 PCI 指数多项式回归曲线可见，绿地面积和绿地聚集度与 PCI 指数呈负相关，说明绿地面积越大时，公园的 PCI 越小，即公园和周边环境温差越小，所以此类公园的降温效果越好，因为公园内部的低温区和公园周边存在热量交换，公园绿地面积越大，周边温度变化越慢，所以公园的降温效果更好。由图 7 可知，硬质地表聚集度与 PCI 指数呈正相关， R^2 为 0.78，即公园外围不透水面积越聚集，公园的 PCI 指数越高，不透水面夏季温度高，与公园内部的低温区温差大，会向公园内部输送热量，从而影响公园的降温效应。

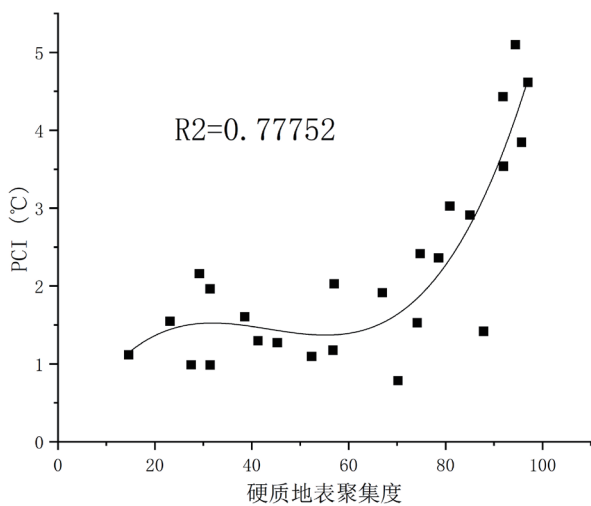


图7 公园硬质地表聚集度对降温效应的影响曲线

3 讨论

本研究在样本地类代表性和时空尺度选取方面存在一定局限性，可能影响结论的外推效率。后续研究通过扩大样本容量并构建城市绿地空间异质性对比组，结合多源遥感数据和实测数据进行交叉验证，以提升热环境效应评估的可靠性。需要指出的是，公园冷岛效应的形成机制具有显著的空间异质性特征，既受植被覆盖度、斑块形态指数等本底属性的调控，也与城市形态参数、地理位置、局地气候背景等外源因子存在相关性，可以使用地理加权回归方法，深入解析微观尺度环境变量的交互效应。

在时序分析维度，本研究基于 2022 年夏季地表温度反演数据分析，难以揭示城市热岛效应的季节性变异规律，建议补充多时相 Landsat 和 MODIS 时序数据集，结合气象再分析资料，构建基于时空地理加权回归的冷岛效应动态模型。此外，现有土地覆盖分类体系在景观格局指数计算中存在类间混淆问题，建议采用面向对象分类方法优化土地利用数据产品，结合移动窗口法和梯度分析法，构建精细化冷岛效应响应曲面，从而提升景观生态格局 - 过程耦合分析的精度。

4 结语

本研究选取北京市六环内 26 个城市公园为研究对象，基于 2022 年 7 月 24 日的 Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像，计算城市 LST，利用 AOI 范围确定公园的矢量边界，结合天地图在线地图和高分辨土地利用类型数据提取公园内部的土地覆盖信息。综合运用缓冲区分析、景观格局分析和相关性分析方法，定量研究了城市公园的降温效果、降温范围和影响因素。

结果如下：研究区域内，城市公园形成显著的“冷岛”效应，其平均地表温度较北京六环内区域低 3.16°C，反映出明显的降温作用。公园降温幅度随距离增加而递减，最大降温距离约为 400 米，超出该范围后降温效应趋于消失。公园面积、形状指数、绿地面积、绿地形状指数及水体面积均与公园 400 米范围内的冷岛指数 (PCI) 呈正相关，面积在 800 公顷以下时相关性较强，形状指数的影响相对有限。公园周边绿地面积与绿地聚集度同冷岛指数 (PCI) 呈负相关，而不透水面聚集度则与 PCI 呈正相关。

研究结果表明城市公园降温效应突出，降温范围存在

明显空间衰减规律,在最大降温距离内,降温幅度随距离增加而递减,至最大降温距离边界处降温效应基本消失,公园内部地表温度受多种景观特征调控,其中公园面积、绿地面积、水体面积对降温效应贡献显著,并存在一定阈值,形态效应解释力较弱,表明公园的形态复杂性对公园内部 LST 调控作用有限,冷岛效应的景观驱动因素有正向驱动的包括公园面积、形状指数、绿地面积、绿地形状指数及水体面积,其中公园面积的尺度具有敏感性,而形状指数在各影响因素中解释力较弱,为非核心因素。由此可见,在城市公园规划改建时为了获得更好的降温效应,首先考虑规模要素,其次是结构要素,根据实际适当考虑形态要素。

参考文献:

- [1] 杨元建, 罗芙, 薛捷升等. 城市热浪与冠层热岛协同作用研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2024,39(04): 331-346.
- [2] George, et al. "Monitoring and characterizing multi-decadal variations of urban thermal condition using time-series thermal remote sensing and dynamic land cover data." *Remote Sensing of Environment* 269 (2022): 112803.
- [3] Arnfield, A. John. "Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island." *International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society* 23.1 (2003): 1-26.
- [4] Asgarian, Ali, Bahman Jabbarian Amiri, and Yousef Sakieh. "Assessing the effect of green cover spatial patterns on urban land surface temperature using landscape metrics approach." *Urban Ecosystems* 18 (2015): 209-222.
- [5] 杨宣, 宫聪. 城市公园降温效应的影响因素研究进展[J]. 中国城市林业, 2024,22(06):28-34.
- [6] 李帅琦, 王祖伟, 胡春明等. 城市公园景观格局对热岛效应的影响研究进展[J]. 安徽农业科学, 2023,51(09): 14-19.
- [7] 杨振山, 张慧, 丁悦等. 城市绿色空间研究内容与展望[J]. 地理科学进展, 2015,34(01):18-29.
- [8] 孙喆. 高密度城区形态要素对热环境的影响作用——以北京市五环内区域为例[J]. 生态环境学报, 2020,29(10):2020-2027.
- [9] 刘宸瑄, 王丽群, 许行等. 2001—2021 年中国植被覆盖对夏季城市热岛效应的影响[J]. 生态学报, 2024,44(24): 11020-11034.
- [10] Xue, ngyu, et al. "Quantifying the spatial pattern of urban heat islands and the associated cooling effect of blue - green landscapes using multisource remote sensing data." *Science of the Total Environment* 843 (2022): 156829.
- [11] 甘爽, 杨艳丽, 孙艳玲等. 城市公园对城市热环境的降温效应——以天津市为例[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2016,36(04):33-38.
- [12] 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[J]. 生态环境学报, 2016,25(10):1663-1670.
- [13] 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[J]. 干旱区资源与环境, 2020,34(05):154-161.
- [14] 冯晓刚, 石辉. 基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究[J]. 生态学报, 2012,32(23):7355-7363.
- [15] 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[J]. 生态学报, 2014,34(12):3179-3187.
- [16] 李婷婷, 谷达华, 阎建忠等. 重庆主城区不同类型公园对周边环境的降温效应[J]. 生态科学, 2018,37(04): 138-146.
- [17] 周东颖, 张丽娟, 张利等. 城市景观公园对城市热岛调控效应分析——以哈尔滨市为例[J]. 地域研究与开发, 2011,30(03):73-78.
- [18] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治等. 广州市城区公园对周边环境的降温效应[J]. 生态学报, 2010,30(18):4905-4918.
- [19] 李旋, 徐岩岩, 孟瑾. 天津市城市公园对城市热环境的降温效应研究[J]. 华中建筑, 2024,42(09):60-64.
- [20] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性[J]. 应用生态学报, 2012,23(08): 2077-2086.
- [21] 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[J]. 应用生态学报, 2015,26(02):636-642.

57(3): 411-430.

[22] DU S J, DU S H, LIU B, et al. Large-scale urban functional zone mapping by integrating remote sensing images and open social data[J]. Giscience & Remote Sensing, 2020,

作者简介: 杨欢 (1999.11-), 女, 汉族, 陕西省宝鸡市人, 硕士在读, 研究方向: 地理信息系统应用。