

DOI: 10.20103/j.stxb.202411062724

林佳怡, 董寅, 戴嘉腾, 郭力慈. 景观连通性与环境公平性视域下城市冷岛网络构建及优化——以福州市中心城区为例. 生态学报, 2025, 45(11): 5582-5594.

Lin J Y, Dong Y, Dai J T, Guo L C. Construction and optimization of urban cold island network from the perspective of landscape connectivity and environmental equity: a case study of the central city of Fuzhou City. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(11): 5582-5594.

景观连通性与环境公平性视域下城市冷岛网络构建及优化

——以福州市中心城区为例

林佳怡^{1,2}, 董寅^{1,2,*}, 戴嘉腾^{1,2}, 郭力慈^{1,2}

1 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

摘要: 综合统筹自然景观规划与蓝绿设施配置形成契合“基于自然的解决方案”(NbS)理念的城市冷岛网络,对于全球变暖加剧背景下减少极端高温危险性、降低人口热暴露风险、缓解城市气候脆弱性具有重要价值。以“新四大火炉”之一的福州市为研究对象,融合 Landsat 遥感影像、土地利用及开源互联网地图等多源地理大数据,基于电路理论、改进的移动搜索法与位置分配模型,构建了兼顾景观生态与环境正义、“点-轴-面-网”一体化的高密度中心城区冷岛网络格局,得到以下结论:(1)福州市中心城区热岛效应显著,建设活动频繁,人口高度密集的中、东部地区尤为明显;(2)研究识别出 41 个冷岛核心源地、83 条冷岛廊道、37 个冷节点、67 个热节点、6 个网络集群与 137 个新增蓝绿空间布局点,通过有机组合上述自然景观结构要素实现了景观连通性与环境公平性视域下的蓝绿空间布局优化;(3)构筑了“一环一轴,三廊多点”的城市冷岛网络体系,“一环”为由主城核心区外围众多天然山体组成的环城绿环,“一轴”是指闽江廊道通风主轴,“三廊”即“石笋山-旗山湖-旗山”、“青芝山-红光湖-鳌峰山”、“闽江口-南山-大姆山”三条山体廊道,“多点”则是中心城区内由冷节点与新增蓝绿空间布局点共同构成的较大规模降温节点,进一步结合福州市派江吻海、“山、水、城”一体的自然禀赋优势提出减缓城市热岛效应的改进策略。研究结果可为改善城市局部热环境及规划建设“人民城市”理念下的气候适应型城市提供可迁移的技术框架和实践案例。

关键词: 景观连通性;环境公平性;蓝绿空间;冷岛网络;福州市

Construction and optimization of urban cold island network from the perspective of landscape connectivity and environmental equity: a case study of the central city of Fuzhou City

LIN Jiayi^{1,2}, DONG Yin^{1,2,*}, DAI Jiateng^{1,2}, GUO Lici^{1,2}

1 Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-geographical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Forming an urban cold island network aligned with the concept of “Nature-based Solution” (NbS) by comprehensively coordinating natural landscape planning and the allocation of blue-green facilities is of great value for reducing the risk of extreme high temperature, reducing the risk of population thermal exposure, alleviating the vulnerability of urban climate under the background of increasing global warming. Taking Fuzhou City, one of China’s “four new furnace cities”, as the research object, and integrating multi-source geographic big data such as Landsat remote sensing images,

基金项目: 国家自然科学基金项目(42401315);教育部人文社会科学研究基金项目(24YJCZH042)

收稿日期: 2024-11-06; **网络出版日期:** 2025-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dongy_simlab@fjnu.edu.cn

land use data and open source Internet map data, utilizing circuit theory (CT), the modified floating catchment area (FCA) method, and a location-allocation (LA) model, a cold island network pattern in the high-density central city is constructed, which takes into account landscape ecology and environmental justice and integrates “point-axis-surface-network”. The following conclusions are obtained: (1) The heat island effect in the central city of Fuzhou City is remarkable, particularly in the central and eastern areas with frequent construction activities and high population density; (2) The study identified 41 cold island core sources, 83 cold island corridors, 37 cold nodes, 67 hot nodes, 6 network clusters and 137 newly added blue-green spatial layout points. By organically combining the above structural elements of natural landscape, the blue-green spatial layout optimization was realized from the perspective of landscape connectivity and environmental equity; (3) An urban cold island network system characterized by “one ring, one axis, three corridors, and multiple points” has been established. “One ring” is a green ring around the city, which is composed of many natural mountains around the core area of the main city; the “one axis” refers to the main axis of ventilation corridor along Minjiang River; and the “three corridors” consist of “Shisun Mountain-Qishan Lake-Qishan Mountain”, “Qingzhishan-Hongguang Lake-Aofeng Mountain”, and “Minjiangkou-Nanshan Mountain-Damushan Mountain”; the “multiple points” include a large-scale cooling node composed of cold nodes and newly added blue-green space layout points in the central city. Furthermore, combined with the natural endowment advantages of river meet the sea and the integration of “mountain, water and city” in Fuzhou City, the improvement strategies to slow down the urban heat island effect are proposed. The results of this research can provide a transferable technical framework and practical cases for improving the local thermal environment of the city and planning and building a climate-adapted city under the principle that cities should be built by the people and for the people.

Key Words: landscape connectivity; environmental equity; blue-green space; cold island network; Fuzhou City

在全球变暖趋势难以遏制和城市化进程不断加快的双重压力下,城市热岛成为现阶段普遍存在的城市环境问题,表现为城市中心区温度显著高于其郊区温度,给城市居民的日常生活与身心健康造成了重大威胁^[1-2]。现如今学界普遍倡导采用基于自然的降温解决方案,例如城市蓝绿空间作为区域生态安全的重要保障,建立成熟的蓝绿空间体系是缓解城市热岛效应的有效措施^[3-4]。研究表明,蓝绿空间的连通性对于改善城市热环境至关重要^[5]。同时,实现蓝绿空间的布局公平,提高居民的绿色暴露水平是蓝绿空间配置与城市规划建设的重要目标^[6-8]。因此,如何利用冷岛网络的连通性缓解城市热岛效应,并协调蓝绿空间的供需匹配关系,对于实现城市可持续发展、提高居民福祉具有重要意义^[9-11]。

目前,国内外学者对利用蓝绿空间改善城市热环境的研究已取得一定进展。宏观角度的研究大多基于遥感反演与空间分析技术,探索城市群/城市尺度下蓝绿空间的连通性^[12]或形态、布局^[13-15]对缓解城市热岛效应的影响等,并开始尝试引入景观生态学原理与“源-汇-流”理论构建区域冷/热岛网络^[16-17];微观视角下的研究主要借助场景模拟探索单个植被群落^[18]、水体^[19-20]或其组合^[21-22]对城市热环境的改善效果。同时,对绿地空间公平性的研究大多将目光聚焦于对空间可达性度量方法的优化,如通过改进距离衰减函数、考虑供给点间的竞争以及不同交通出行模式等途径提高评价精度^[23-24],或探索公园绿地、河流湖泊等单一类型公共开放空间的供需关系及其合理配置^[25-27]。

整体而言,已有研究从两个层面对蓝绿空间的景观组合配置开展了深入研究:学者们一方面关注到景观连通性和冷岛网络在缓解城市热岛效应中的关键作用;另一方面着眼于环境正义理论寻求提升城市公共服务公平性的基本路径。但当前关于整合蓝绿空间构建冷岛网络的研究仍存在若干缺陷,相关研究往往忽视了城市蓝绿空间作为关键生态景观资源的双重属性——它们不仅是有效抑制地表升温的生态调节器,也是满足居民休闲游憩、康养锻炼需求不可或缺的场所。若仅从景观连通性单一维度出发,容易忽略城市居民对自然生态体系文化服务的基本诉求;同样,如仅关注绿地公园的环境公平性,则可能无法完全发挥城市蓝绿空间

自然连通格局所带来的降温效应。然而,当前将景观连通性与环境公平性同时纳入到城市冷岛网络构建及优化问题的研究仍鲜有报道。

鉴于此,本研究选取“新四大火炉”之一的福州市作为研究区域,针对其中心城区开展城市冷岛网络构建研究,通过综合考虑自然环境肌理特征与景观文化服务供需水平,串联整合分散的冷岛资源,形成兼顾自然网络连通性与服务供需公平性的蓝绿空间布局优化方案,为缓解城市热岛效应,建设气候适应型城市提供新的思路与方法。

1 研究区域概况

福州东濒东海,三面为天然山脉环绕,地形为典型的河口盆地,夏季高温高湿,属典型的亚热带季风气候。2007年以来,福州市夏季平均地表温度峰值达到35—40℃,城市建筑与绿地的温差最高可达4℃,表现出明显的城市热岛效应。此外,福州市作为福建省的省会城市,是该省的政治、经济、文化中心,城市建设活动频繁,中心城区人口稠密、用地紧缺、建筑拥挤。在城市高密度发展的背景下,“三生”空间布局冲突矛盾加深,工矿生产用地与城镇生活用地扩张导致蓝绿空间受到严重挤压,绿地水体等斑块零散破碎且分布相对不均衡,导致蓝绿空间资源分配的不公平现象普遍(图1)。

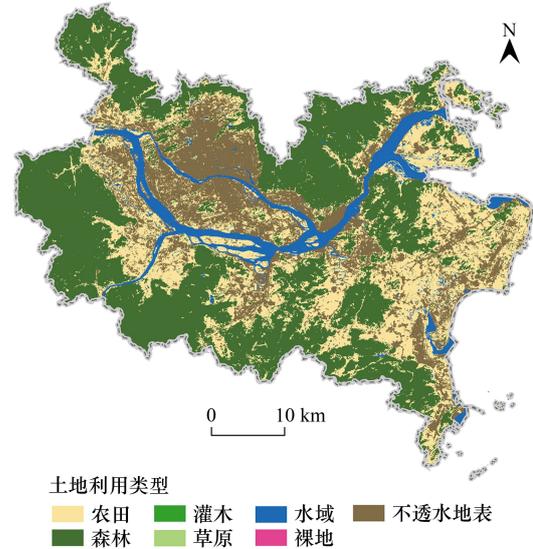


图1 研究区区位及其土地利用类型

Fig.1 Geographical location and land use type of the study area

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究采用的基础数据包括遥感影像、土地利用、建筑足迹、交通路网、数字高程、人口栅格、公园绿地及水体 AOI 数据(表1),并进行投影变换、重采样等预处理,将栅格数据精度统一调整为30m。需要说明的是,福州市夏季高温天气集中在7月中上旬,该时段降雨频繁,为规避云层干扰,本文选取该时期晴朗无云的时段采集遥感影像。

表1 研究数据
Table 1 Research data

数据类型 Data type	数据产品 Data product	时间 Time	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data resource	说明 Explanation
遥感影像 Remote sensing image data	Landsat 9 OLI_TIRS	2023年7月7日	30m	地理空间数据云平台	大气状况良好,满足地表温度反演的质量要求。
土地利用数据 Land use data	中国1985—2023逐年30m土地利用数据	2023年	30m	https://zenodo.org/record/5816591	—
建筑足迹数据 Building footprint data	—	2023年	—	高德地图开放API	将研究区划分为30m×30m的网格单元,计算各个网格的建筑密度、建筑高度、道路密度。
交通路网数据 Road network data	—	2023年	—	高德地图开放API	—
数字高程模型 Digital elevation model	ASTER GDEM	—	30m	美国地质勘探局	—
人口栅格数据 Population raster data	LandScan数据集	2023年	90m	https://landscan.ornl.gov	重采样至30m
公园绿地及水体AOI数据 AOI data in blue-green space	—	2023年	—	百度地图、高德地图、Open Street Map	—

AOI:兴趣区 Area of interest

2.2 研究方法

本文研究思路如图 2 所示,在逻辑顺序上包含核心源地识别、综合阻力面生成、初始网络构建与冷岛网络格局优化四个部分。

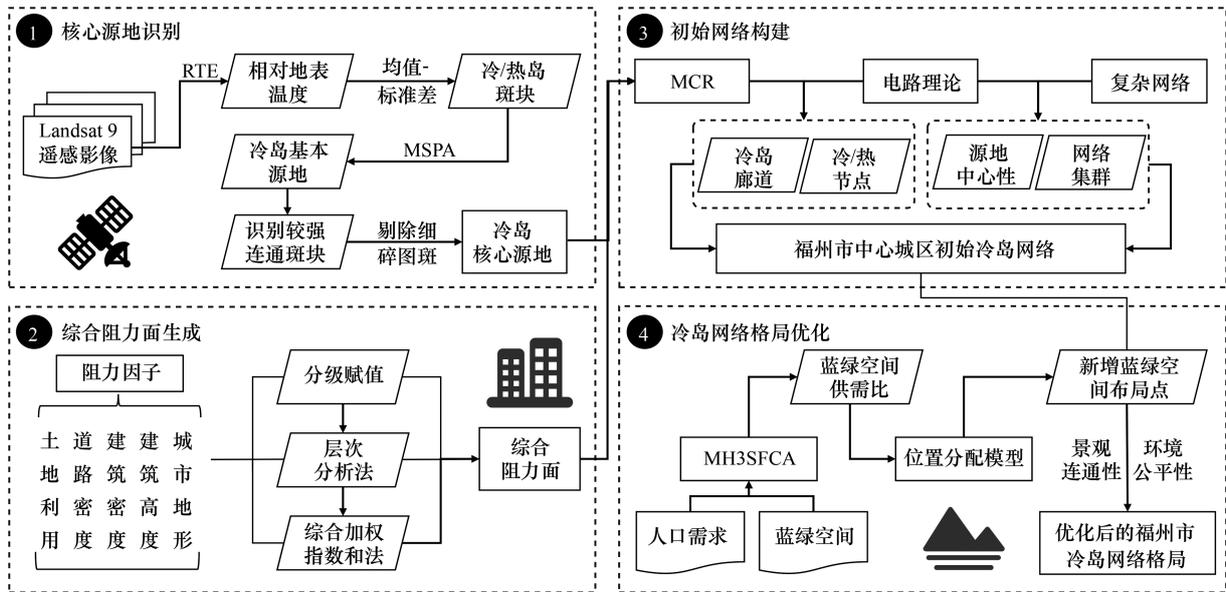


图 2 技术路线

Fig.2 Technology roadmap

RTF:辐射传输方程 Radiative transfer equation; MSPA:形态空间格局分析 Morphological spatial pattern analysis; MCR:最小累积阻力模型 Minimum cumulative resistance; MH3SFCA:基于 Huff 模型的三步移动搜索法 Modified-Huff-3-step-floating catchment area

2.2.1 初始冷岛网络构建

首先,在源地识别部分,通过辐射传输方程反演地表温度,利用均值-标准差法提取冷/热岛斑块,并结合形态空间格局分析(MSPA)与景观连通性计算结果,选择景观连通度重要性指数(dPC)大于0.3、整体连通性指数(dIIC)大于0.25的斑块进行提取,得到冷岛核心源地。其次,选取土地利用、道路密度、建筑密度、建筑高度、城市地形五个因素^[28-30](表2),根据综合加权指数和法生成综合阻力面。再次,结合源地与阻力面结果,利用Linkage Mapper识别最小成本路径构建冷岛廊道,并评估其重要性^[31-33]。然后,应用复杂网络理论,将源地与廊道抽象为节点和边^[34-35],形成拓扑网络,将度中心性、紧密中心性和介数中心性归一化处理求和得到源地综合重要性。同时,借助Pinchpoint Mapper判别对网络连接性具有重要作用的区域,即冷节点;使用Barrier Mapper检测影响通道质量的重要屏障点,即热节点。继而,引入Infomap算法对冷岛网络进行集群检测^[36-37],以发现网络中隐藏的簇结构,为提高网络稳定性奠定基础。最后,聚合上述源地、廊道、节点和集群,形成初始冷岛网络。

2.2.2 蓝绿空间服务供需评价与网络格局优化

利用基于Huff模型的三步移动搜索法(MH3SFCA),考虑居民对蓝绿空间的降温及休闲游憩需求,将步行、骑行与驾车三种交通模式、不同等级公园绿地及水体服务水平与半径内多个供给点间的竞争效应纳入考量范围(表3),对供需匹配水平进行评估,以量化环境公平性,核心公式如下^[38]:

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{i \in \{t_{ij} \leq t_0\}} \text{Prob}_{ij} P_i} \quad (1)$$

$$A_i = \sum_{t \in \{t_{ij} \leq t_0\}} \text{Prob}_{ij} R_j G(t_{ij}, t_0) \quad (2)$$

式中, R_j 为不同交通模式下供应点蓝绿空间 j 在不同搜寻半径 d_0 范围内的需求点 i 供需比, S_j 为蓝绿空间 j 的服务人口, Prob_{ij} 为需求点 i 选择蓝绿空间 j 的权重, 其依据表 3 中衰减函数分配, P_i 表示需求点 i 的人口数; 式 (2) 中, A_i 为需求点 i 的蓝绿空间可达性, $G(t_{ij}, t_0)$ 表示衰减函数。

表 2 冷岛扩散阻力因子分级赋值及其权重

Table 2 Graded assignment and weight of diffusion resistance factor of cold island

阻力因子及阻力值 Resistance factors and resistance value	阻力因子 Resistance factors					阻力值 Resistance value
	道路密度 Road density/ (km/km ²)	城市地形 Urban topography/m	土地利用 Land use	建筑密度 Building density/%	建筑高度 Building height/m	
评分标准 Grading criteria	<0.35	>1000	不透水地表	>40	>72	10
	0.35—0.6	900—1000	—	35—40	36—72	9
	0.6—0.8	800—900	裸地	30—35	27—36	8
	0.8—1.0	700—800	—	25—30	21—27	7
	1.0—1.5	600—700	—	20—25	15—21	6
	1.5—2.0	500—600	农田	15—20	9—15	5
	2.0—2.5	450—500	—	10—15	6—9	4
	2.5—3.0	400—450	绿地	5—10	3—6	3
	3.0—4.0	350—400	—	1—5	1—3	2
	≥4.0	≤350	水体	≤1	≤1	1
权重 Weight	0.16	0.13	0.36	0.16	0.19	—

表 3 不同等级蓝绿空间的服务半径

Table 3 Service radius of different levels of blue-green space

蓝绿空间等级 Level	蓝绿空间面积/km ² Area	出行方式 Trip mode	服务半径/min Service radius	对应距离/m Distance	衰减函数 Attenuation function
社区 Community	≤1	步行	7.5	500	1
街道 Street	1—10	步行	15	1000	1
		骑行		3725	高斯衰减函数
		驾车		7500	高斯衰减函数
城市 City	>10	步行	30	2000	1
		骑行		7500	高斯衰减函数
		驾车		15000	高斯衰减函数

进一步基于评估结果, 利用位置分配模型确定新增蓝绿空间的潜在布局点^[39]。具体而言, 以供需失衡的居民点作为蓝绿空间的需求点, 将研究区划分为 300m×300m 的渔网, 提取渔网中心点作为蓝绿空间布局的可选项, 已有公园绿地、水体作为蓝绿空间的必选项, 为克服最大化覆盖范围方法忽视需求点人口规模差异的不足, 本文采用确保需求方与供给方加权成本最低的最小化阻抗方法建立位置分配模型, 求解得到新增蓝绿空间布局点, 将其纳入初始冷岛网络, 得到最终的福州市冷岛网络格局。

3 结果与分析

3.1 福州市夏季热岛效应分析

利用辐射传输方程反演地表温度, 使用均值-标准差法进行分类, 提取得到冷岛斑块和热岛斑块。如图 3 结果显示, 2023 年 7 月 7 日福州市中心城区地表温度在 23.57—38.04℃ 之间, 总体温度较高。热岛斑块主要集中在中部主城区, 以商业区、住宅区和大型公共设施为主, 虽然其比重仅为研究区面积的 8%, 但由于其城市化程度高、人口密集, 引致的热岛效应将给居民的生命财产安全带来严重威胁。冷岛斑块主要分布在研究区边缘, 南部分布最广, 由闽江、乌龙江两大水系与大姆山、旗山等山体组成, 其占研究区面积的比例达

34.6%,对上述冷岛源地进行合理利用能有效缓解中心城区热岛斑块带来的高温热浪、城市热岛等气候环境问题。

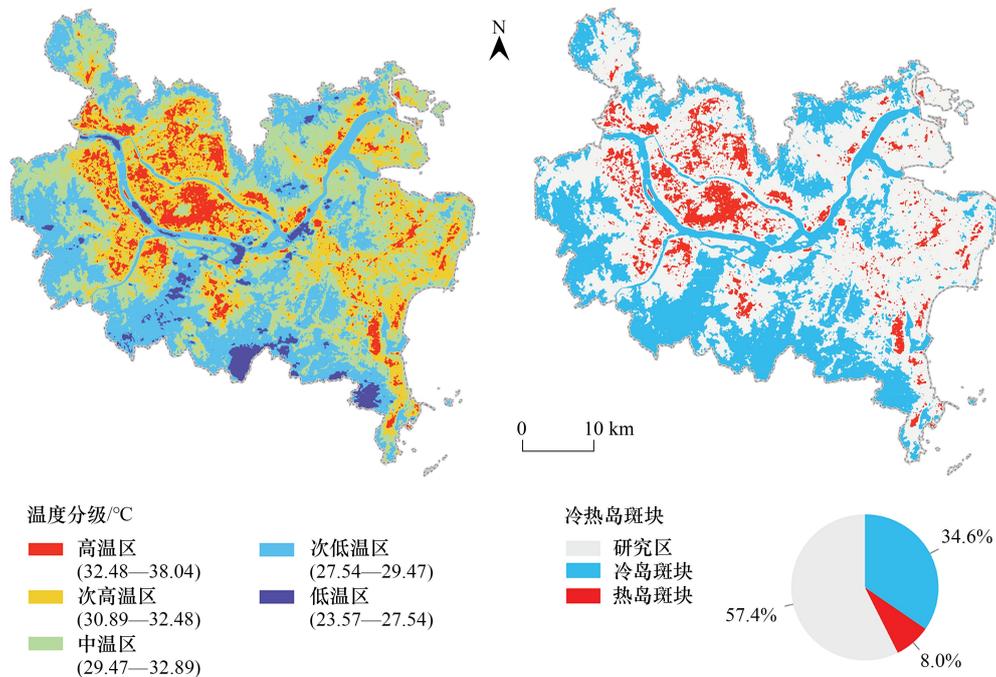


图3 福州市夏季地表温度及冷/热岛斑块

Fig.3 Land surface temperature and cold/heat island patches in Fuzhou City in summer

3.2 冷岛源地识别与阻力面生成

通过 MSPA 与景观连通性指数计算,剔除面积小、连通性弱的斑块,最终得到 41 个冷岛核心源地,占研究区总面积的 29.5%,主要由研究区边缘的旗山、鼓山、大姆山等主要山脉与闽江、乌龙江两大水系组成,其余源地则零散分布在中部高盖山公园、福州花海公园与东部南山公园、闽江口湿地公园等地。这源于中、东部为人口活动和城市建设的重要地区,开发活动频繁,而南部低山丘陵广布,建成区相较稀疏。相类似地,综合阻力高值区主要分布在中部城市核心区建筑密集,蓝绿空间破碎分散的区域,低值区则大多位于远离城市建成区的边缘地带,由江河水系与森林绿地构成(图 4)。

3.3 初始冷岛网络生成

引入最小累积阻力模型(MCR)与电路理论,利用 Linkage Mapper 识别冷岛廊道并评估廊道重要性,根据中心性得分将其划分为三级,提取得到 83 条,总长 196.62km 的冷岛廊道(图 5)。其中,一级廊道 27 条,主要位于研究区西北部,二、三级廊道共计 56 条,大多分布于城市核心区边缘。各级廊道与源地相互连接,促进冷岛源地之间传输连通,对提高其降温效应具有关键性作用。

通过 Pajek 分析工具计算源地综合重要性,并依据自然断点法进行等级划分(图 5)。其中,一级源地 9 个,平均面积约 7km²,多零散分布于鼓山和长乐区东部;二级源地 8 个,平均面积约 15km²,相较而言规模更大,主要集中在西部山区和高盖山、首石山、福建西溪森林公园等地;三级源地共 24 个,总面积达 443.2km²,包括南部连片丘陵地带、中部水系以及北部零散山区。

在冷岛廊道识别的基础上,利用 Pinchpoint Mapper 模块提取得到冷节点 37 个,大多集中在东部的山脉农田及闽江、乌龙江等河流滨水区域,这些降温节点有效遏制了热岛斑块向四周连片扩散的发展趋势,促使中心城区湿地、绿地等开敞空间与市域绿色生态空间有机贯通,建立起山水界面与城市的良好连接,从而改善福州市风环境、减缓热岛效应;使用 Barrier Mapper 工具确定热节点 67 个,主要分布在中部主城核心区与东部滨海

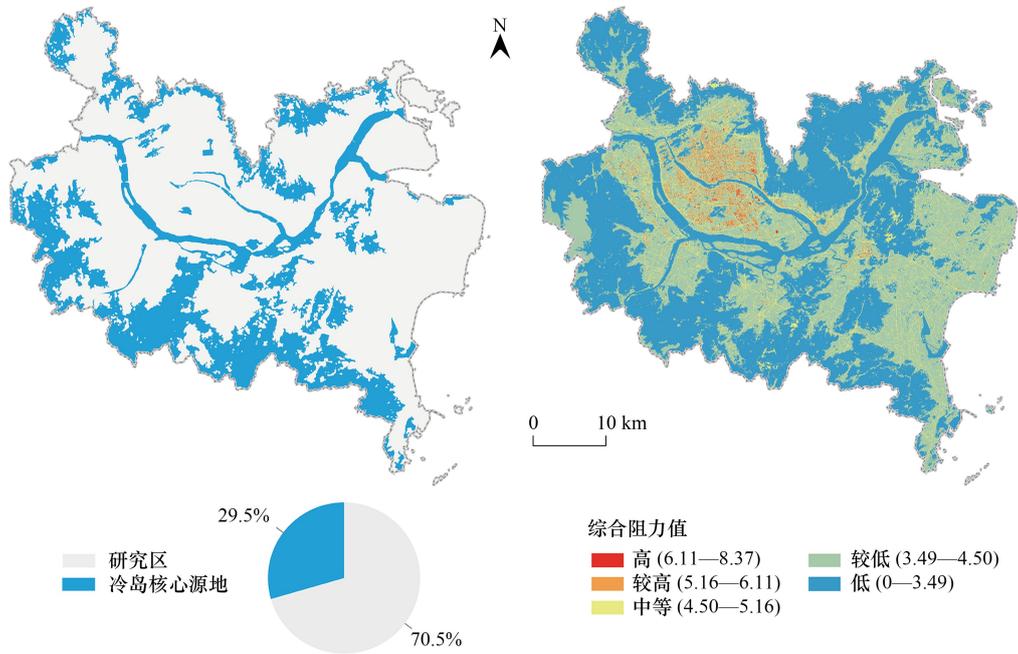


图 4 福州市冷岛核心源地与综合阻力面

Fig.4 Cold island core source and resistance surface of Fuzhou City

新区等既有建成区,且多位于三级廊道上,上述热节点源于城镇扩张对林地、湿地和农田等生态系统的占用,分割阻断了城市原有的通风廊道、生态廊道,削弱了冷岛核心源地之间的连通性和传输速率,导致城市局部热岛效应增强(图 6)。基于识别结果,可以依托冷节点处林草保护地、农田与滨水空间,通过生态规划干预提高景观连通度、聚集度,并针对热节点精准实施阻断措施,防止热岛斑块的扩展和粘连。

引入 Infomap 算法进行聚类分析得到 6 个网络集群,包括滨海绿地集群(东湖湿地公园-闽江口湿地公园-大鹤林场)、东南科学城绿地集群(旗山-旗山湖公园-沙滩公园-绿洲寨公园)、仓山-闽侯绿地集群(飞凤山奥体公园-高盖山生态公园-五虎山国家森林公园)、北郊绿地集群(福州国家森林公园-状元岭-三叠井森林公园)、主城核心绿地集群(左海公园-金鸡山公园-金牛山福道公园)、长乐西绿地集群(长安公园-南山生态公园-芦际潭森林公园-洞江湖公园)。其中,滨海、东南科学城、仓山-闽侯与北郊绿地集群凭借其独特的自然山水禀赋为主城核心区提供良好的冷岛降温增湿供给能力;主城核心与长乐西绿地集群人口密集,用地拥挤,强调对细碎分散冷岛核心源地的控制保护,对提高网络整体连通性起到关键作用,能保障冷热气流流动交换形成良好的循环体系。最终,遵循“斑块-廊道-基质”的景观生态学研究范式,将冷岛核心源地、冷岛廊道、冷/热节点和网络集群叠加形成初始冷岛网络(图 7)。

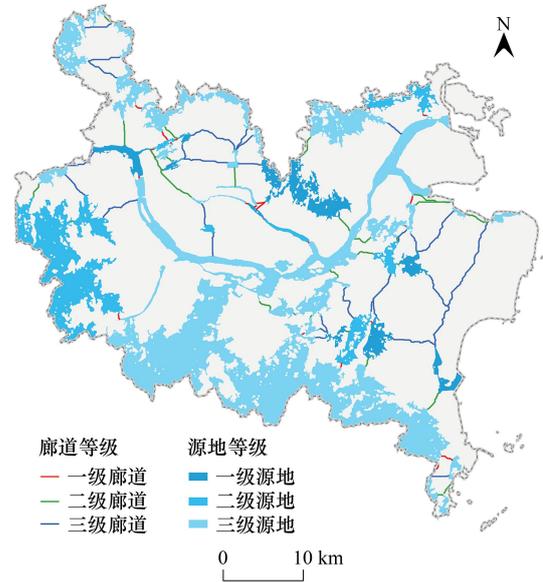


图 5 福州市冷岛核心源地及廊道

Fig.5 Core source and corridor of cold island in Fuzhou City

水禀赋为主城核心区提供良好的冷岛降温增湿供给能力;主城核心与长乐西绿地集群人口密集,用地拥挤,强调对细碎分散冷岛核心源地的控制保护,对提高网络整体连通性起到关键作用,能保障冷热气流流动交换形成良好的循环体系。最终,遵循“斑块-廊道-基质”的景观生态学研究范式,将冷岛核心源地、冷岛廊道、冷/热节点和网络集群叠加形成初始冷岛网络(图 7)。

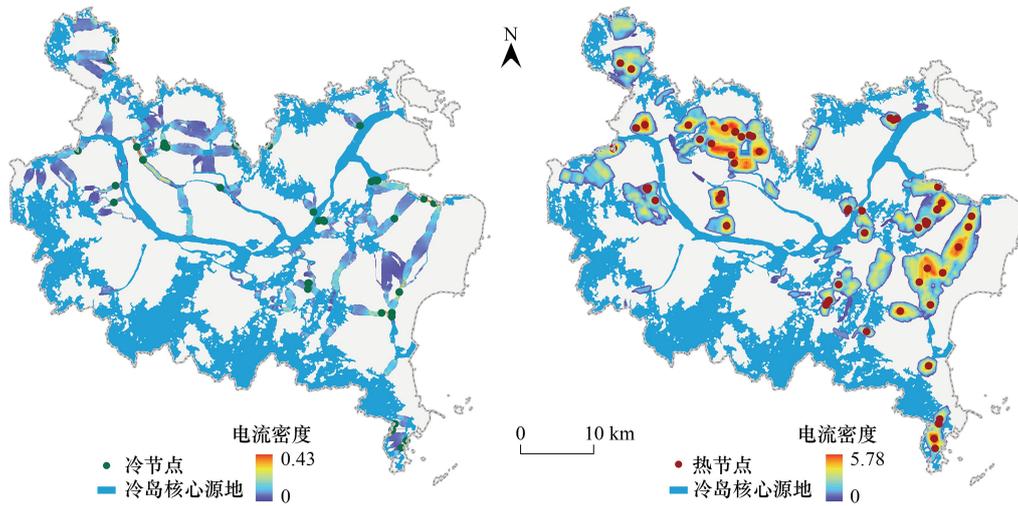


图 6 福州市冷/热节点分布

Fig.6 Distribution of cold/hot nodes in Fuzhou City

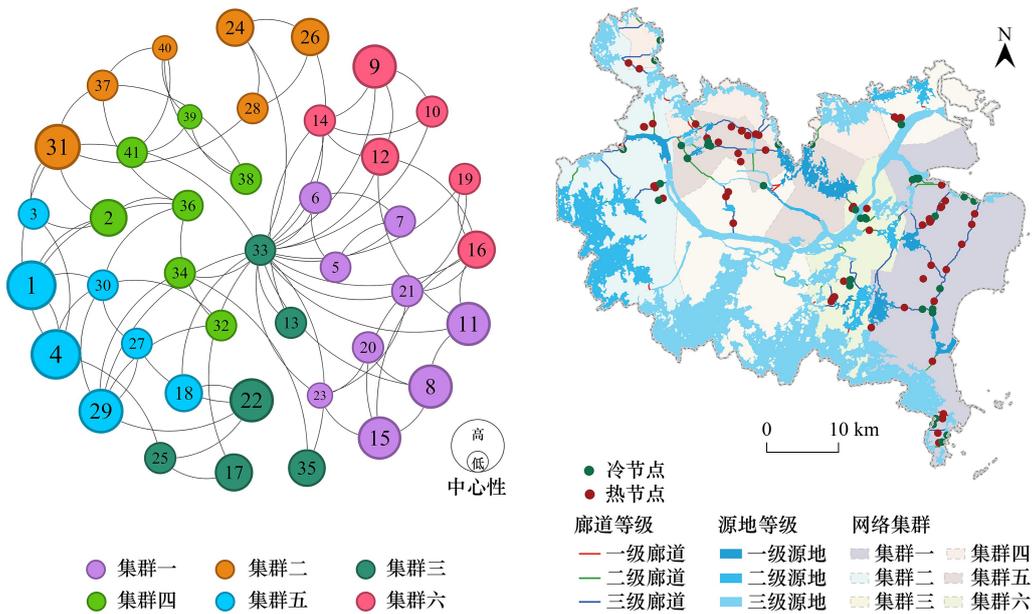


图 7 福州市中心城区初始冷岛网络

Fig.7 Initial cold island network in Fuzhou City downtown area

集群一为滨海绿地集群,集群二为东南科学城绿地集群,集群三为仓山-闽侯绿地集群,集群四为北郊绿地集群,集群五为主城核心绿地集群,集群六为长乐西绿地集群

3.4 蓝绿空间景观文化服务供需分析

在密度城市开发与土地利用紧缩的现实压力下,合理利用建成区内有限的蓝绿空间资源,能更高效合理地满足城市居民的休闲游憩、康养锻炼等需求,从而达到减少热不适与提升幸福感的双重目标。

本研究利用 MH3SFCA 对研究区蓝绿空间供需匹配水平进行评估,并利用自然断点法将供需比划分为四个类别,实现环境公平性的量化(图 8)。结果显示,无法满足居民对于蓝绿空间需求的区域主要位于人口密集的福州市中心二环内、闽侯县荆溪镇和长乐区。总体上看,研究区的蓝绿空间能基本满足大部分区域人口

的生活需要,但人口稠密区仍然存在供给不足的严峻问题。由于城市核心区人口活动密集,建筑空间拥挤,无法满足居民急切的蓝绿空间诉求。另一方面,气候变暖增强了热岛效应,加剧了城市居民的热暴露风险。因此,在蓝绿空间的规划建设中,应着重考虑高密度中心城区居民的客观需求,以蓝绿空间景观文化服务的供需关系为依据进行合理开发,实现更加公平的蓝绿空间布局。

3.5 冷岛网络格局优化

利用 ArcGIS 10.6 网络分析模块,设置需求点与设施点,基于最小化阻抗方法建立位置分配模型。求解得到 137 个新增蓝绿空间布局点,主要位于三环线北部外围、闽侯县上街镇、长乐区漳港街道与滨海新城等地,由局部山体、滨水区域与建成区内的零散斑块绿地构成(图 9)。近郊区自然山体与滨水湿地生态本底优势突出,可在保护优先的前提下适度发挥其游览休闲功能;建成区内孤立、零散的绿地、水体等开敞空间则可以通过合理规划设计营造连续开放的室外场地,形成通风廊道。

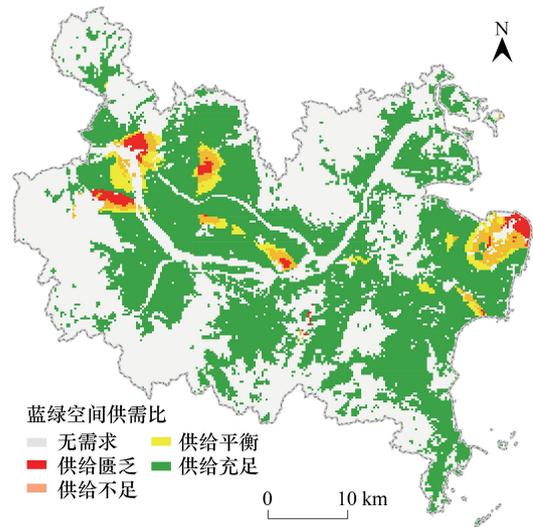


图 8 福州市蓝绿空间供需比分布

Fig.8 Distribution of supply-demand ratio of blue-green space in Fuzhou City

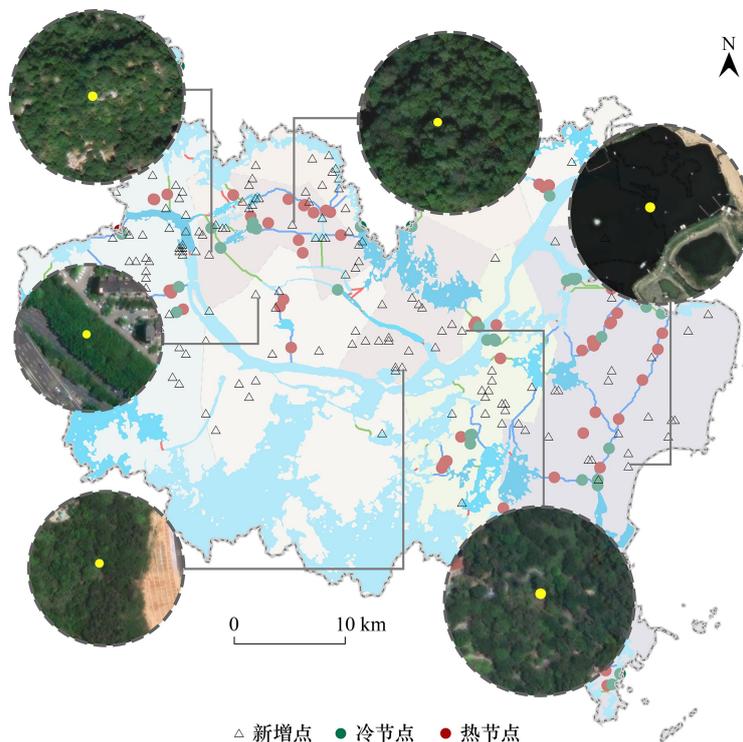


图 9 福州市新增蓝绿空间布局点分布

Fig.9 Distribution of new blue-green spatial layout points in Fuzhou City

为在保障绿地、水体等开敞空间景观连通性的基础上实现蓝绿基础设施配置公平,在初始冷岛网络的基础上进一步优化,纳入新增蓝绿空间布局点,最终形成“一环一轴,三廊多点”冷岛网络格局(图 10):“一环”是指由主城核心区外围莲花山、鼓山、旗山、五虎山等主要山体组成的环城绿环,为缓解高密度中心城区热岛

效应,满足居民游憩休闲需求提供便利,同时发挥生态保育、景观风貌、通风降温等功能,承担冷岛网络中最为重要的核心角色;“一轴”为依托主要水系—闽江构建的沿江廊道通风主轴,“三廊”包括“石笋山-旗山湖-旗山”、“青芝山-红光湖-鳌峰山”、“闽江口-南山-大姆山”三条山体廊道,通过线性河流水系与天然山体贯穿全城,实现蓝绿空间通风降温与游憩休闲的双重效果;“多点”则是中心城区由冷节点与新增蓝绿空间布局点构成的较大规模降温节点,如福州东湖湿地公园、金牛山公园、左海公园、西湖公园等,这些节点对于维持优质生态冷源的降温功能整体性发挥着重要作用。

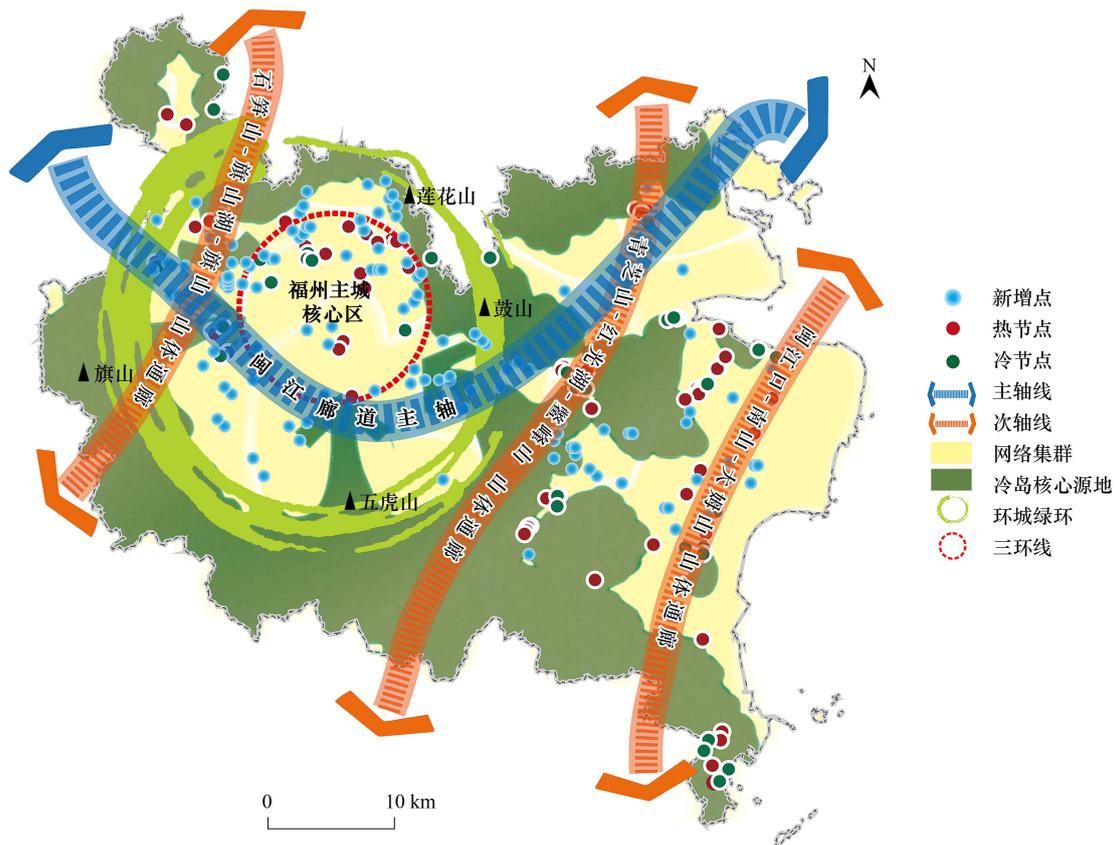


图 10 福州市冷岛网络格局示意

Fig.10 Schematic diagram of cold island network pattern in Fuzhou City

4 讨论

通过对比已有相近研究发现,本研究识别出的冷岛核心源地大多与城市主要河流水系、自然林地重叠,连片优质生态冷源均位于研究区南部植被密集的低山丘陵区。连通源地的冷岛廊道布局、走向与刘凡、岳谓攀等人^[40-41]的研究大致相同,主城核心区冷岛核心源地之间的连通性相对较弱,而城市外围廊道连通性更高。热节点在人口稠密的城市核心区分布更为集中。

与此同时,本研究构建的冷岛网络还表现出以下优势:(1)考虑到河湖水系、园林绿地、滨水区域等城市蓝绿空间之间的拓扑网络结构特征,引入复杂网络理论,评估冷岛核心源地综合重要性,识别体现自然环境分异的空间网络集群,从而提出更具针对性的冷岛网络格局构建方案;(2)利用改进的三步移动搜索法,克服同一需求点半径内多个供给点间的竞争效应缺陷,对多交通模式下的蓝绿空间供需水平进行评价分析,为实现城市蓝绿基础设施的合理配置提供重要参考;(3)统筹考量网络连通性与环境公平性,采用位置分配模型对初始网络进行优化,构建高密度中心城区“点-轴-面-网”一体化的冷岛网络,既能有效发挥蓝绿空间的降温增

湿效应,又满足了居民对休闲游憩服务、公共活力提升的需求。

为衡量网络的连通性优化效果,利用计算机仿真模拟,观测冷岛网络在蓄意攻击与随机攻击两种扰动策略下的表现^[42-43](图 11)。结果显示,优化前福州市冷岛网络面对蓄意攻击与随机攻击时,连通鲁棒性下降趋势线的斜率分别为-0.133、-1.052,而优化后冷岛网络在两种攻击下的连通鲁棒性下降趋势线的斜率分别为-0.071、-1.087。由此可知,相较于初始网络,考虑环境公平性后的网络连通鲁棒性下降趋势更趋平缓,面对攻击时具有更好的恢复力。

同样地,以 1km 搜索半径范围内蓝绿空间数量为标准,采用基尼系数测度冷岛网络的公平性优化效果^[44-45](图 11),由图可知,优化前研究区基尼系数为 0.72,而优化后则降低至 0.56,优化前 80%的居民仅获得不足 30%的蓝绿空间,而优化后则能获取超过 40%的休闲游憩服务。这意味着优化后的蓝绿空间布局使得研究区的蓝绿基础设施公平性得到显著提高。

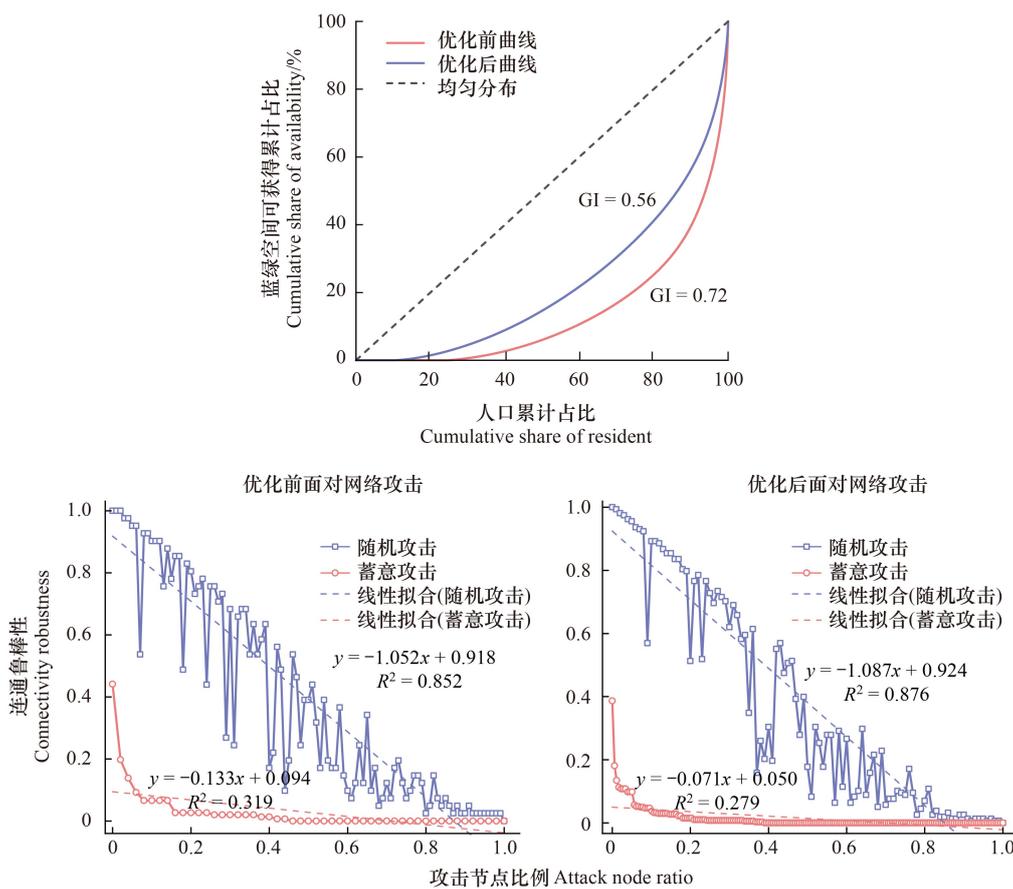


图 11 冷岛网络优化前/后效果对比

Fig.11 Comparison of effects before and after cold island network optimization

GI:基尼系数 Gini index

5 结论与展望

本研究以“新四大火炉”之一的福州市为例,遵循核心源地识别、综合阻力面生成、初始网络构建与冷岛网络格局优化的逻辑主线,整合分散的优质冷岛资源,并考虑居民休闲游憩需求,构建兼顾景观生态与环境正义的冷岛网络。结果表明:(1)研究区存在着显著的热岛效应,在中、东部地区尤为明显,上述区域是建设活动频繁,人口高度密集的城市核心区与重要开发区,其热岛效应带来的热暴露风险不容忽视;(2)研究识别出 41 个冷岛核心源地、83 条冷岛廊道、37 个冷节点、67 个热节点、6 个网络集群与 137 个新增蓝绿空间布局点,

在验证了热环境研究中“源地-阻力面-廊道-节点-集群”网络构建方法可行性的基础上,实现了景观连通性与环境公平性视域下的蓝绿空间布局优化。(3)研究集成了电路理论、移动搜索法与位置分配模型,构建了“一环一轴,三廊多点”的冷岛网络体系,并验证了网络连通性与公平性的优化效果,为全球变暖趋势和城市化进程加快双重影响下的气候适应型城市规划建设提供了方法支撑。

结合福州市冷岛网络构建结果,提出如下改进策略:(1)充分利用福州市“山、水、城”一体的自然优势,通过整合、新建、扩建等手段,优化绿地系统结构,提升中心城区冷岛核心源地的数量和质量,尤其是主城核心区面积较大的冷岛斑块。注重对研究区冷岛廊道及沿线区域的管控,控制廊道内的建筑高度与建设开发强度,保障强热岛区域风道口、绿地、水系、农林用地等及其周边的空间开敞,促进冷、热空气的交换。(2)通过调整局部用地、提升高温地区绿化率的方式促成冷节点向冷岛核心源地转变,拓展城市冷源,精确阻断热节点,进一步根据冷节点挖掘潜在廊道,借助福州市绿地系统中景观防护带的建设增加城市通风廊道。(3)强化网络集群内部冷岛源地间的组织串联,以建成区外围的天然山脉、河流水系等大型冷岛源地为基础形成空间镶嵌布局,以提高连通效率,达到更好的降温效果。(4)提升人口密集区的蓝绿空间可达性,在主城核心区可以通过打造口袋公园或串珠公园、提高街道绿化率等方式增加蓝绿空间,以调节供需平衡,满足居民日常需求。

在全球变暖趋势持续加剧的背景下,推行基于自然的降温解决方案成为学界的广泛共识,蓝绿空间作为改善城市热环境的关键载体应得到合理的规划、保护和开发利用。本研究统筹考虑了绿地、水体等开敞空间的景观连通性与环境公平性,对城市蓝绿空间的规划布局进行了系统优化,生成了“点-轴-面-网”一体化的冷岛网络格局。然而,新增蓝绿空间布局点的规模大小以及三维形态特征对网络连通性、服务供需与降温效果的影响也是蓝绿空间体系规划建设时考量的重要因素。后续将在已有研究的基础上,结合复杂网络、景观生态学理论方法,考虑新增蓝绿空间斑块的规模形态、组合关系与景观格局对冷岛网络降温效应的影响以及居民需求差异性和空间异质性,并通过情景分析对蓝绿空间布局进行仿真模拟与方案优选,从而在多尺度层面进一步探究缓解热岛效应的有效措施。

参考文献(References):

- [1] 江颂, 彭建, 董建权, 程雪雁, 丹宇卓. 地表城市热岛效应的概念内涵与定量刻画. 地理学报, 2022, 77(9): 2249-2265.
- [2] 沈中健. 厦门市建设用地功能区的热环境分异研究. 地理科学, 2022, 42(9): 1627-1637.
- [3] 金贵, 贺念慈, 刘志远, 王瑞, 张正昱. 共享社会经济路径下长江经济带国土空间模拟预测与布局优化. 生态学报, 2024, 44(18): 8084-8093.
- [4] 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.
- [5] 王立果, 白永平, 梁建设, 张春悦, 荆林祥, 杜娅明, 邹嘉斌. 基于形态学的城市建成区绿色空间与地表热岛演化关系研究. 地理研究, 2024, 43(3): 754-775.
- [6] 王世豪, 孙朝阳, 黄麟, 徐新良, 师华定, 韩冬锐, 谷庆宝, 刘寒冰. 城市绿地景观结构对夏季城市热环境的影响. 生态学报, 2024, 44(24): 11163-11176.
- [7] 杨高原, 余兆武, 张金光, 刘红晓, 金贵, 居阳, 洪波, 赵卓慧, 张理卿, 姚希晗, 马文娟, 熊浚祺, 邵钰涵, 姜斌. 暴露生态学视角下绿地暴露健康效益研究进展. 生态学报, 2024, 44(14): 5914-5924.
- [8] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 郭柏枢, 杨俊. 2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征. 地理学报, 2018, 73(7): 1242-1252.
- [9] 宋琼, 金贵. 共享社会经济路径下湖北省土地利用结构预测及启示——基于 CGE 模型的实证研究. 自然资源学报, 2024, 39(2): 411-425.
- [10] Shen Z J, Zhang B H, Xin R H, Liu J Y. Examining supply and demand of cooling effect of blue and green spaces in mitigating urban heat island effects; a case study of the Fujian Delta urban agglomeration (FDUA), China. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109187.
- [11] Wang Y S, Ouyang W L, Zhang J Q. Matching supply and demand of cooling service provided by urban green and blue space. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2024, 96: 128338.
- [12] Li Y Y, Wang S M, Zhang S J, Wei M, Chen Y S, Huang X Y, Zhou R. The creation of multi-level urban ecological cooling network to alleviate the urban heat island effect. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 114: 105786.
- [13] 吴健生, 何海珊, 胡甜. 地表温度“源—汇”景观贡献度的影响因素分析. 地理学报, 2022, 77(1): 51-65.
- [14] 金贵, 郭柏枢, 成金华, 邓祥征, 吴锋. 基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架. 地理学报, 2022, 77(3): 534-546.
- [15] 李建春, Chen Y Wendy, 袁文华. 城市蓝绿空间降温绩效评估及提升策略——以北京市为例. 地理科学, 2024, 44(8): 1376-1386.

- [16] Qian W Q, Li X Y. A cold island connectivity and network perspective to mitigate the urban heat island effect. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 94: 104525.
- [17] 李程蓉, 陈天. 缓解城市热环境的多层级“源-汇”景观网络构建. *生态学报*, 2023, 43(8): 3068-3078.
- [18] Sun J X, Feng L, Feng H R, Zhou Y N. Exploring the regional cooling efficiency of urban residential vegetation using scenario simulation. *Science of the Total Environment*, 2024, 955: 176843.
- [19] Hu N L, Wang G D, Ma Z J, Ren Z B, Zhao M L, Meng J C. The cooling effects of urban waterbodies and their driving forces in China. *Ecological Indicators*, 2023, 156: 111200.
- [20] 梁胜, 陈存友, 胡希军, 张伟, 刘路云. 高密度建成区湖滨建筑空间形态对湖泊热缓释效应的影响情景模拟. *生态学报*, 2022, 42(9): 3759-3770.
- [21] Liu Y J, Chen H X, Wu J L, Wang Y F, Ni Z B, Chen S Q. Impact of urban spatial dynamics and blue-green infrastructure on urban heat islands: a case study of Guangzhou using Local Climate Zones and predictive modeling. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 115: 105819.
- [22] Yang F, Yang D D, Zhang Y, Guo R, Li J Y, Wang H C. Evaluating the multi-seasonal impacts of urban blue-green space combination models on cooling and carbon-saving capacities. *Building and Environment*, 2024, 266: 112045.
- [23] Liang H L, Yan Q, Yan Y J, Zhang Q P. Using an improved 3SFCA method to assess inequities associated with multimodal accessibility to green spaces based on mismatches between supply and demand in the metropolitan of Shanghai, China. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 91: 104456.
- [24] Liang H L, Yan Y J, Yan Q, Zhang Q P. A planning framework to explore shortages and improvements of urban green space provision at the metropolitan scale using novel nSFCA proximity indices. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111822.
- [25] 汪淼, 陈振杰, 周琛. 城市绿色开敞空间可达性研究——以南京市中心城区为例. *生态学报*, 2023, 43(13): 5347-5356.
- [26] Lu Y T, Chen R N, Chen B, Wu J Y. Inclusive green environment for all? An investigation of spatial access equity of urban green space and associated socioeconomic drivers in China. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 241: 104926.
- [27] 陈慧灵, 杨雪珂, 袁梦, 王振波. 长株潭都市圈绿色空间分布特征及其公平性. *生态学报*, 2025, 45(5): 1-13. <https://doi.org/10.20103/j.stxb.2024.04230904>.
- [28] Li Q M, Zheng J P, Yuan S, Zhang L X, Dong R M, Fu H H. RAV model: Study on urban refined climate environment assessment and ventilation corridors construction. *Building and Environment*, 2024, 248: 111080.
- [29] Wang W W, Wang D, Chen H, Wang B Y, Chen X. Identifying urban ventilation corridors through quantitative analysis of ventilation potential and wind characteristics. *Building and Environment*, 2022, 214: 108943.
- [30] 方云皓, 顾康康. 城市通风廊道研究综述. *生态学报*, 2024, 44(13): 5444-5458.
- [31] 董寅, 金贵, 邓祥征. 中国国土空间布局优化研究. *地理学报*, 2024, 79(3): 672-687.
- [32] 姜虹, 彭建. 自然保护区连通网络构建与优化的方法及前瞻. *地理学报*, 2024, 79(9): 2176-2190.
- [33] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 苏冲, 张文新. 面向居民生态福祉的国土空间生态网络构建——以临沂市为例. *生态学报*, 2022, 42(21): 8650-8663.
- [34] 陈娱, 王峰, 陆玉麒. 长江干线过江公路发展过程及其区域连通能力评价. *地理科学*, 2023, 43(10): 1691-1700.
- [35] Jian L, Xia X J, Liu X Y, Zhang Y, Wang Y Q. Spatiotemporal variations and multi-scenario simulation of urban thermal environments based on complex networks and the PLUS model: a case study in Chengdu central districts. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 115: 105833.
- [36] Luo Y H, Zhu Z C, Wu J S, Zhang Y N, Li X C, Zhao W Q, Yuan Y, Duanmu Z Y, Li M Y. Exploring habitat patch clusters based on network community detection to identify restored priority areas of ecological networks in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 78: 127771.
- [37] Lu Y C, Huang D, Liu Y L, Zhang Y, Jing Y, Chen H T, Zhang Z Y, Liu Y F. Exploring the optimization and management methods of ecological networks based on the cluster mode: a case study of Wuhan Metropolis, China. *Land Use Policy*, 2024, 137: 107021.
- [38] Zeng P, Shi D C, Liu Y Y, Tian T, Che Y, Helbich M. Parks may not be effective enough to improve the thermal environment in Shanghai (China) as our modified H3SFCA method suggests. *Building and Environment*, 2024, 253: 111291.
- [39] Chen Y Y, Men H L, Ke X L. Optimizing urban green space patterns to improve spatial equity using location-allocation model: a case study in Wuhan. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 84: 127922.
- [40] Liu F, Liu J, Zhang Y Q, Hong S P, Fu W C, Wang M H, Dong J W. Construction of a cold island network for the urban heat island effect mitigation. *Science of the Total Environment*, 2024, 915: 169950.
- [41] Yue X P, Liu W, Wang X W, Yang J T, Lan Y X, Zhu Z P, Yao X. Constructing an urban heat network to mitigate the urban heat island effect from a connectivity perspective. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 114: 105774.
- [42] Yu Z W, Ma W Y, Hu S Y, Yao X H, Yang G Y, Yu Z W, Jiang B. A simple but actionable metric for assessing inequity in resident greenspace exposure. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110423.
- [43] 吕佩锦, 刘艳中, 陈勇, 张祚, 吴丹, 孙秋雨, 彭莎. “盲区削减”与“功能结构协调”双目标导向下的生态网络协同优化研究——以武汉市为例. *生态学报*, 2025, 45(1): 420-433.
- [44] 幸丽君, 杜赛南, 全照民, 张蕾. 环境正义视阈下城市公园绿地时空可达性及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(13): 5370-5382.
- [45] 冯姗姗, 陈怡沁, 寇晓丽, 李成, 常江. 基于城市公园绿地公平性提升的非正式绿地更新时序研究——以徐州市鼓楼区为例. *生态学报*, 2024, 44(20): 9173-9182.