基于热网络模拟的缓解城市高温的生态规划*

——以广州-佛山都市圈为例

潘丽宇[1] 甘文泉[2,3] 陈金留[4,5] 冼欣颜[6]

1 澳门城市大学创新设计学院 澳门 999078
2 西交利物浦大学设计学院 江苏苏州 215028
3 英国利物浦大学环境科学学院 英国利物浦 L69 3BX
4 中国-葡萄牙文化遗产保护科学“一带一路”联合实验室 江苏苏州 215000
5 苏州城市学院设计与艺术学院 江苏苏州 215000
6 英国格拉斯哥大学地理与地球科学学院 英国格拉斯哥 G12 8QQ

摘要：快速城市化引发了城市热岛效应，且都市圈的融合发展加剧了城市的热脆弱性。为提升城市气候韧性并缓解城市高温，文章提出基于“源-走廊-网络”的生态规划方法，通过识别核心热源、打破热蔓延关键节点和计算生态空间降温阈值的方法为缓解城市高温的生态规划策略提供决策支持，并并以广州-佛山都市圈为案例对该生态规划方法进行模拟和验证。结果表明：1）广州和佛山交界处高强度开发的城市建成区域具有最高的热风险；2）基于热网络模拟确定了 38 个热源斑块、80 条不同优先级的热廊道和 110 个热浪蔓延的关键节点；3）生态景观的破碎度和连通性对地表温度有较大的影响。最后，从热源斑块、热蔓延廊道节点和降温阈值 3 个方面提出针对性的生态规划策略，即增加生态用地比例、增强景观连通性、提高景观复杂和多样性。

关键词：城市高温；城市热网络；气候韧性；生态规划
DOI：10.12169/zgcsly.2024.06.26.0004

Ecological Planning for Mitigating Urban Heat Based on Thermal Network Simulation: A Case Study of Guangzhou-Foshan Metropolitan Area

Pan Liyu[1] Gan Wenquan[2,3] Chen Jinliu[4,5] Xian Xinyan[6]

(1. Faculty of Innovation and Design, City University of Macau, Macau 999078, China; 2. School of Design, Xi'an-Jiaotong Liverpool University, Suzhou 215028, Jiangsu, China; 3. School of Environmental Sciences, University of Liverpool, Liverpool L69 3BX, UK; 4. China-Portugal Joint Laboratory of Cultural Heritage Conservation Science, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 5. School of Art and Design, Suzhou City University, Suzhou 215000, Jiangsu, China; 6. School of Geographical & Earth Sciences, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK)

Abstract: Rapid urbanization has intensified the urban heat island effect, and the integrated development of metropolitan areas has further exacerbated urban thermal vulnerability. This study proposes an ecological planning approach based on a “source-corridor-network” framework to enhance urban climate resilience

收稿日期：2024-06-26
* 基金项目：中国-葡萄牙文化遗产保护科学“一带一路”联合实验室资助项目（SDYY2411）
第一作者：潘丽宇（2000- ），女，博士，研究方向为健康城市、城市气候和生态规划。E-mail：U23092120084@cityu.edu.mo
通信作者：甘文泉（1994- ），男，博士，研究方向为城市更新、区域规划与可持续发展、城市生态规划和老龄友好城市。E-mail：Wenquan.Gan@liverpool.ac.uk

and reduce high temperatures. This approach provides decision-making support for urban heat mitigation by identifying core heat sources, disrupting key nodes of heat propagation, and calculating the cooling thresholds for ecological spaces. The approach is then simulated and validated with the case of Guangzhou-Foshan metropolitan area. The key findings are: 1) The highest heat risk is concentrated in densely built areas along the Guangzhou-Foshan boundary; 2) Thermal network simulations identify 38 heat source patches, 80 thermal corridors with different priority levels, and 110 key nodes for heat wave propagation; and 3) The fragmentation and connectivity of ecological landscapes significantly impact land surface temperature, followed by landscape proportion and diversity in composition. Based on these findings, the targeted strategies for ecological planning are proposed from the 3 aspects of heat source patches, heat propagation nodes and cooling threshold, including increasing the proportion of ecological land, enhancing landscape connectivity, and improving landscape complexity and diversity.

Keywords: high-temperature city; urban thermal network; climate resilience; ecological planning

快速城市化导致了城市生态调节能力减弱和极端高温加剧，对健康、经济和生态系统带来挑战[1-2]，而都市圈的发展亦使该问题愈发严峻[3]。我国诸多城市热脆弱风险上升并威胁着城市的可持续发展[4]。

在这一背景下，增强气候韧性和优化生态环境已成为当前城市建设的核心议题。现有研究多聚焦于不同土地利用类型的降温效果，主要包括：1）景观格局指数所表征的斑块大小、形状、类型、组成和布局等特征与降温效率的关系[5]；2）量化不同生态用地比例的降温阈值[6]。但此类研究忽视了整体生态空间布局的实际应用，限制了其对气候韧性规划的指导作用[7]。当前的生态网络建设以修复城市生态为主要目标[8-9]，鲜有讨论其对区域降温的影响。然而，生态空间的增加面临着诸多限制，尤其在包括老城区、中心商务区等高密度的城市建成环境中，难以通过增设大规模的生态空间以缓解城市高温。因此，识别城市降温的关键节点进行生态用地的优先部署对于缓解城市高温具有重要意义。

基于这一背景，本研究采取逆向思维过程，提出基于“源-走廊-网络”的生态规划方法，通过城市热网络模拟研判实施生态空间部署的关键节点。该方法旨在通过城市热网的关键节点部署生态斑块阻止城市热源之间的连接，进而有效地防止城市热岛和热网络的形成。本研究选取广州-佛山都市圈为案例对该生态规划方法进行验证，以期改善城市热环境及为推动我国城市气候韧性建设提供参考。

1　基于“源-走廊-网络”的生态规划理论方法

1.1　城市热网络构建的理论基础

生态网络构建研究方法包括识别源地、构建阻力面和建立廊道。城市高温环境亦可以被视为一种“热”景观而采用相同方法，以城市热源的空间布局和热浪连通性为主要指标对城市热环境中能量传播的流动性和随机性进行模拟[10-11]。城市热岛强度会随着高温区域连通性的增强而加剧，可通过阻断热网连接实现降温[7,11]。因此，通过在热浪传播的关键节点和主要路径上制定生态规划方案以打破热浪传播将对缓解城市高温具有重要意义。本研究所提出的热网络模拟方法可分为以下步骤：

1）城市热源和连通性识别。生态源地被形态空间模式分析（MSPA）提取为前景并分为 7 类[8]，本研究在地表热环境的背景下对其重新定义（表 1）。核心区作为高温源地在城市热岛效应的空间格局中占有重要地位，是城市热网络形成的高风险区域。在图论理论中，斑块重要性和景观连通性可以通过连接概率、斑块重要性指数和综合连接度指数进行评估[10-11]。连通性可用于定义“热”景观中重要“热源”之间的互联强度[12]，连通性越高的“热源”越能支持“热网络”的形成和热能量的扩散。

2）城市热网络蔓延阻力面构建 。生态廊道建设中的阻力衡量了物种在生境间移动时受阻的程度。同理，在城市热环境中，热网络蔓延阻力面描述了热量在不同区域间扩散的难易程度。土

表 1 城市热网络构建中的空间模式类别及相关定义[8,10]

类别	生态景观	热景观
核心区(Core)	为生物提供栖息地,为生态源的大型区域	与非热岛区域的距离大于边缘宽度的热岛区域,可视作热源
桥接区(Bridge)	连接两个及以上核心区的狭窄区域,作为生态网络的走廊促进物种迁移	作为连接多个核心热源之间的连接器
岛状斑块(Islet)	小的、孤立的生态斑块	孤立的热补丁,面积小且不能被视为核心区域
环道区(Loop)	连接同一核心区域内斑块的生态走廊,促进物种移动和能量交换	与桥接区相似,但环道区为连接同一核心区域的不同部分并促进热扩散
边缘区(Edge)	核心区与非生态景观区之间的过渡带	定义了核心区域的外边界并影响热交换
孔(Perforation)	核心斑块内的非自然区域,表现出边缘效应	与边缘区类似,但对应于一个核心区域的内边界,有边缘效应
支线(Branch)	仅有一侧连接到边缘区、桥接区、环道区或孔的区域	来自热岛区域但没有到达另一端核心区域的细长、连续的像素

地覆盖、地形和植被特征均被证实对地表温度具有重要影响[6,13]。因此，本研究采用土地覆盖类型、数字高程和植被覆盖度 3 个指标作为热网络蔓延阻力面的构建因子。

3）提取城市热网循环的廊道和节点。生态源地之间物质和能量流动的最佳路径被称为生态廊道，多使用最小累积阻力模型（MCR）来提取[8]，在热网络模拟中也可采用此方法。电路理论能够模拟连续介质中热扩散的传导过程，与热量在城市环境中的传播相似[10-11]。在热网络中，热廊道是热扩散的路径，节点是廊道内热流最强烈的区域且是热扩散的重要助力，而生态空间则被视为减缓或阻止热扩散的障碍点。

1.2 基于景观格局指数量化生态斑块降温效果理论基础

景观格局指数是一种直观的形态定量指标，高度概括了景观形态、空间布局和结构组成等[14]。本研究将景观指标分为 4 类以全面量化斑块特征：1）斑块数量和大小；2）斑块形状复杂性；3）斑块分布和碎片化；4）斑块组成多样性[12,15]（表 2）。

表 2 景观格局指数定义

指标类型	因子名称	定义
斑块数量和大小	斑块密度(PD)	斑块密度描述了斑块的数量和密度,量化了景观中的碎片化程度
	有效网格面积(MESH)	有效网格面积是景观中斑块面积的平方和与整个景观面积的比例
斑块复杂性	景观形状指数(LSI)	随着景观形状趋于更不规则和/或景观内边缘长度的上升,景观形状指数呈上升趋势且没有上限
斑块分布和碎片化	蔓延度指数(CONTAG)	蔓延度描述了不同斑块类型在景观中的团聚程度或延伸趋势,其高值表示景观中某种占优势的斑块类型形成了良好的连通性,而低值则表示景观高度碎片化
	聚合度指数(AI)	聚合指数评估了不同景观类型的斑块之间的连接程度,其数值变化表明了景观的离散程度
斑块组成多样性	香农多样性指数(SHDI)	香农多样性指数=0 表示单个斑块构成了整个景观,而其数值的增加表明斑块类型的增加或斑块类型在景观中的分布更加平衡

1.3 基于“源-走廊-网络”的生态规划步骤

本研究提出的基于“源-走廊-网络”的生态规划方法包含 3 个步骤（图 1）。第一步，引入网络视角，以图论和电路理论模拟城市热网络，识别热走廊和阻碍地表热蔓延的关键节点。第二步，使用回归分析拟合不同景观格局指数与地表温度的关系，评估蓝绿空间特征对地表温度的影响。第三步，依据关键节点和景观格局的降温效果制定生态规划策略，通过在节点上部署生态空间阻断热网络的连接，进而在区域尺度下实现降温效果。

2 基于“源-走廊-网络”的生态规划方法验证

2.1 研究区域概况及数据收集

广州-佛山都市圈位于珠江三角洲城市群中心，因其建设快速和人口密集导致城市热岛效应明显。因此，本研究选取该区域作为案例，以验证所提出的生态规划方法是否可行（图 2）。

研究中使用的数据如下：1）MODIS 3 级地表温度产品，包括 MOD11A2 和 MYD11A1，空间分辨率均为 1 km。根据气象记录，7 月为广州-佛山都市圈地区最热月份。通过 Google Earth Engine

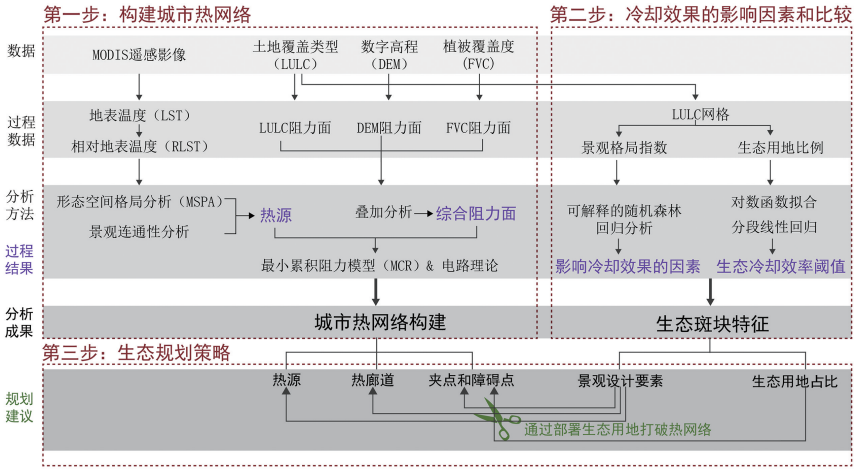


图 1　研究方法框架

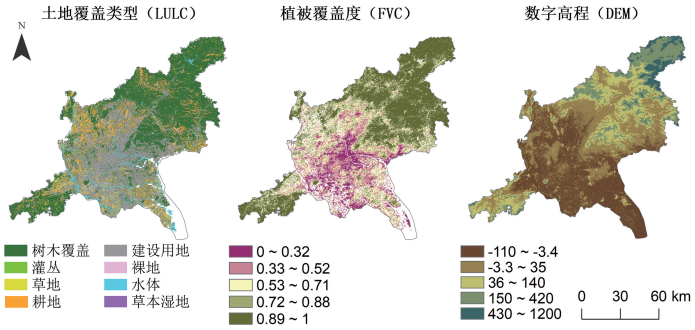


图 2　研究区域概况

进行云掩膜、质量检查、中值合成、温度缩放和空间裁剪等预处理，获取 2014、2018 和 2022 年 7 月的地表温度数据。2）10 m 分辨率的土地覆盖类型数据来自 World Cover 数据集。3）30 m 分辨率数字高程数据来自地理空间数据云。4）7 月 250 m 分辨率的植被覆盖度数据来自国家青藏高原科学数据中心。

2.2　城市高温时空格局模拟

2.2.1　相对地表温度的量化

相对地表温度（RLST）的量化有助于识别城市热岛效应中的高风险区域，并为后续进行 MSPA 运算以识别热源奠定基础。计算公式为：

$$RLST_i = LST_i - \overline{LST} \quad (1)$$

式（1）中：下标 i 代表了像素位置，$RLST_i$ 为像素 i 的地表温度；LST_i 为像素 i 的地表温度；$\overline{LST}$ 为 LST 的平均数。

相对地表温度（RLST）相比于表征每日或每月的地表温度（LST）更能反应研究区域的空间格局，具有更好的可比性[8]。本研究根据公式（1）对 RLST 进行计算以量化热岛强度，并将其分为 5 个类别（高强度：RLST≥6 ℃；次高强度：3 ℃ ≤RLST<6 ℃；中等强度：－3 ℃ ≤RLST<3 ℃；次低强度：－6℃ ≤RLST<－3 ℃；低强度：RLST<－6 ℃），以可视化时空动态变化。

2.2.2　景观指标的量化与地表温度 LST 的拟合

土地覆盖类型数据被重新分类为生态土地和非生态土地，其中生态土地（树木、灌丛、草地、水体和草本植被）赋正值，非生态土地（农田、建设用地和裸地）赋负值。重分类后的土地覆盖类型数据被格网化为 5 km×5 km 的单元，用 Fragstats 4.2 软件计算生态景观格局指数。随后，网格内生态土地的比例和地表温度中位数被统计，并筛除不完整数据，最终生成了 330 个具有景观格局指数和相应地表温度的格网。

本研究以 2022 年为例，采用可解释的随机森林回归方法解析景观格局指数与地表温度的关系。随机森林对处理复杂的非线性关系具有优势且对多变量间共线性不敏感[16]，而 SHAP（shapley

additive explanations）方法可以反映每个特征的影响力和确定正负影响方向，从而解析“黑盒”机器学习模型背后的机制[17]。随后，基于对数函数拟合的方法研究生态用地比例与地表温度之间的非线性关系。为减少山地等非目标因素对地表温度的强影响，仅保留高于地表温度中位数的数据点。以 0.1 为步长，计算对数函数在不同生态用地比例值下的导数，并寻找绝对值最接近零的点，将其标识为生态用地比例降温阈值，即此时生态用地比例增加对地表温度下降速率减小影响较小。

2.3 构建城市热网

2.3.1 热源识别

本研究使用 MSPA 对像素级别图像进行处理以分析地表热环境的连通性，将 RLST 大于 3 ℃的像素作为前景，其余作为背景。随后使用 Conefor Sensinode 2.6 软件包计算综合连通性指数，计算方法遵循公式（2）~（4）。本研究以斑块重要性指数（dPC）和整体连接度指数（IIC）的平均值作为综合连通性指数来评价热斑块的连通性。连通性高于平均值的斑块将被选为重要的热源。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_i\, a_j p_{ij}^{*}}{A_L^2} \qquad (2)$$

式（2）中：PC 为斑块间的连接度概率指数；n 为斑块数；a_i和 a_j表示进行运算的不同斑块的面积；A_L为研究区域总面积；$p*_{ij}$为热量在斑块之间扩散的可能性。

$$dPC = \frac{PC - PC_r}{PC} \times 100\% \qquad (3)$$

式（3）中：dPC 表示去除某一斑块后的热景观连通重要性；PC_r为去除某斑块后的连通性计算结果。dPC 值越高表示该斑块在热景观连通中的重要性越高。

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \frac{a_j\, a_i}{1 + n_{ij}}}{A_L^2} \qquad (4)$$

式（4）中：IIC 为整体连接度指数；n_{ij}表示用于连接斑块 i 和斑块 j 的最少链接数。

2.3.2 热浪蔓延阻力面

使用层次分析法（AHP）确定土地覆盖类型、数据高程和植被覆盖度的影响权重分别为 0.608 0、0.272 1 和 0.119 9。研究表明，在我国东部地区，以土地利用和土地覆盖为表征的人类活动是影响地表温度的主要因素，地形因素次之[11,14]。鉴于广州和佛山地区地形以丘陵平原为主，地形起伏较小，数据高程被赋予较低的权重。虽然地表温度也受自然因素驱动，但植被覆盖度的变化受到了更广泛土地利用变化的影响，因此植被覆盖度亦赋予较低的权重。由于建设用地和裸地对高温的贡献最大，其次是耕地、草地、林地和水体[18]。因此，在热浪蔓延阻力面模拟过程中，土地利用和土地覆盖中建设用地和裸地、农田、灌丛和草地、树木覆盖和湿地、水体分别赋 1、3、5、7、9 的阻力值。一般来说，海拔越低越可能形成城市热岛中心[19]。考虑到高度分布的不均匀性，采用几何间隔法对数字高程进行重分类，高地形被赋予高阻力值。植被覆盖度值越接近 1 表示植被越繁茂，而地表温度已被证明与植被覆盖度在空间分布上具有负一致性[20]，即植被覆盖度越高热传递阻力越高，因此，高植被覆盖度应赋予更高的阻力值。基于上述逻辑将阻力赋值后的土地利用和土地覆盖、数据高程和植被覆盖度进行叠加以形成综合热浪蔓延阻力面。

2.3.3 热浪蔓延廊道和关键节点

本研究使用 Linkage Mapper 3.0.0 工具箱来模拟热浪蔓延廊道、识别关键节点并区分廊道的优先级。热浪蔓延廊道的量化基于道路工具（linkage pathway）。廊道相对优先性评估基于优先性评级工具（linkage priority）。该工具计算出走廊特定优先级（CSP），该指标通过形状、接近度、大小和阻力值的加权组合来量化连接的相对优先级。随后，障碍点工具（barrier mapper）和夹点映射工具（pinchpoint mapper）分别用于识别障碍点对廊道质量和位置的影响，并评估热量蔓延过程中通过不同热廊道的总次数。将模拟计算结果与热廊道相交，通过自然分割法重新分类为 5 个类别，最后提取具有最高值的一类作为目标点。

3 验证结果

3.1 城市高温时空格局

如图 3 所示，广州–佛山都市圈内相对地表温度呈现中部高、东北和东南部次低的趋势。广州与

佛山的交界区聚集着主要的高强度热岛斑块（RLST≥6 ℃），存在较大的热岛效应风险。2014—2018 年，高强度城市热岛斑块面积急剧增加并从两市交界地区向外扩散，这可能受到了自 2015 年以来广州-佛山都市圈融合发展建设的影响[21]。尽管 2022 年高强度热岛面积较 2018 年有所减少，但仍高于 2014 年。通过对比图 3 和图 2 可发现城市热岛的形状、位置都与城市建成区域基本一致，说明建设用地变化对植被覆盖的改变对地表温度影响显著[22]。

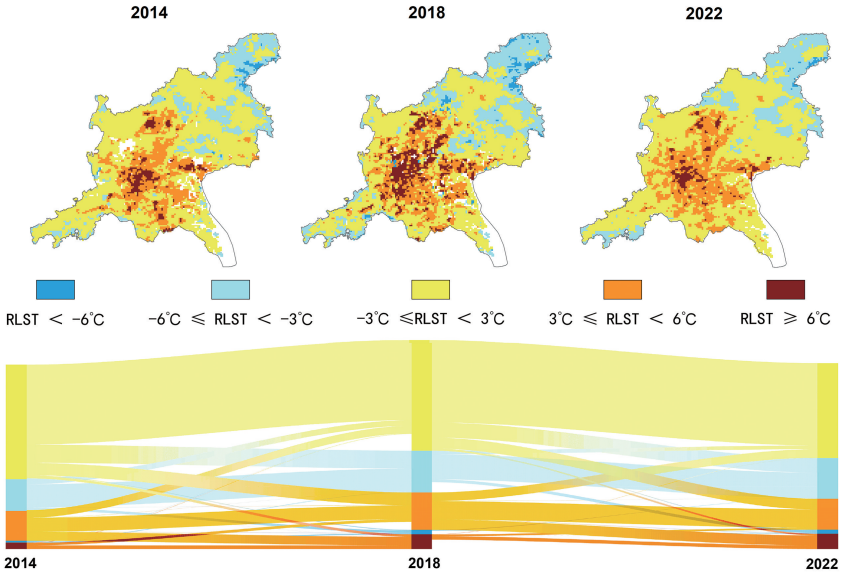


图 3　2014—2022 年广州-佛山都市圈相对地表温度的时空分布模式和变化

3.2　热网络构建

3.2.1　热源斑块识别

根据 MSPA 结果（图 4、表 3），核心区面积为 762 km^2，是热网络连接中的关键部分，主要位于广州和佛山交界处的高强度开发区域。禅城、南海和番禺等区域为核心热源，具有较高的极端高温事件风险。岛状斑块作为分散的城市热岛斑块，分布在每个区域，是城市的小型热源。桥接区作为第三大热景观类型，连接了顺德、禅城、荔湾、海珠、天河和白云的核心热源，揭示了这些区域显著的热蔓延现象。

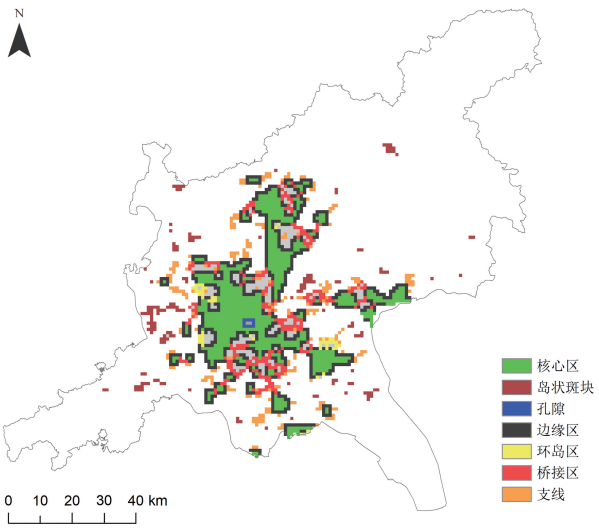


图 4　形态空间模式分析（MSPA）结果

表 3　MSPA 分类统计信息

分类	面积/km^2	前景比例/%	分类	面积/km^2	前景比例/%
核心	762	34.97	环岛区	51	2.34
岛状斑块	160	7.34	桥接区	280	12.85
孔隙	10	0.46	支线	246	11.29
边缘区	670	30.75	总计	2179	100

在图论理论中，核心对于网络的连通性和稳定性至关重要。本研究选择了 38 个核心热源并计算了它们对于热网络的重要性（图 5），更高的连通性指数表示更高的热蔓延风险。

3.2.2　热网络蔓延阻力面

根据热网络蔓延阻力面图（图 6）可知，由于广州-佛山都市圈建设和人类活动，城市建成区域构成了低阻力的大部分区域，而森林则构成了高阻力区域。东北和西南因地形和植被茂密呈高阻力。低阻力值集中在广州-佛山交界处，表明该区热岛连通性高，易发生热岛效应和极端高温，需重点关注。

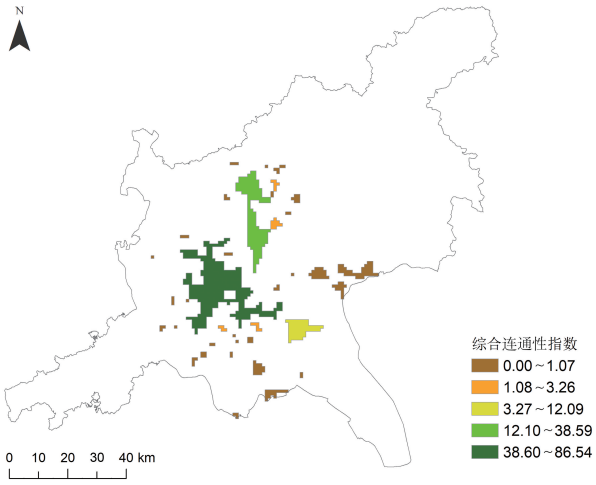


图 5 热网络连通性分析

3.2.3 热廊道和生态用地部署节点

根据热网络蔓延阻力面和热源分析结果构建了广州-佛山都市圈城市热网络（图 7），提取了 80 条热网络蔓延廊道。由优先性评级工具计算出了走廊特定优先级（CSP）。根据该指标结果，得到 22 条廊道为关键廊道（0.65≤CSP≤0.85），39 条为重要廊道（0.46≤CSP<0.65），19 条为一般廊道（0.14≤CSP<0.46），并确定了 11 个夹点和 99 个障碍点。为通过夹点和障碍点打破热网络，确定了 26 个网格单元作为蓝绿空间部署节点。经比较，热源中建设用地占据主导地位，开发强度大、密度高，难以大面积部署生态用地；而节点内生态用地占比相对较高，生态基础较好，更易于在原有基础上进行拓展。因此，二者策略应有区别侧重。在节点区域中部署生态用地以打破城市热网的连通性将使生态空间的建设更具针对性和降温效率[7]。

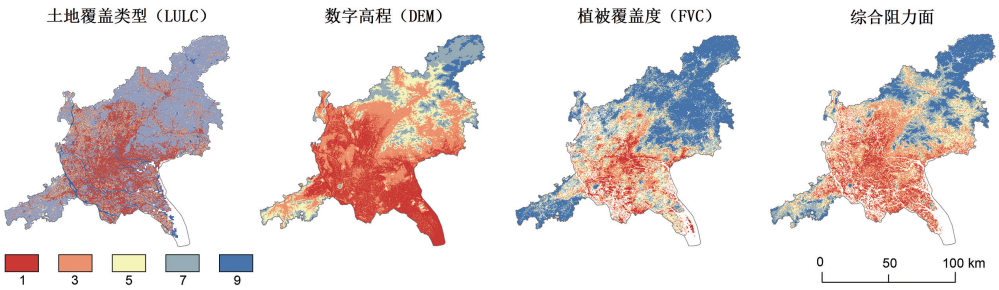


图 6 热网络蔓延阻力面构建

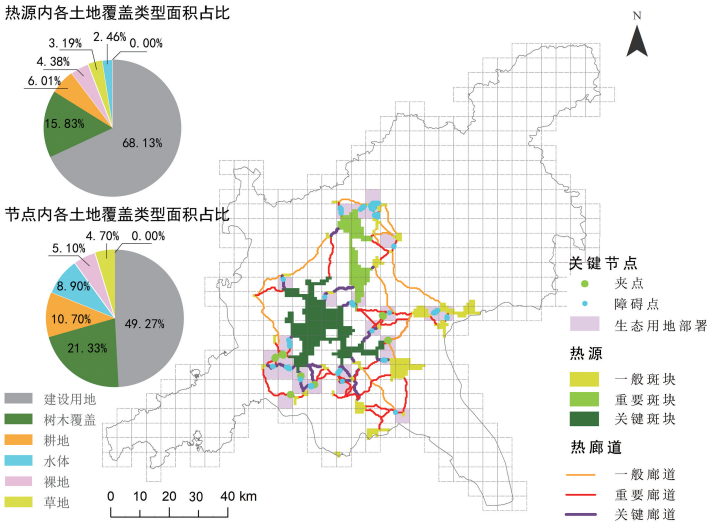


图 7 热网络构建结果

3.3 景观格局指数与地表温度的关系及景观格局指数影响力比较

由图 8 可知：景观格局指数对地表温度影响的重要性排序为斑块密度、聚合度指数、景观形状指数、有效网格面积、香侬多样性指数和蔓延度指数；斑块密度正向影响地表温度，聚合度指数负向影响显著，二者构成了地表温度的主要解释变量。景观形状指数影响弱且复杂，但支持了

既有研究中的观点，即复杂的景观形状可能带来一定的降温效应，但过度破碎化将导致地表温度升高[23]。尽管有效网格面积和香农多样性指数对地表温度的贡献较弱，但仍展示了较强的负向影响，这与采用其他研究方法的试验结果相一致[23]。本研究中的香农多样性指数仅计算生态斑块内部景观类型的多样性，其对地表温度的影响结果印证了既有研究中蓝绿融合空间对城市降温的双赢互动[24]。蔓延度指数的贡献最弱且方向不明确，可能与尺度效应相关[23]。总体上，斑块密度促进地表温度上升，聚合度指数的负向影响暗示生境破碎和连通性差，难以抑制地表温度上升。

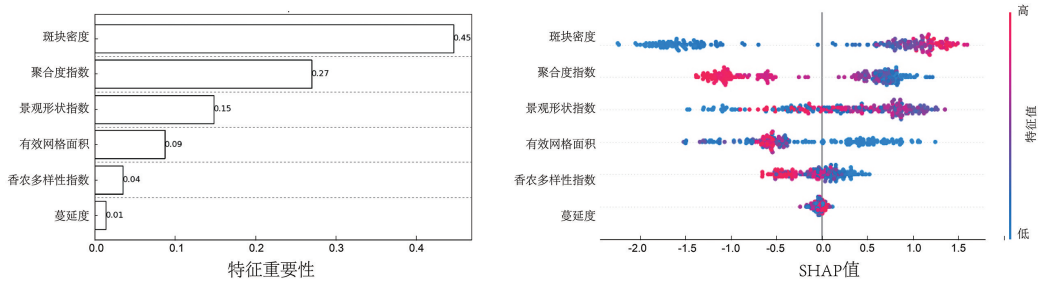


图 8　景观格局指数对地表温度的影响

3.4　阈值和冷却效果预测

采用对数函数拟合求导后发现斜率趋近于零的拐点位于（0.53，36.10），即潜在的生态用地部署面积的降温阈值（为 53%（图 9A），此时地表温度下降速率逐渐减小。在排除地表温度低于中位数的分析单元时发现，这些单元的生态用地面积占比均高于 71%，且对应较高的地形。高于该比例的生态用地在高度城市化区域往往并不常见，很可能是郊区的山地森林或大型生态公园。因此，71%这一节点可能仅适用于特定地理和环境条件，而非普遍适用的阈值。

基于拟合分析的结果，对所有网格的生态用地面积比例与地表温度进行分段线性回归分析（图 9B）。当生态用地面积比例（X）小于 0.53 时，地表温度（y）可近似表示为 $y=-10.90X+41.16$ 来近似表示。当 X 大于 0.53 而小于 0.71 时，$y=-8.41X+39.90$。在这一范围内，随着生态用地面积比例的增加，其对地表温度的降温作用呈现出减缓的趋势，这与先前研究中描述的蓝绿空间冷却效果存在“效率阈值”的概念相一致[25]，并与经济有效的热缓解生态规划密切相关[26]。然而，当 X 超过 0.71 时，地表温度下降（$y=-13.14X+43.32$）主要受高海拔影响，而非生态用地的直接冷却效应，再次验证了人为因素和地形因素对地表温度均有重要影响[18]。

热网络模拟确定的生态用地部署节点中的生态用地面积占比均低于 53%，生态用地面积占比每增加 10%，地表温度约降低 1.09 ℃。经计算（图 9C 和 9D），部署生态用地前广州-佛山都市圈的地表温度中位数为 34.01 ℃，而部署后为 33.76 ℃。

4　基于“源-走廊-网络”的生态规划策略

基于研究结果，从热源斑块、热蔓延廊道节点和降温阈值 3 个方面提出缓解城市高温的生态规划策略。

首先，热源斑块识别精准定位了研究区域中热岛效应最严重且具有高热风险的区域，需对其加强监测并防止斑块间热廊道的联通。针对这些高开发强度的“热源”区域，建议采取增加冷却屋顶、垂直绿化和微型公园等措施。

其次，热蔓延廊道的关键节点可作为生态空间部署的重点实施区域，可采取阻断或缩窄热蔓延廊道的方式以减少热传递和区域高温蔓延。例如，在规划层面将不同层级的生态廊道融入总体规划，在热廊道内设置绿色屏障以提高景观连通度。并从景观配置的角度对现有生态斑块进行优化，包括丰富植被类型、致密化现有植被、整合蓝绿空间等。

最后，基于生态空间面积占比降温阈值的分析，确定最佳降温效率的拐点为 0.53。建议关键节点处充分利用滨水空间、未开发裸地和稀疏草地，通过生态规划干预以提高植被覆盖度。从优

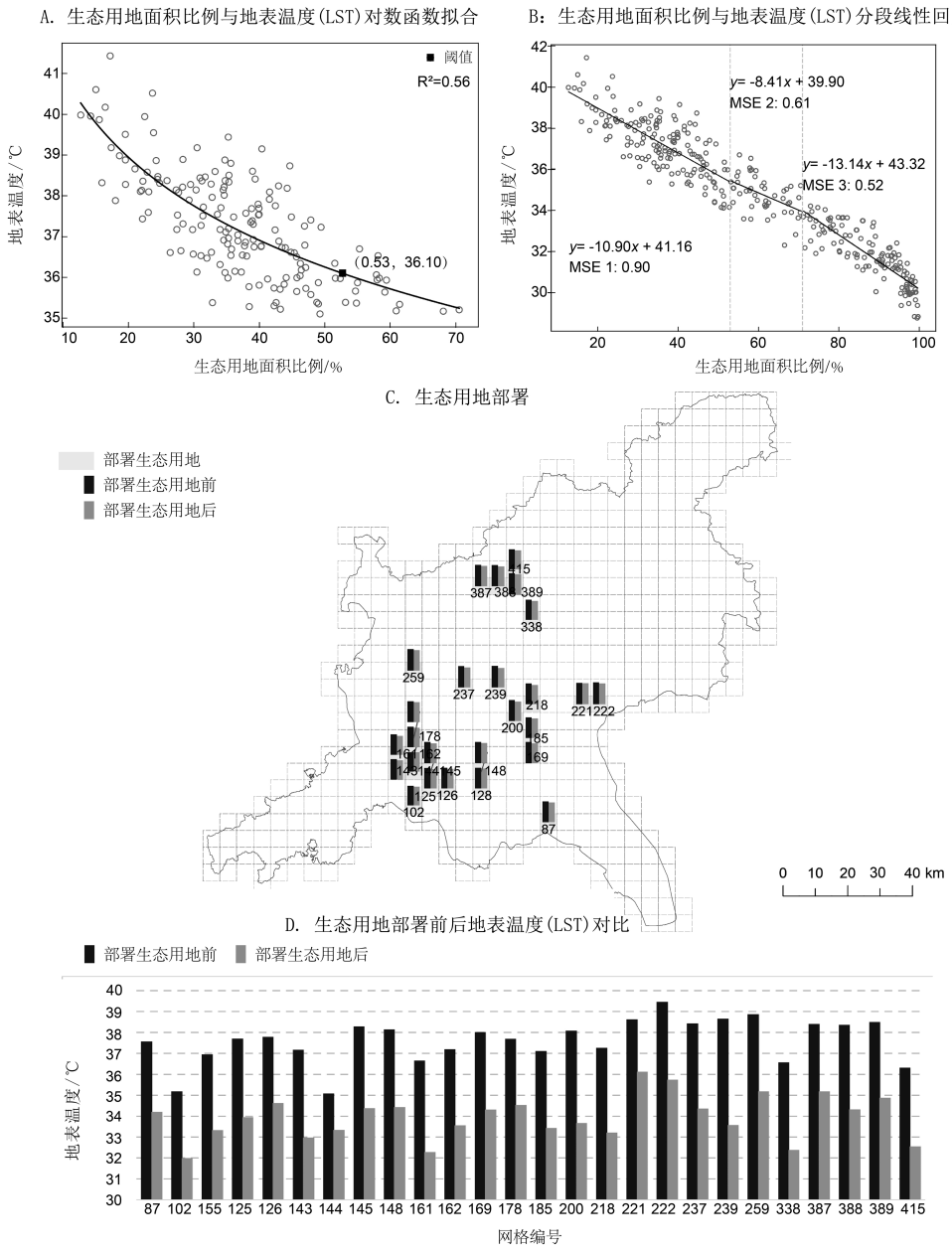


图 9 生态用地部署降温阈值分析

化景观布局的角度，在部署生态用地时应格外注意提高景观连通度、聚集度和整体形状的复杂性。

5 结语

经验证，本研究基于热网络连通性的视角，提出了基于“源-走廊-网络”的生态规划方法，不仅弥补了既有研究的局限，还提升了生态空间部署位置的准确性和优先性。此外，该方法将景观格局指数和生态空间面积的降温阈值应用在规划方案中，不仅揭示了降低景观破碎度和增强连通性是实现降温最有效的方式、丰富了景观组合的多样性和形状的复杂性，还提升了城市热缓解规划的可行性和应用性，为塑造具有气候韧性和良好生态的城市环境提供了参考。该生态规划方法主要依托遥感数据和 GIS 的科学应用，可以在不同的空间尺度上进行实践，未来研究需将当地的气候条件和地理特征纳入考量并调整，进而为生态规划提供更具针对性的决策支持。

参考文献

[1]韩贵锋,蔡智,谢雨丝,等.城市建设强度与热岛的相关性:以重庆市开州区为例[J].土木建筑与环境工程,2016,38(5):

138-147.

[2]郑颖生,李文婕,曾秋韵,等.岭南高密度城市高温适应规划设计策略:局地气候分区框架的应用[J].规划师,2023(6):93-98.

[3]邱国玉,张晓楠.21 世纪中国的城市化特点及其生态环境挑战[J].地球科学进展,2019,34(6):640-649.

[4]HE B J,ZHAO D X,DONG X,et al.Perception,physiological and psychological impacts,adaptive awareness and knowledge,and climate justice under urban heat:a study in extremely hot-humid Chongqing,China[J].Sustainable Cities and Society,2022,79:103685.

[5]ARAM F,GARCIA E H,SOLGI E,et al.Urban green space cooling effect in cities[J].Heliyon,2019,5(4):e01339.

[6]曹朔,刘晖,陈宇,等.基于空间连通性动态变化的城市绿地生态网络优化[J].中国城市林业,2023,23(4):23-32.

[7]ZHAO Z Y,LI W,ZHANG J L,et al.Constructing an urban heat island network based on connectivity perspective:a case study of Harbin,China[J].Ecological Indicators,2024,159:111665.

[8]PAN L Y,GAN W Q,CHEN J L,et al.An integrated model for constructing urban ecological networks and identifying the ecological protection priority:a case study of Wujiang District,Suzhou[J].Sustainability,2023,15(5):4487.

[9]雷雪,沈一,王倩娜,等.四川洪雅县森林破碎化分析及生态空间格局优化:基于 MSPA 与 MCR 模型分析[J].中国城市林业,2021,31(3):36-42.

[10]YU Z W,ZHANG J G,YANG,G Y.et al.Reverse thinking:a new method from the graph perspective for evaluating and mitigating regional surface heat islands[J].Remote Sensing,2021,13(6),1127.

[11]YU Z W,ZHANG J G,YANG G Y.How to build a heat network to alleviate surface heat island effect?[J].Sustainable Cities and Society,2021,74:103135.

[12]赵耀,龙彬,张菁.不同城市热岛梯度下公园冷岛效应和景观特征的关联机制[J].中国城市林业,2024,22(2):17-25.

[13]LIU Y,HUANG X,YANG Q Q,et al.The turning point between urban vegetation and artificial surfaces for their competitive effect on land surface temperature[J].Journal of Cleaner Production,2021,292:126034.

[14]TURNER M G.Landscape ecology:the effect of pattern on process[J].Annual Review of Ecology and Systematics,1989,20:171-197.

[15]ZHANG K H,YUN G L,SONG P H,et al.Discover the desirable landscape structure of urban parks for mitigating urban heat:a high spatial resolution study using a forest city,Luoyang,China as a lens[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2023,20(4):3155.

[16]LIAO W,GULDMANN J M,HU L,et al.Linking urban park cool island effects to the landscape patterns inside and outside the park:a simultaneous equation modeling approach[J].Landscape and Urban Planning,2023,232:104681.

[17]KAVEH N,EBRAHIMI A,ASADI E.Comparative analysis of random forest,exploratory regression,and structural equation modeling for screening key environmental variables in evaluating rangeland above-ground biomass[J].Ecological Informatics,2023,77:102251.

[18]SHAO L D,LIAO W L,LI P L,et al.Drivers of global surface urban heat islands:surface property,climate background,and 2D/3D urban morphologies[J].Building and Environment,2023,242:110581.

[19]TIAN H,LIU L,ZHANG Z Y,et al.Spatiotemporal differentiation and attribution of land surface temperature in China in 2001-2020[J].Journal of Geographical Sciences,2024(34):375-396.

[20]HUANG Q P,HUANG J J,YANG X N,et al.Quantifying the seasonal contribution of coupling urban land use types on urban heat island using land contribution index:a case study in Wuhan,China[J].Sustainable Cities and Society,2019,44:666-675.

[21]刘子长.广佛都市圈融合发展过程中的轨道交通特征研究[J].城市轨道交通研究,2018,21(11):5-9.

[22]杨军锋,胡伟平,赵英霞,等.广佛都市圈热场的空间格局分析[J].山东师范大学学报(自然科学版),2008,23(1):95-97.

[23]CHEN J Z,WANG L,MA L,et al.Quantifying the scale effect of the relationship between land surface temperature and landscape pattern[J].Remote Sensing,2023,15(8):1266.

[24]ZHOU W,CAO W,WU T,et al.The win-win interaction between integrated blue and green space on urban cooling[J].Science of the Total Environment,2023(863):160712.

[25]YU Z W,YANG G Y,ZUO S D,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.

[26]YU Z W,GUO X Y,JORGENSEN G,et al.How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities?[J].Ecological Indicators,2017(82):152-162.