

## 缓解城市热岛效应的南京市绿色基础设施网络构建方法

赵晨晓<sup>1</sup>, 刘春卉<sup>2</sup>, 魏家星<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学园艺学院风景园林系, 江苏南京 210095; 2. 南京农业大学人文与社会发展学院农村发展系, 江苏南京 210095)

**摘要:** 【目的】绿色基础设施网络作为覆盖城市的生态网络, 对于热岛效应有着重要的调节和改善作用。探究绿色基础设施构建方法并进行合理规划布局是改善城市热环境问题的有效措施。【方法】以江苏省南京市主城区为研究对象, 基于形态学空间格局分析, 选取连通性高、降温效应显著的“源”斑块, 将反映景观格局的景观格局指数和反映地表覆盖特征的地表降温率进行叠加并构建阻力面, 进而采用最小成本路径方法生成廊道。【结果】①识别出降温率高的 507 个核心区斑块, 结合景观连通性分析选择了 25 个斑块作为“源”斑块; ②基于最小成本路径方法识别出 20 条廊道, 与“源”斑块共同构建出以缓解热岛效应为导向的城市绿色基础设施网络; ③结合南京市绿地系统规划进行网络优化, 提出“三环、六带、多线”的总体空间结构。【结论】多种方法的综合运用使缓解热岛效应导向的绿色基础设施网络构建更加合理, 同时为建构绿色基础设施网络, 改善人居环境提供了新的研究思路与方法。图 5 表 6 参 27

**关键词:** 城市热岛; 绿色基础设施; 形态学空间格局分析; 网络构建

中图分类号: TU986 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)06-1127-09

## Green infrastructure network construction method for mitigating urban heat island effect in Nanjing

ZHAO Chenxiao<sup>1</sup>, LIU Chunhui<sup>2</sup>, WEI Jiaxing<sup>1</sup>

(1. Department of Landscape Architecture, School of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China; 2. Department of Rural Development, School of Humanities and Social Development, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] As an ecological network covering the city, green infrastructure (GI) network plays an important role in mitigating the heat island effect. The purpose of this study is to explore the construction method and reasonable planning and layout of GI, as well as effective measures to improve the urban thermal environment. [Method] The main urban area of Nanjing City in Jiangsu Province was taken as the research object. Based on the morphological spatial pattern analysis (MSPA), the “source” patches with high connectivity and significant cooling effect were selected. The landscape pattern index reflecting the landscape pattern and the surface cooling rate reflecting the surface coverage characteristics were superposed to construct the resistance surface. Then, the minimum cost path method was used to generate corridors. [Result] (1) 507 core patches with high cooling rate were identified, and 25 patches were selected as “source” patches based on landscape connectivity analysis. (2) 20 corridors were identified by the minimum cost path method. Together with the “source” patches, the urban GI network was constructed to mitigate the heat island effect. (3) The

收稿日期: 2021-01-07; 修回日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32001360); 中国科学院专项资金资助项目(XDA23020200); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20190545)

作者简介: 赵晨晓 (ORCID: 0000-0002-8932-3839), 从事风景园林规划与生态修复研究。E-mail: [xiqianws@163.com](mailto:xiqianws@163.com)。通信作者: 魏家星 (ORCID: 0000-0003-1246-0293), 副教授, 博士, 从事风景园林规划与生态修复研究。E-mail: [weijx@njau.edu.cn](mailto:weijx@njau.edu.cn)

network was optimized based on Green Space System Planning of Nanjing, and the overall spatial structure of “three rings, six belts and multiple lines” was proposed. [Conclusion] The comprehensive application of various methods makes it more reasonable to construct a GI network to mitigate the heat island effect, and provides a new research approach for building a GI network and improving urban living environment. [Ch, 5 fig. 6 tab. 27 ref.]

**Key words:** urban heat island; green infrastructure; morphological spatial pattern analysis(MSPA); network construction

随着中国城市化进入全面发展期，城市景观格局及其稳定性维护机制面临着巨大的人为改造压力<sup>[1]</sup>，如不透水地面增加，绿地和水体面积减少，景观破碎化加重等，以及人为热量排放等因素，使得城市热环境逐渐恶化<sup>[2]</sup>。目前，热岛效应已成为城市普遍面临的环境问题。绿色基础设施 (green infrastructure, 简称 GI) 在城市尺度上作为一种基础设施化的绿色空间网络，具有提供雨洪管理、气候调节、空气净化等生态系统服务的重要功能<sup>[3]</sup>，其要素中的绿地、水体大部分都具有“冷岛效应”<sup>[4]</sup>，可有效缓解热岛效应，提高城市应对气候变化的能力。通过多学科协作合理地规划布局城市绿色基础设施，对于改善城市热环境，进而指导城市的精明增长具有重要意义。目前，国内外学者主要运用实地观测、地表温度反演、数值模拟等 3 种手段，从不同侧重点出发对绿色基础设施的热环境效应展开相关研究。在基于气温实地观测来探讨绿色基础设施降温效应的相关研究方面，主要从城市绿地的面积与形状特征、植被结构特征、相关外部因素等 3 个方面深入探讨了影响绿地降温效应的主要因素<sup>[5]</sup>。实测研究大多集中在中小尺度，其中许多研究证实城市绿地与周边区域相比具有明显的降温效应<sup>[6-7]</sup>，绿地的类型、面积、形状及植被遮阴面积等是影响绿地降温效应的重要因素<sup>[8-10]</sup>。大尺度的研究需借助遥感反演和地理信息空间分析技术。研究表明：下垫面类型<sup>[11]</sup>、所在斑块特征、邻近降温斑块空间关系特征<sup>[12]</sup>等是影响热岛效应分布范围和强度的重要因素。总体而言，研究多集中在缓解热岛效应的各类要素特征层面，而如何通过对城市绿色基础设施的整合分析和前瞻性布局实现其整体降温效应最大化的相关成果鲜见。作为中国“三大火炉”城市之一的南京是夏热冬冷，兼具“山水林城”景观要素的城市。随着人口不断增多和城镇建设用地快速扩张，南京城市热岛效应日趋显著。在满足城市扩张需求的前提下，如何利用有限的绿色空间资源形成高效的绿色基础设施网络布局，缓解城市热环境的恶化，已成为南京快速城市化过程迫切需要解决的重要课题。本研究以快速城市化的南京市主城区为研究对象，通过选取绿色基础设施核心区斑块中降温效应贡献值较高、连通性强的斑块作为“源”斑块，利用景观格局特征与地表覆盖构建阻力面，并基于最小成本路径方法，识别出以“源”斑块为起点和终点的最小成本路径作为降温廊道，并在整合现有空间规划的基础上，研究以缓解热岛效应为导向的绿色基础设施网络构建方法，以期从改善城市热环境的角度为城市绿色基础设施网络构建与发展提供借鉴与参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

南京市位于中国东部长江中下游， $31^{\circ}14' \sim 32^{\circ}37'N$ ,  $118^{\circ}22' \sim 119^{\circ}14'E$ 。2018 年市域总面积为  $6\,587.02\text{ km}^2$ ，其中城镇常住人口为 685.89 万人，城镇人口占比高达 82.3%。气候为典型的北亚热带季风气候，四季分明，雨水充沛，春秋短而冬夏长。年温差较大，夏季平均气温为  $28.0^{\circ}\text{C}$  左右，极端日最高气温达  $43.8^{\circ}\text{C}$ 。

近年来，南京市主城区绿色基础设施不断被城市建设所侵占，城市热环境持续恶化。如何改善因城市建设而造成的绿色空间破碎，构建合理高效的绿色降温网络，是实现南京绿色发展和改善城市人居舒适度的重要课题。本研究选取南京市主城区为研究区域，包括玄武区、秦淮区、鼓楼区、雨花台区、建邺区 5 个中心城区以及栖霞区、江宁区、浦口区 3 个近郊区。这些区是南京市的核心区域，城市化水平高，经济发展迅速，具有典型的现代城市特征，也最能反映南京市热岛效应的真实状况。

### 1.2 数据来源与预处理

本研究采用南京市 2015 年 Landsat TM 影像数据 (来源于地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/>)，通

过单窗算法<sup>[13]</sup>进行温度反演，结合收集的气象资料，获得区域地表温度数据。使用 ArcGIS 10.2 对 2015 年南京土地利用数据结合现状调查资料(来源于南京市规划和自然资源局、南京市统计局)进行重分类后划分为耕地、林地、草地、水体、建设用地、裸地等 6 类，并将裸地温度作为标准地物温度，计算不同土地覆盖类型的降温率。

## 2 研究方法

### 2.1 绿色基础设施网络“源”斑块的识别与提取

使用 GUIDOS 软件的形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)对研究区斑块进行分析，得到 7 种景观连通类型：核心区、孤岛、边缘、穿孔、桥接区、环、支线，分别与地表温度叠加计算分析后，选取降温率突出、具有生境可利用性<sup>[14]</sup>的核心区作为“源”斑块的备选斑块。

城市景观格局是影响热岛效应强度和范围的重要因素<sup>[11]</sup>。景观连通性作为景观格局的重要部分，反映了绿色空间结构和功能特征，是衡量景观功能性的有效指标<sup>[15]</sup>。可能连通性指数( $P_C$ )的计算基于可能性模型，将生境斑块中的中间斑块参与到景观连通可能性的计算中，在此基础上计算出斑块重要值( $d_{PC}$ )，即每个斑块对于维持景观连通性的重要程度。

$$P_C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n a_i a_j p_{ij}}{AL^2}; \quad (1)$$

$$d_{PC} = \frac{P_C - P_{Cr}}{P_C} \times 100. \quad (2)$$

式(1)~(2)中： $a_i$  和  $a_j$  分别是斑块  $i$  和斑块  $j$  的贡献值(本研究中指面积)， $n$  表示斑块总数， $p_{ij}$  代表物种在斑块  $i$  和  $j$  直接扩散的最大可能性， $P_C$  为可能连通性指数值， $P_{Cr}$  为去除单个斑块后剩下的斑块的整体指数值。 $P_C$  计算值满足  $0 < P_C < 1$ <sup>[16]</sup>。

根据斑块重要值( $d_{PC}$ )，采用 Jenks 自然间断点分级法对斑块进行分级<sup>[17]</sup>，计算出不同等级斑块的平均降温率。结合前人对绿色基础设施要素与降温效应关系的分析与研究<sup>[18]</sup>，选取备选斑块中降温效果最优、分布较均匀、景观特征具有代表性且面积大于  $5 \text{ hm}^2$  的斑块作为“源”斑块。

### 2.2 基于最小成本路径的绿色基础设施网络构建

最小成本路径方法是根据用地耗费路径阻力值生成的空间上耗费成本最小的成本路径。本研究基于最小成本路径进行廊道识别，依据城市用地对热环境的缓解作用设置阻力值。由于城市景观格局与地表覆盖特征的改变被认为是城市热岛形成的直接原因<sup>[11]</sup>，因此需要计算获得能反映两者的指标值，即景观特征阻力值与地表覆盖阻力值。

①计算景观特征阻力值。景观格局指数可反映组成空间配置某些方面的特征<sup>[19]</sup>，因此初步选取斑块类型面积( $A_C$ )、最大斑块指数( $I_{LP}$ )、斑块密度( $D_P$ )、景观聚集度指数( $I_A$ )等 10 个景观格局指数，并利用 Fragstats 软件计算出各用地类型的景观格局指数。由于不同用地类型的景观特征差异较大，为选取最具代表性的景观格局指数，根据计算所得数据反映出的特征将用地类型划分为 2 类(地类 A 和 B)，再通过相关性分析筛选出与地表平均温度相关性显著的指数，最后利用熵值法计算各指数的权重。在熵值法中用  $P_{kl}$  表示第  $l$  个信息在第  $k$  类项目中的不确定度，则整个信息(设有  $z$  个数据)的不确定性为：

$$S_k = -K \sum_{l=1}^z P_{kl} \ln P_{kl}. \quad (3)$$

式(3)中： $S_k$  为第  $k$  类景观格局指数的熵值； $K$  为常数，取决于数据组数。

由于各指数对于景观特征阻力值的贡献度正负作用不同，取该指数与地表平均温度相关系数的正负值，并将各景观格局指数与权重相乘叠加计算得出各用地的景观特征阻力值：

$$L_m = S_{m,N_p} N_p + S_{m,L_{SI}} L_{SI} + S_{m,I_A} I_A. \quad (4)$$

式(4)中： $L_m$  为第  $m$  类用地的景观特征阻力值； $S_{m,N_p}$  为斑块数量( $N_p$ )与第  $m$  类用地所属地类相关系数

的符号, 正相关取值1, 负相关取值-1,  $S_{m,L_{SI}}$ 与 $S_{m,I_A}$ 同理;  $N_{Pm}$ 为第m类用地斑块数量( $N_P$ )叠加权重后的指数值, 景观形状指数( $L_{SI}$ )与景观聚集度指数( $I_A$ )同理。

②计算地表覆盖阻力值。将降温率数据用规范化标准化方法(min-max标准化方法)将数据标准化, 再根据热力过程对地表覆盖阻力值进行计算, 最终得到各用地的地表覆盖阻力值:

$$V_m = \frac{E_{Mm} - E_{Mmin}}{E_{Mmax} - E_{Mmin}} + 0.001; \quad (5)$$

$$F_m = \frac{1}{V_m}. \quad (6)$$

式(5)~(6)中:  $V_m$ 为标准化降温率;  $E_{Mm}$ 为降温率;  $E_{Mmax}$ 和 $E_{Mmin}$ 为该组降温率数据中的最大、最小值。为消除0值, 将标准化值+0.001。 $F_m$ 为第m类用地类型地表覆盖阻力值<sup>[20]</sup>, 为消除数据特性对阻力值的影响, 将阻力值限制为1~1 001。

③确定指数权重。根据熵值法计算景观特征阻力值与地表覆盖阻力值的权重后, 将其分别乘以对应的系数后叠加, 得到各用地的成本路径阻力值:

$$C_m = aF_m + bL_m. \quad (7)$$

式(7)中:  $F_m$ 为地表覆盖阻力值,  $L_m$ 为景观特征阻力值,  $a$ 、 $b$ 为两者的系数。

④绿色基础设施网络构建。“可扩展路径”是景观由源地向周围扩散的可能方向, 这些路径共同构成目标源景观的潜在生态网络<sup>[16]</sup>。降温网络则由“源”斑块及连接“源”斑块的廊道构成, 可以减少空气受阻程度, 保障空气交换的畅通, 尤其在应对城市热岛效应方面发挥重要作用<sup>[21]</sup>。根据上述研究选取降温“源”斑块作为成本路径的起点和终点, 为空间上不同的土地利用类型附上成本路径阻力值, 通过最小累积阻力(MCR)模型识别, 构建起“源”斑块之间的连接通道作为降温廊道, 最后结合南京市绿地系统规划获得优化后的城市绿色基础设施降温网络。

### 3 结果与分析

#### 3.1 “源”斑块识别提取结果

根据形态学空间格局分析方法与地表温度叠加分析计算可得出, 降温率从大到小依次为核心区、边缘、孔隙、桥接区、环、支线、孤岛(表1), 可见大型斑块对于城市热环境的改善效果较好, 而分散的小型城市绿地对热量消解贡献较小。基于生境可利用性, 选出507个核心区斑块作为“源”斑块的备选斑块。根据景观连通性重要程度的计算结果及Jenks自然间断点分级法的分级结果, 备选斑块被分为5个等级(表2), 其中第1等级和第2等级斑块数量最少, 重要程度最高, 分布较均匀, 包括南京市重要的绿色基础设施要素, 如长江、紫金山、玄武湖、老山、青龙山等区域; 第4等级和第5等级斑块在数量上更多, 在空间上多为分散的小型城市绿地(图1)。再结合各级斑块的降温率(表3)可知: 第1等级和第2等级斑块面积占比大、连通性强、降温率高, 因而选择第1等级和第2等级共25个面积大于5 hm<sup>2</sup>的斑块作为降温网络“源”斑块(图2)。

表1 7种类型地表温度分析

Table 1 Seven landscape connectivity types and their average temperature

类型	平均温度/℃	降温率/%	类型	平均温度/℃	降温率/%
支线	31.19	1.2	桥接区	30.90	2.1
边缘	30.42	3.6	环	31.02	1.7
孤岛	31.43	0.4	孔隙	30.42	3.6
核心区	29.02	8.0			

表2 斑块重要值分级

Table 2 Grading of cores by  $d_{PC}$  (delta PC decomposed) value

等级	斑块数/个	斑块重要值取值区间	连通性重要程度
第1等级	9	79.551 5~0.738 7	极强
第2等级	16	0.591 5~0.113 0	强
第3等级	76	0.084 8~0.009 2	中
第4等级	287	0.008 7~0.000 2	弱
第5等级	119	0.000 1~0.000 0	极弱

#### 3.2 基于最小成本路径的降温网络构建结果

通过不同用地类型的景观格局指数分析得知: 林地、草地、水体的景观格局指数所显现的特征相

似，被分为地类A；建设用地、裸地景观格局指数所显现出的特征相似，被分为地类B；耕地具有双重性质，被分为2个部分。将各景观格局指数与地类温度作相关性分析后（表4），选出斑块数量( $N_p$ )、景观形状指数( $L_{SI}$ )、景观聚集度指数( $I_A$ )等3个指数作为景观特征阻力值影响主要因素。依据3个指数对降温的正负作用及由熵值法确定的权重系数计算后可得出各用地类型的景观特征阻力值（表5）。

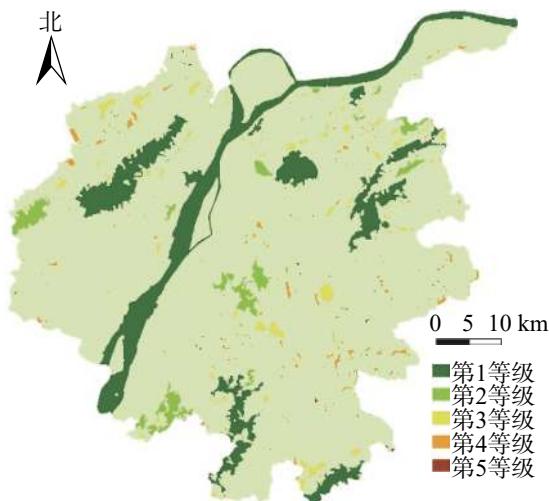


图1 核心区斑块重要值分级示意图

Figure 1 Grading of cores by  $d_{PC}$  value

表3 各级斑块地表温度分析

Table 3 Analysis of surface temperature of patches at different levels

等级	面积占比/%	平均温度/℃	降温率/%
第1等级	0.75	28.51	9.7
第2等级	0.12	29.17	7.6
第3等级	0.07	30.27	4.1
第4等级	0.05	30.38	3.7
第5等级	0.01	30.69	2.8

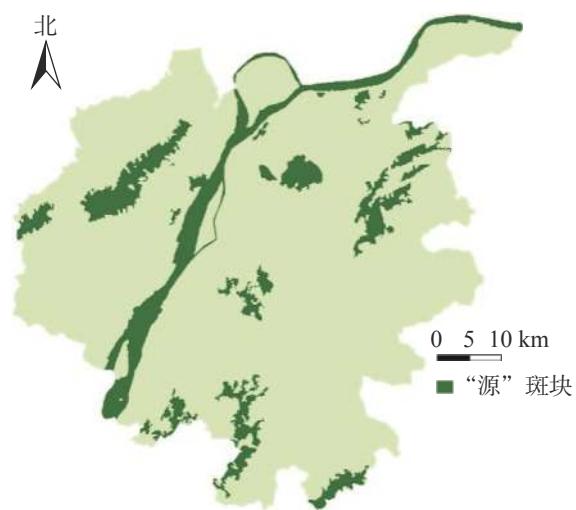


图2 降温“源”斑块选取示意图

Figure 2 Selection of cool “source” cores

表4 景观格局指数与地类温度的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between landscape pattern index and land type temperature

指数	地类A		指数	地类B	
	斑块类型面积	斑块所占面积		地类A	地类B
斑块数量	0.902	0.902	边界密度	0.865	0.248
斑块密度	-0.895	-0.895	景观形状指数	0.928	-0.871
最大斑块指数	0.709	0.352	边缘面积分维数	0.782	-0.989
			斑块凝聚度	0.552	0.326
			景观聚集度	-0.939	0.843

表5 各用地类型景观特征阻力值

Table 5 Landscape characteristic resistance value of land use types

用地类型	斑块数/个	景观形状指数	景观聚集度指数	阻力值计算	标准化处理	景观特征阻力值
耕地(地类A)	233	46.814	89.237	-157.521	0.122	122
林地	300	26.128	88.888	-206.278	0.091	91
草地	35	10.371	85.364	-32.508	0.202	202
水体	515	31.096	84.228	-347.847	0.001	1
建设用地	1 831	44.087	87.721	1 222.137	1.001	1 001
裸地	32	9.606	74.742	29.259	0.241	241
耕地(地类B)	233	46.814	89.237	157.521	0.323	323

结合地表覆盖阻力值的计算结果，利用熵值法计算景观特征阻力与地表覆盖阻力的权重得出各用地类型的的成本路径阻力值（表6），赋予各地类空间分布可构成成本路径阻力面分布图（图3）。可以看到：成

本路径阻力值从大到小依次为建设用地、裸地、耕地、草地、林地、水体，其中水体与建设用地为阻力值最小和最大的用地类型，接近极限值。利用最小累积阻力模型将成本路径阻力值叠加土地类型后，识别出的20条成本路径多沿河流并串联沿线小型生境斑块，其中主城区重要的城市河道如秦淮新河、秦淮外河、滁河均被识别为降温廊道。与“源”斑块一同构成了可缓解城市热岛效应的绿色基础设施网络（图4）。

### 3.3 基于绿地系统规划的绿色基础设施网络优化

将初步的构建网络与《南京市绿地系统规划（2013—2020）》进行对比后发现，本研究从生态斑块的“冷岛效应”出发构建的绿色基础设施网络与绿地规划中“四环六楔”及“九道十八射”的生态网络格局基本重合。同时，本研究还识别出了规划中忽略的廊道，可见该研究方法对于绿地、河流之间的潜在廊道识别具备一定的优势，可为国土空间规划提供参考和借鉴。结合现有规划，得到优化后的南京市主城区绿色基础设施网络，其结构可以归纳为“三环、六带、多线”（图5）。以“三环”为主体，其中明城墙为第1环，秦淮百里风光带与长江连接形成第2环，绕城高速道路绿地系统为第3环；结合连接“三环”的6个重要降温廊道以及其他多个线型通道，共同构成南京市主城区的降温网络结构。

表6 各用地类型地表覆盖阻力值

Table 6 Ground cover resistance values of land use types

用地类型	平均温度/℃	降温率/%	降温率标准化	地表覆盖阻力值	成本路径阻力值
耕地	31.388	0.539	0.427	2.34	54
林地	30.235	4.193	0.676	1.48	22
草地	28.964	8.220	0.950	1.05	48
水体	28.730	8.961	1.001	1.00	1
建设用地	33.358	-5.705	0.001	1 000.00	1 000
裸地	31.558	0.000	0.390	2.56	58

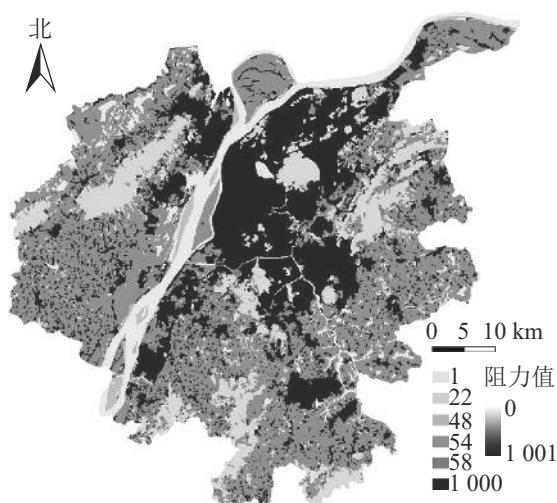


图3 成本路径阻力面示意图

Figure 3 Cost path resistance surface

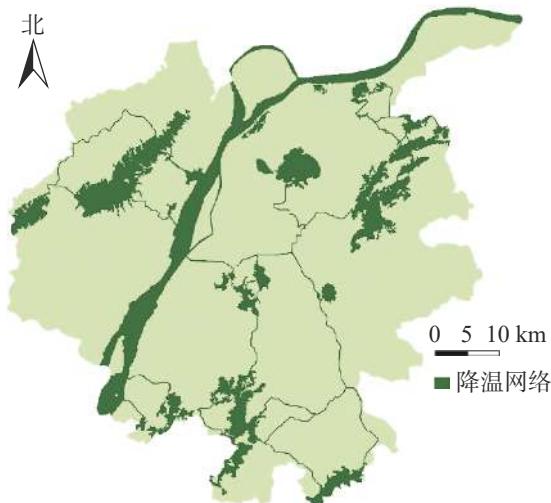


图4 绿色基础设施降温网络构建示意图

Figure 4 Cooling network of GI

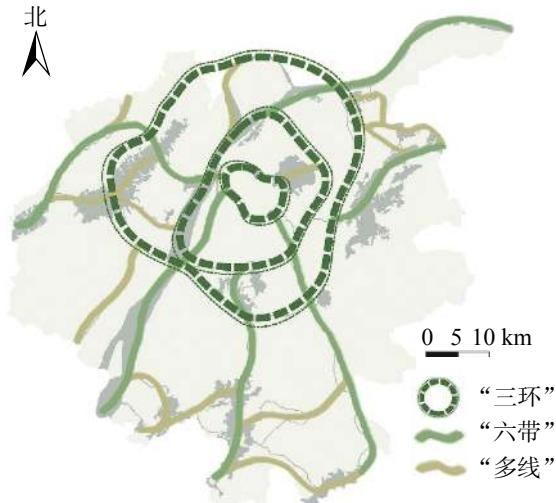


图5 南京主城区绿色基础设施降温网络结构

Figure 5 Structure of cooling network for GI

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

运用形态学空间格局分析方法与景观连通分析综合识别出南京市主城区内的25个“源”斑块，与识别出的20条廊道共同构成缓解热岛效应的绿色基础设施网络，进而结合南京市绿地系统规划，提出

“三环、六带、多线”的总体空间结构。

综合多种方法定量识别“源”斑块，避免了选择的主观性和忽略生境可利用性的情况。将反映景观格局的景观格局指数和反映地表覆盖特征的地表降温率利用熵值法确定权重后构建阻力面，再用最小成本路径方法进行廊道识别，对以往的构建方法进行了修正，使得缓解热岛效应导向下的绿色基础设施网络构建更加合理。

通过形态学空间格局分析、连通性分析，结合景观特征和地表覆盖双重指标赋值的最小成本路径方法的综合应用，为建构缓解城市热岛效应的绿色基础设施网络提供了一种新的研究思路与方法，也为通过合理布局绿色基础设施网络，改善城市人居环境提供借鉴。

## 4.2 讨论

**4.2.1 最小成本路径的方法改进** 根据研究目标的差异对阻力面的构建进行修正是科学构建绿色基础设施网格需研究的重要问题。以往使用最小成本路径法进行的研究中，常根据不同景观类型赋予相应的阻力系数构建阻力面<sup>[22-23]</sup>。在本研究中若将景观格局指数与地表温度分别计算权重相加，会忽略景观格局指数与地表温度所指示的特征差异及其对降温的正负作用等。基于上述问题，本研究赋值时考虑景观特征和地表覆盖双重指标，其中景观特征阻力值计算考虑到景观格局指数对不同地类阻力值贡献的正负性，并采用熵值法叠加多个计算结果权重，使得运算结果更加全面准确。

**4.2.2 绿色基础设施网络构建的思路拓展** 众多研究表明：城市中的绿色基础设施要素在解决城市生态、污染、气候等问题中具有突出的作用<sup>[24-25]</sup>，而相关的绿色基础设施网络构建研究仍处于起步阶段。安超等<sup>[26]</sup>基于空间利用生态绩效构建“自然生态”与“人文生态”相结合的绿色基础设施网络；王晶晶等<sup>[27]</sup>以多元价值为导向探索能够符合多种需求的复合型绿色基础设施网络。这些研究所运用的方法与构想都为本研究提供了可供借鉴的思路。本研究基于对快速城市化背景下热岛效应问题的思考，通过绿色基础设施网络构建结合城市绿地系统规划，提出了南京市主城区绿色基础设施网络应着力建设“三环、六带、多线”降温功能空间结构，为缓解城市热岛效应的绿色基础设施网络构建提供了一种研究思路，后续还可结合细颗粒物( $PM_{2.5}$ )消减、雨洪管理等热点问题进一步深入研究。

**4.2.3 绿色基础设施网络的实际应用与建设** 本研究的绿色基础设施网络构建结果不仅包含了传统绿地系统规划的若干重要生态廊道，对传统城市绿地系统规划容易忽视的城市大型生境斑块中的潜在廊道也具有识别优势，对生态系统服务与空间规划交叉领域的研究是一个有益的补充。本研究将降温廊道定义为降温效应贡献值大的“源”斑块之间的连接廊道，即空气流通方向为“源—源”，而实际中城市热岛效应主要是由“汇”景观大量集聚与扩张所造成，因此对“源—汇”“汇—汇”等不同热量传导方向廊道的降温效果都需进一步开展对比分析，从而补充现有网络，形成复合型降温网络。同时，绿色基础设施网络在明确降温廊道空间形态后，还应进一步通过绿色基础设施网络降温功能量化的方式，研究确定廊道具体建设宽度，如何串联分散的绿色基础设施要素等问题，使得降温网络能够更加科学地指导实践。

## 5 参考文献

- [1] GEDZELMAN S D, AUSTIN S, CERMAK R, et al. Mesoscale aspects of the urban heat island around New York City [J]. *Theor Appl Climatol*, 2003, **75**(1/2): 29–42.
- [2] 车通, 林芙蓉, 武思凡, 等. 快速城市化进程中扬州城市热环境与景观格局的动态关联[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2020, **41**(3): 120–126.  
CHE Tong, LIN Furong, WU Sifan, et al. Dynamic relationships between the urban thermal environment and the pattern of landscape development in Yangzhou City [J]. *J Yangzhou Univ Agric Life Sci Ed*, 2020, **41**(3): 120–126.
- [3] 张炜, 杰克·艾亨, 刘晓明. 生态系统服务评估在美国城市绿色基础设施建设中的应用进展评述[J]. 风景园林, 2017, **24**(2): 101–108.  
ZHANG Wei, JACK A, LIU Xiaoming. A review of the application of ecosystem service valuation in urban green infrastructure development of United States [J]. *Landscape Archit*, 2017, **24**(2): 101–108.
- [4] 庄晓林, 段玉侠, 金荷仙. 城市风景园林小气候研究进展[J]. *中国园林*, 2017, **33**(4): 23–28.

- ZHUANG Xiaolin, DUAN Yuxia, JIN Hexian. Research review on urban landscape micro-climate [J]. *Chin Landscape Archit*, 2017, **33**(4): 23–28.
- [5] 孔繁花, 尹海伟, 刘金勇, 等. 城市绿地降温效应研究进展与展望[J]. *自然资源学报*, 2013, **28**(1): 171–181.
- KONG Fanhua, YIN Haiwei, LIU Jinyong, et al. Research progress and prospect of cooling effect of urban green space [J]. *J Nat Resour*, 2013, **28**(1): 171–181.
- [6] SANTAMOURIS M, BAN-WEISS G, OSMOND P, et al. Progress in urban greenery mitigation science-assessment methodologies advanced technologies and impact on cities [J]. *J Civil Eng Manage*, 2018, **24**(8): 638–671.
- [7] HAMAMDA S, OHTA T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas [J]. *Urban For Urban Greening*, 2010, **9**(1): 15–24.
- [8] 谢紫霞, 张彪, 余欣璐, 等. 上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素[J]. *生态学报*, 2020, **40**(19): 6749–6760.  
XIE Zixia, ZHANG Biao, SHE Xinlu, et al. The summer cooling effect and its influencing factors of urban green spaces in Shanghai [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(19): 6749–6760.
- [9] 栾庆祖, 叶彩华, 刘勇洪, 等. 城市绿地对周边热环境影响遥感研究——以北京为例[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(2): 252–261.  
LUAN Qingzu, YE Caihua, LIU Yonghong, et al. Effect of urban green land on thermal environment of surroundings based on remote sensing: a case study in Beijing, China [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23**(2): 252–261.
- [10] KONG Fanhua, YAN Weijiao, ZHENG Guang, et al. Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation [J]. *Agric For Meteorol*, 2016, **217**: 22–34.
- [11] 刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型[J]. *生态学报*, 2017, **37**(23): 7769–7780.  
LIU Yanxu, PENG Jian, WANG Yanglin. Relationship between urban heat island and landscape patterns: from city size and landscape composition to spatial configuration [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(23): 7769–7780.
- [12] 马瑞明, 谢苗苗, 郎文聚. 城市热岛“源—汇”景观识别及降温效率[J]. *生态学报*, 2020, **40**(10): 3328–3337.  
MA Ruiming, XIE Miaomiao, YUN Wenju. “Source-sink” landscape identification of the urban heat island and the cooling efficiency [J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(10): 3328–3337.
- [13] ISHWAR D, KATHRYN G A, TIMOTHY A W, et al. Phenology of trees and urbanization: a comparative study between New York City and Ithaca, New York [J]. *Geocarto Int*, 2011, **26**(7): 507–526.
- [14] 吴健生, 刘洪萌, 黄秀兰, 等. 深圳市生态用地景观连通性动态评价[J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(9): 2543–2549.  
WU Jiansheng, LIU Hongmeng, HUANG Xiulan, et al. Dynamic evaluation on landscape connectivity of ecological land: a case study of Shenzhen, Guangdong Province of South China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(9): 2543–2549.
- [15] 董子燕, 张友水. 基于城市景观格局和连通性的地表温度贡献分析[J]. *地理信息世界*, 2020, **27**(4): 75–82.  
DONG Ziyan, ZHANG Youshui. Land surface temperature contribution analysis based on urban landscape pattern and connectivity [J]. *Geomatics World*, 2020, **27**(4): 75–82.
- [16] KONG F H, YIN Haiwei, NAKAGISHI N, et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling [J]. *Landscape Urban Plann*, 2010, **95**(1/2): 16–27.
- [17] WEBER T, SLOAN A, WOLF J. Maryland's green infrastructure assessment: development of a comprehensive approach to land conservation [J]. *Landscape Urban Plann*, 2006, **77**(1/2): 94–110.
- [18] 许霖峰. 应对热岛效应的深圳低碳城绿色基础设施规划策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
XU Linfeng. *Green Infrastructure Planning Strategy for Alleviating Urban Heat Island in Shenzhen Low-carbon City*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [19] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 27–31.
- [20] 滕明君. 快速城市化地区生态安全格局构建研究: 以武汉市为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.  
TENG Mingjun. *Planning Ecological Security Patterns in a Rapidly Urbanizing Context: a Case Study in Wuhan, China*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [21] 姚抒琴. 基于气候适应性的杭州主城区绿色基础设施构建策略研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2007.  
YAO Weiqin. *The Research on the Constructive Strategies of Green Infrastructure Based on the Climate Adaptability in Hangzhou Downtown*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2007.

- [22] 徐文彬, 尹海伟, 孔繁花. 基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定 [J]. 生态学报, 2017, 37(12): 4019 – 4028.  
XU Wenbin, YIN Haiwei, KONG Fanhua. Development of ecological control boundaries in Nanjing metropolis district based on ecological security patterns [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(12): 4019 – 4028.
- [23] SHI Xuemin, QIN Mingzhou. Research on the optimization of regional green infrastructure network [J]. *Sustainability*, 2018, 10(12): 4649. doi: [10.3390/su10124649](https://doi.org/10.3390/su10124649).
- [24] 黄河, 余坤勇, 高雅玲, 等. 基于 MSPA 的福州绿色基础设施网络构建 [J]. 中国园林, 2019, 35(11): 70 – 75.  
HUANG He, YU Kunyong, GAO Yaling, et al. Building green infrastructure network of Fuzhou using MSPA [J]. *Chin Landscape Archit*, 2019, 35(11): 70 – 75.
- [25] 戴菲, 毕世波, 孙培源. PM<sub>2.5</sub> 消减效应导向下的城市绿色基础设施网络优化: 以湖北省武汉市江汉区为例 [J]. 风景园林, 2020, 27(10): 51 – 56.  
DAI Fei, BI Shibo, SUN Peiyuan. Urban green infrastructure network optimization guided by PM<sub>2.5</sub> reduction effect: a case study of Jianghan District, Wuhan City, Hubei Province [J]. *Landscape Archit*, 2020, 27(10): 51 – 56.
- [26] 安超, 沈清基. 基于空间利用生态绩效的绿色基础设施网络构建方法 [J]. 风景园林, 2013, 20(2): 22 – 31.  
AN Chao, SHEN Qingji. Method of constructing network of green infrastructure based on ecological performance of space utilization [J]. *Landscape Archit*, 2013, 20(2): 22 – 31.
- [27] 王晶晶, 尹海伟, 孔繁花, 等. 基于供需匹配度视角的环太湖区域绿色基础设施网络构建 [J]. 城市建筑, 2017(12): 19 – 24.  
WANG Jingjing, YIN Haiwei, KONG Fanhua, et al. The green infrastructure network planning in the area around Taihu Lake based on the matching degree between supply and demand [J]. *Urban Archit*, 2017(12): 19 – 24.