

# 南京主城区蓝绿空间格局对降温效益的影响及其协同作用研究

## Cooling Effects of the Spatial Pattern of Blue-Green Spaces and Their Synergies in Central Area of Nanjing, China

袁昉洋<sup>1,2\*</sup> 张佳琦<sup>1,2</sup> 郭蔚<sup>1,2</sup> 汤思琪<sup>1,2</sup> 李英男<sup>1,3,4\*</sup>  
YUAN Yangyang<sup>1,2\*</sup> ZHANG Jiaqi<sup>1,2</sup> GUO Wei<sup>1,2</sup> TANG Siqi<sup>1,2</sup> LI Yingnan<sup>1,3,4\*</sup>

(1.东南大学建筑学院, 南京 210096; 2.江苏省城乡与景观数字技术工程中心, 南京 210096; 3.韩国首尔国立大学环境规划研究所, 首尔 08826; 4.江苏大学艺术学院, 镇江 212013)

(1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing, Jiangsu, China, 210096; 2. Jiangsu Provincial Urban and Rural Digital Technology Engineering Center, Nanjing, Jiangsu, China, 210096; 3. Environmental Planning Institute, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea, 08826; 4. School of Arts, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, China, 212013)

文章编号: 1000-0283(2023)08-0057-08  
DOI: 10.12193/j.laing.2023.08.0057.007  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2023-05-04  
修回日期: 2023-06-13

### 摘要

高密度城市中的绿色与蓝色空间具有降低地表温度、缓解热岛效应的功能, 两者有着相互促进的协同作用。城市蓝绿空间的格局是影响其降温效益的主要因素之一。以南京主城区为例, 选取17个空间格局指标, 分别从面积-边缘、形状、核心、聚散度4类表征城市绿色空间、蓝色空间与蓝绿空间格局特征, 对比分析三者与地表温度的关联性, 探讨绿色与蓝色空间对降温的协同促进作用。结果表明:(1)城市蓝绿空间格局对其降温效益的影响不具有季节性差异;(2)蓝绿空间格局整体性指标相较于单一绿色空间与蓝色空间格局指标, 对地表温度产生的影响更加显著;(3)增加斑块面积、提升形状复杂度、减小空间破碎度均可促进城市蓝绿空间的降温效益。从整体性与协同性的角度探索了城市蓝绿空间格局对降温效应的影响, 阐明了城市蓝绿空间统筹调控的必要性, 有助于实现高密度城市规划实践中蓝绿空间格局的系统性优化与精细化调控, 推动城市蓝绿空间融合发展。

### 关键词

城市蓝绿空间; 空间格局; 城市热环境; 降温效益; 协同作用

### Abstract

Urban blue-green spaces (UBGS) play a positive role in reducing land surface temperature (LST) and mitigating heat island effects in high-dense cities. Urban blue spaces and urban green spaces also have synergistic effects in reducing LST, and the spatial pattern is one of the most important factors of their cooling effect. This study takes Nanjing, China, as study area; seventeen indexes were selected to represent the special patterns of UBGS including area-edge, shape, core area, and aggregation category, and we investigated their relationship with LST. As a result, the synergistic cooling effect of blue and green spaces was identified. The results indicated that: (1) The spatial pattern's impact on LST has no seasonal difference; (2) Compared to the individual blue and green spatial patterns, the combined spatial pattern of UBGS impact on LST was more significant; (3) Increasing the area and shape complexity, reducing spatial fragmentation can promote the cooling effects of urban blue-green spaces. These results show the correlation between the spatial patterns of UBGS and their cooling effects in both integration and synergy ways, can help governments and policy-makers in deciding on the systematic optimization and fine regulation of the UBGS pattern in high-dense cities, serve as a reference for effective urban planning practices, and promote the integrated development of UBGS.

### Keywords

urban blue-green space; spatial pattern; urban thermal environment; cooling effect; synergistic effect

### 袁昉洋

1987年生/女/江苏南京人/博士/副教授、硕士生导师/研究方向为风景园林规划设计与理论、数字景观技术、城市蓝绿空间规划

### 张佳琦

1999年生/女/山西晋中人/在读硕士研究生/研究方向为园林规划与设计

### 李英男

1989年生/女/吉林四平人/博士/副教授、硕士生导师/研究方向为城市热环境评价与优化、城市绿地规划设计

### 基金项目:

国家自然科学基金重点项目“低影响开发下的城市绿地规划理论与方法”(编号: 51838003); 东南大学至善青年学者支持计划“城市建成区蓝绿空间布局对碳汇效益的影响机制研究”(编号: 2242023R40002)

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: yyy@seu.edu.cn; lyn48512@hotmail.com

随着全球气候变暖,城市高温天气持续时间变长,极端高温天气出现时间变早,最高气温连年升高<sup>[1]</sup>。2022年夏季,中国多地异常高温天气频发,高温区域覆盖国土面积达502.1万km<sup>2</sup>,影响人口超过9亿人<sup>[2]</sup>。高温环境不仅降低了人居环境舒适度,危害了居民的生命健康,还造成了社会经济损失,严重影响了城市的可持续发展<sup>[3]</sup>。城市扩张过程中,由于不透水面比例增加、建筑密度变高,地表接收的太阳辐射更多,空气流通速度变慢<sup>[4]</sup>,加剧了城市热岛现象。高密度城市往往建设时间较早,在早期规划过程中忽视了城市化对环境的负面影响以及对城市蓝绿空间的保护<sup>[5-7]</sup>,热岛现象在高密度城市中心区尤为突出<sup>[8]</sup>。相较于发展较晚、发展程度低的城市,高密度城市在更新过程中涉及社会、经济等因素较多,格局的精准调控与优化更具现实意义<sup>[9]</sup>。

蓝绿色空间是城市生态系统的重要组成部分,在降低城市温度、缓解热岛效应等方面发挥着重要作用<sup>[10-11]</sup>。城市绿色空间指城市中所有自然、半自然、人工的绿地以及绿色基础设施,其中,植被可以通过树冠遮蔽直接隔绝太阳辐射,也能够利用蒸腾作用进一步降低温度<sup>[12-14]</sup>。绿色空间提高了城市下垫面的粗糙程度,加快了空气对流速率,有助于温度降低<sup>[15]</sup>。城市蓝色空间中包含的河流、湖泊、湿地等水体同样具有良好的降温效应,由于水体具有较高的比热容,在吸收相同热量的情况下,升温速度比硬质下垫面慢,可以防止热量在近地面聚集<sup>[16]</sup>。以往的研究表明,城市绿色空间与蓝色空间的降温效益都受到空间格局的影响<sup>[17-19]</sup>。如王勇等<sup>[20]</sup>从景观生态学视角,定量计算了绿色空间格局与降温效益的相关性,研究表明绿地的面积、聚集度、连通度对降温效益有正向影响,

破碎度对降温效益有负面影响。李书严等<sup>[21]</sup>、Estoque等<sup>[22]</sup>研究发现,水体的周长面积比、连通度等景观格局指数与降温效应的相关性较强。

城市蓝绿空间具有相似的自然生态属性,在生态功能和物质交换、能量流动等自然过程中相互影响、相互依存,具有强关联性和整体性,其降温效益具有协同效益<sup>[23-25]</sup>。随着中国城市全面进入“存量”发展时代,解析蓝绿空间协同机制、优化调控蓝绿空间格局,能够集约利用城市土地资源,并提升其生态系统服务功能<sup>[26]</sup>,是改善城市热环境的重要现实途径<sup>[27]</sup>。当下城市蓝绿空间的整体性格局对降温效益影响程度是否高于单一城市绿色空间或蓝色空间、城市蓝绿空间格局如何影响地表温度等问题仍有待深入探讨。

本研究选取具有高密度城市特征的南京主城区为研究案例,以Landsat-8获取的遥感数据集为基础研究数据,在反演南京主城区

地表温度、识别城市蓝绿空间的基础上对比分析了城市绿色空间和蓝色空间,以及蓝绿空间的空间格局与地表温度的关联性,探讨绿色空间、蓝色空间对降温的协同促进作用。本研究目标在于:(1)分析并比较城市绿色空间、蓝色空间与蓝绿空间的空间格局对地表温度的影响;(2)确定影响降温效益的城市蓝绿空间格局关键指标;(3)为高密度城市蓝绿空间格局优化提供建议。

## 1 研究区概况

南京市(31° 14' — 32° 37' N, 118° 22' — 119° 14' E)位于长江下游,是中国东部地区重要的中心城市,是江苏省省会。南京属于亚热带季风气候,在5月至10月,气温常超过26℃,8月极端高温可飙升至40℃以上<sup>[28]</sup>。南京主城区占地面积为788.33 km<sup>2</sup>,包括玄武区、秦淮区、建邺区、鼓楼区、栖霞区、雨花台区6个行政区域(图1)。主城区建筑密

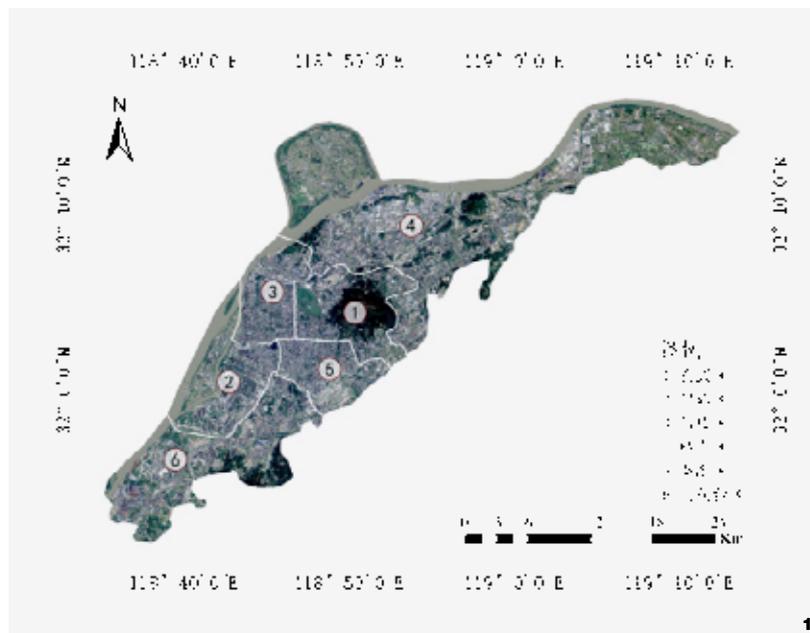


图1 研究区范围  
Fig. 1 Scope of study area

度大, 根据南京市统计年鉴, 2021年南京主城区城市化水平达到了88%。自然山水资源良好, 不仅具有高密度城市特征, 且呈现“山水城林”的特色景观风貌与蓝绿空间格局。

## 2 数据与方法

研究采用Landsat-8遥感影像数据集为基础数据, 在土地监督分类、空间格局计算、地表温度反演、相关性计算的基础上, 分析并比较城市蓝绿空间、蓝色空间及绿色空间格局与地表温度的相关关系(图2)。

### 2.1 数据获取

研究所采用的遥感数据来源于美国地质调查局(USGS) Landsat-8多光谱数据集(<http://glovis.usgs.gov/path-row:120-38>), 针对南京的气候特点, 分别对成像时间为春季(3-5月)、夏季(6-9月)、秋季(10-12月), 且云量小于5%的南京市遥感影像进行筛选, 并对比成像质量, 选取2021年3月26日、8月1日与10月4日的遥感影像数据作为研究基础数据, 将其导入ENVI-met5.3软件分别进行波段合成与解译, 并进行辐射定标及大气校正等数据预处理。

### 2.2 土地利用类型识别

采用监督分类法进行土地利用类型识别, 即基于选取的典型样本, 通过特征参数的判断进行样本分类, 识别出场地内的土地利用情况。综合考虑南京主城区的空间尺度, 以及区域内微型绿色斑块与小型河道的识别效果, 将原30 m分辨率的遥感影像重采样为15 m。利用重采样后的研究区假彩色遥感影像, 参考中国《土地利用现状分类》国家标准的一级分类, 将土地分为建设用、林地、草地、耕地、水体和未利用地6种类型, 其中建设用包括不透水面、建筑及道路; 林

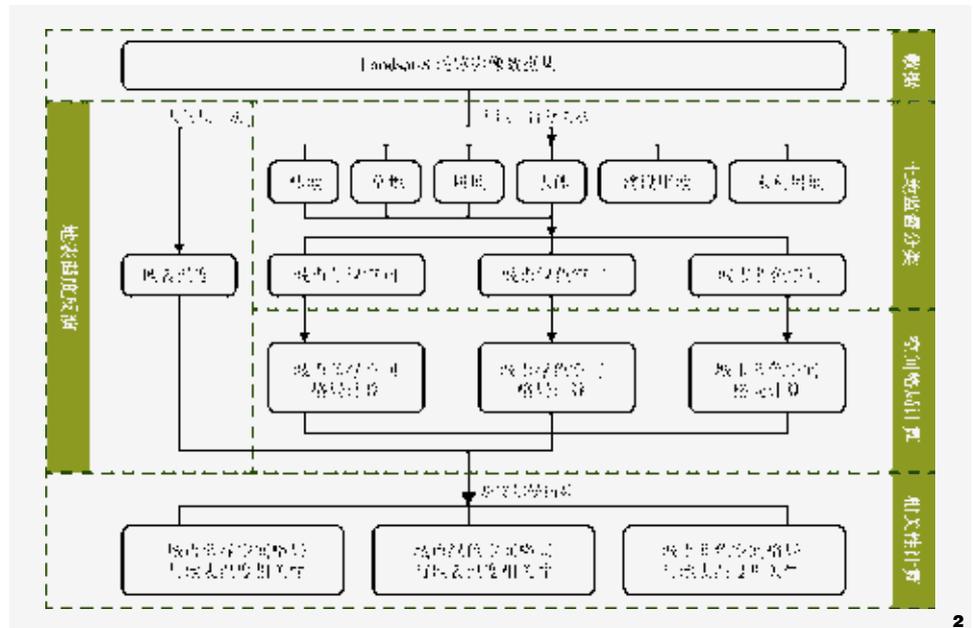


图2 技术路线图  
Fig. 2 Methodology flowchart

地指有上层植被包括乔木、灌木覆盖的空间以及苗圃, 涵盖了建筑之间以及道路上的植被空间; 草地指仅有下层地被覆盖的空间; 耕地指人工种植农作物的区域; 未利用地被定义为无植被覆盖或未经建设的裸地。在进行监督分类之前, 需选取足够的分类训练样本并计算分离指数, 确保分离指数大于1.8, 以满足分类精度要求。在分类完成后, 对照原始卫星遥感影像检查分类结果并进行分类精度检验, 原始分类结果精度为88%。针对分类结果, 对误判、漏判的土地分类数据进行手动修正。

### 2.3 蓝绿空间格局指标计算

景观格局指数能够反映斑块数量、形状以及空间分布等空间格局特征<sup>[29]</sup>。针对南京主城区城市蓝绿空间特点, 选取17个指标, 从面积—边缘、形状、核心、聚散度4个类型, 分别表征城市绿色空间、蓝色空间与蓝

绿空间格局特征(表1)。为了更准确地反映空间格局特征与地表温度的对应关系, 采用移动窗口算法进行空间格局指标的计算。在比较100 m、200 m、300 m、400 m与500 m的移动窗口运算结果后, 选取300 m移动窗口计算各项空间格局指标。

### 2.4 地表温度反演

本研究主要以Landsat-8遥感数据集中第11波段为基础数据, 使用大气校正法进行地表温度反演, 将地表温度作为蓝绿空间降温效益的直接表征, 即地表温度越低, 说明城市蓝绿空间降温效果越好。在温度反演前, 采集于8月的原始数据部分区域被云层遮盖, 所以先对数据进行掩膜处理, 去除云层遮挡带来的干扰。

首先对大气的热辐射影响进行估算, 根据NASA提供的大气校正参数计算器(ACPC, <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) 输入成像时间及中心

经纬度获得大气向上辐射亮度以及大气向下辐射亮度数值。其次, 从第11波段数据的热辐射亮度值中消除大气向上辐射亮度以及大气向下辐射亮度的影响。最后, 根据普朗克函数(公式(1))反演得到地

表温度。式中,  $b1$  为黑体辐射亮度, 由卫星热红外观测到的热辐射亮度值、大气向上辐射亮度、大气向下辐射亮度以及研究区植被覆盖度计算得出。 $K1$ 、 $K2$  为转换参数, Landsat8 遥感数据集的  $K1$  为 774.89  $W(m^2 \mu msr)$ ,  $K2$  为 1 321.08 K。

$$LST = (K2) / \ln (K1 / b1 + 1) - 273 \quad (1)$$

表1 城市蓝绿空间格局特征指标  
Tab. 1 Selected blue-green spatial pattern indexes

指标类别 Category	缩写 Abbreviation	名称 Index name
面积—边缘	CA	斑块面积
	LPI	最大斑块面积比例
	PLAND	斑块面积比例
	TE	总边缘长度
	ED	边缘密度
形状	PARA-MN	平均周长面积比
	FRAC-MN	平均斑块分维数
核心	TCA	总核心面积
	CPLAND	总核心面积比例
	NDCA	间断分布的核心面积数量
	DCAD	间断分布的核心面积密度
聚散度	CONNECT	景观连接性指数
	NP	斑块数量
	DIVISION	景观分离度
	SPLIT	分散指数
	AI	聚集指数
	COHESION	斑块内聚力指数

### 2.5 相关性分析

在ArcGIS 10.8软件中利用采样工具, 以60 m作为样本点间最小距离在研究区内随机选取3 000个样本点, 并将蓝绿空间格局指标计算结果与地表反演温度数据链接至采样点, 导入SPSS 24软件中进行相关性分析。基于峰度、偏度及Z-score值验证, 原始数据的分布特征均不符合正态分布, 故采用斯皮尔曼相关性系数(Spearman Correlation)对研究区蓝绿空间、绿色空间及蓝色空间格局指标与3个月份的地表温度进行相关性分析, 计算见公式(2)。式中,  $d_i$  为第*i*个数据的顺序差,  $n$  为数据个数。

$$P_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (2)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 南京主城区蓝绿空间分布

根据土地分类结果, 将林地、草地、耕地整合为城市绿色空间, 水体为蓝色空间(图3), 绿色空间与蓝色空间整合为蓝绿空间。2021年南京绿色空间面积为283.59  $km^2$ , 占主城区总面积的35.8%; 蓝色空间面积为105.14  $km^2$ , 占主城区面积的13.3%; 城市蓝绿空间总面积为388.73  $km^2$ , 占主城区面积的49.1%。主城区内大型绿色斑块包括紫金山、牛首山、栖霞山等自然山体, 大型蓝色斑块主要由长江、玄武湖、秦淮河等湖泊、河流与周边湿地构成。

### 3.2 南京主城区地表温度

由地表温度反演数据可知(图4), 2021年3月26日南京主城区的地表温度在19.6℃至43.9℃之间, 2021年8月1日南京主城区地表温度在25.5℃至61.1℃之间, 2021年10月4日南京主城区的地表温度在26.2℃至50.3℃之间。其中, 三月份最高温均出现在栖霞区新港技术开发区, 最低温均为长江及长江沿岸区域。为了更清晰地反映南京主城区温度区间分布情况, 利用均值—标准差法将南京主城区地表温度反演数据分为高温区、低温区与中温区。可以看出, 8月份高温区面积最大、高温最剧烈, 鼓楼区、秦淮区的高温区占所在城区总面积的80%

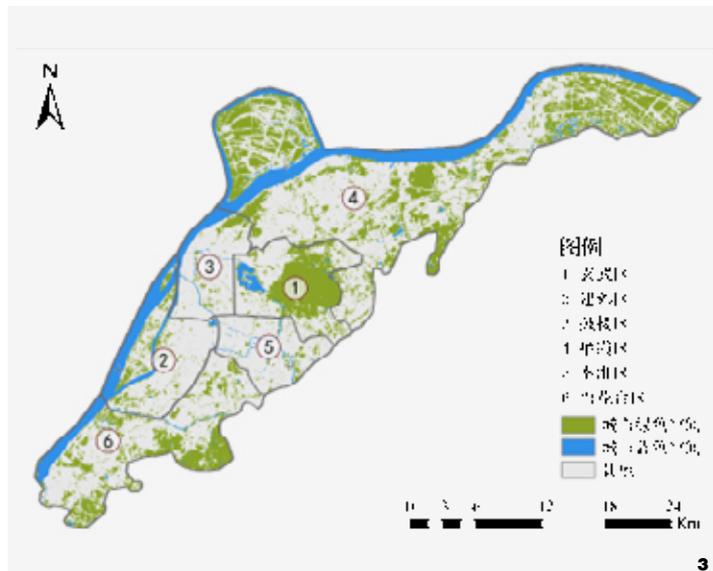


图3 研究区蓝绿空间分布  
Fig. 3 Space distribution of urban blue-green space in study area

以上；低温区则在10月份分布最广，占主城区面积的23.3%。3月份的低温区分布较少，但中温区分布面积最大。

### 3.3 蓝绿空间格局指标与地表温度相关性

基于相关性分析的结果(图5)，将南京主城区蓝绿空间、绿色空间与蓝色空间的格局指数与三个月份的地表温度相关性数值绘制为箱图，通过相关性数值分布区间，确定空间格局指标与地表温度的相关关系(图6)。此外，箱型图分布区间较为紧凑，说明城市蓝绿空间格局对地表温度的影响不具有季节性差异。

在面积—边缘类指数中，城市蓝绿空间的CA、LPI与PLAND都呈现中度负相关性，说明城市蓝绿空间的面积与占比是影响降温效益的主要因素之一。城市蓝色空间的CA、LPI与PLAND与地表温度呈现弱负相关性，说明城市蓝色空间的增加在一定程度上可以降低地表温度。而城市绿色空间各项面积指标均与地表温度呈现相关性，表明在城市中增加绿色空间面积不会显著降低地表温度。在形状类指数中，城市蓝绿空间的PARAMN与FRACMN指数都呈现出正相关性，这两项指标可以表示蓝绿斑块形状的规则程度，也间接反映了人为活动对蓝绿空间形状的影响，即城市蓝绿空间边缘的割裂会降低其降温效益。对于核心指数而言，TCA与CPLAND的值越高表明空间越整合，NDCA与DCAD的值越高表明空间越破碎。在相关性分析结果中，城市蓝绿空间的TCA与CPLAND的值与降温效益呈现负相关，NDCA与DCAD的值呈现正相关，均说明蓝绿空间的破碎化会导致降温效益降低。在聚散度指数中，城市蓝绿空间、蓝色空间与绿色空间的CONNECT与地表温度没有呈现相关性。此外，NP表示斑块数量，在一定程度上可以反映空间的破碎程度，DMSION与SPLIT指数反映了空间的分离度。城市蓝绿空间的NP、DMSION与SPLIT指数与地表温度均呈现正相关性，说明蓝绿空间越破

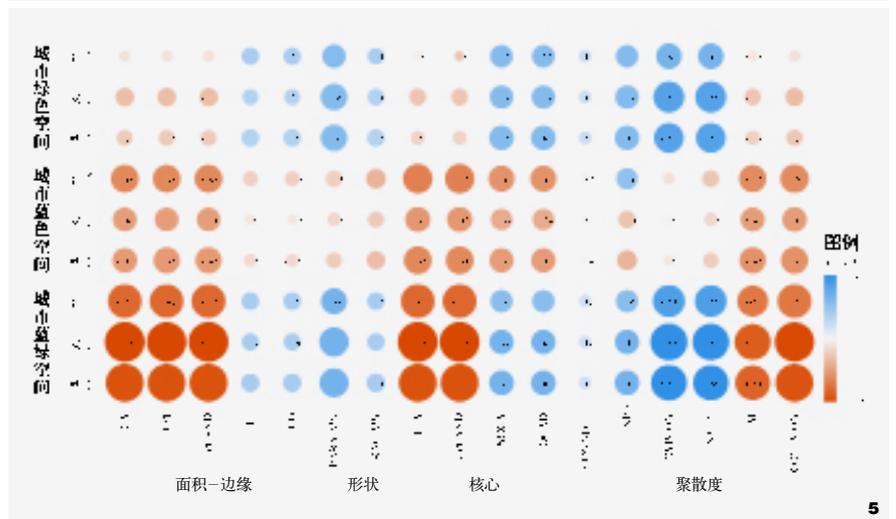
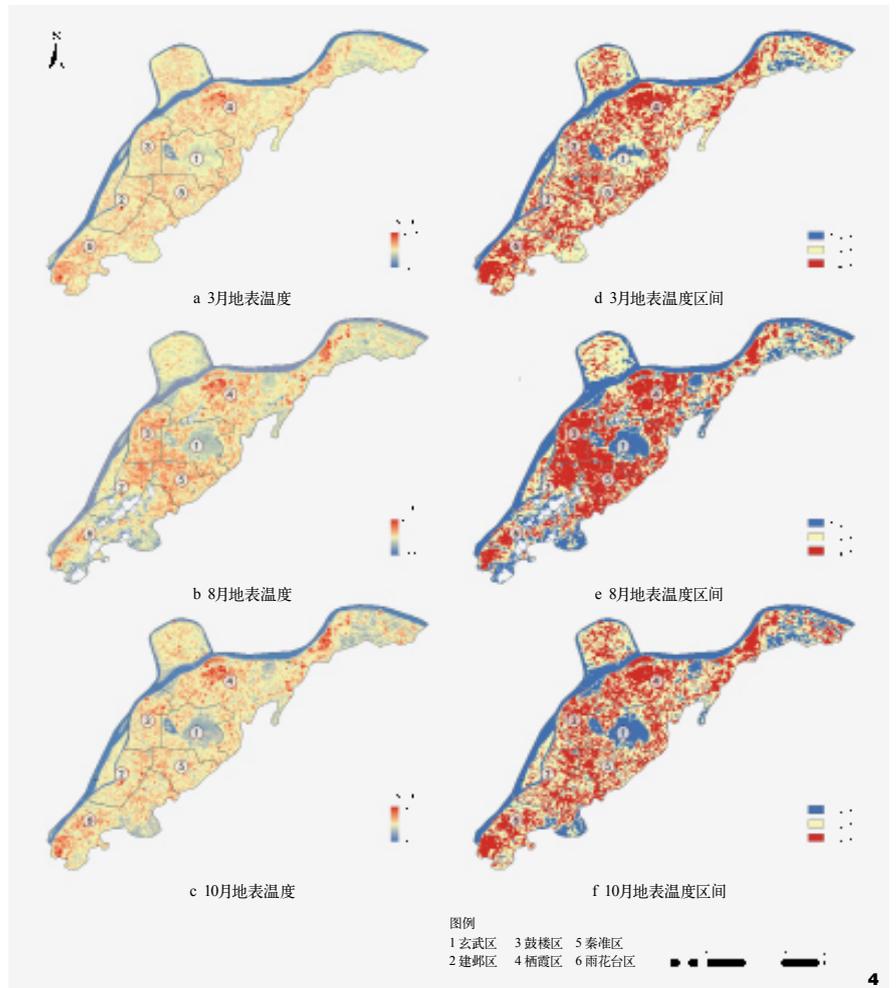
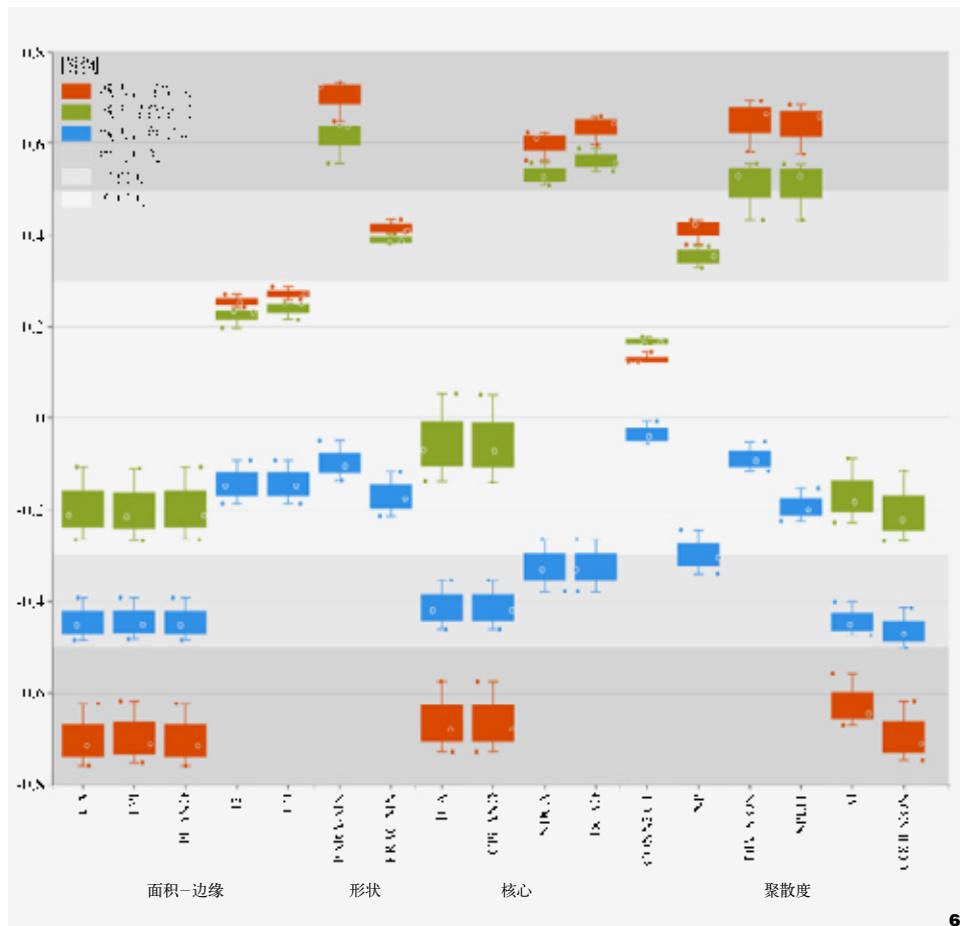


图4 研究区地表温度反演结果  
Fig. 4 LST of study area

图5 空间格局指标与地表温度相关性计算结果  
Fig. 5 Correlation value between spatial pattern indexes and LST



碎、越分散, 降温效果越差。与之相反, AI与COHESION能够反映空间的聚集性, 城市蓝绿空间的AI与COHESION指数与地表温度呈现负相关性, 体现了蓝绿空间越聚集, 降温效果越好。

### 3.4 分析与讨论

城市蓝绿空间格局的4类指标与地表温度的相关性均强于城市绿色空间或蓝色空间, 说明城市蓝色空间和绿色空间在降低温度方面具有协同作用, 统筹协调整体城市蓝绿空间格局对地表温度的影响更为显著, 且蓝绿空间格局对地表温度的影响不具有季节性差异。

由相关性计算结果可知, 城市蓝绿空间面积及其在区域内所占面积比例对于降温效益的影响最大。如在南京主城区中, 紫金山、玄武湖两大蓝绿空间斑块几乎占据了玄武区

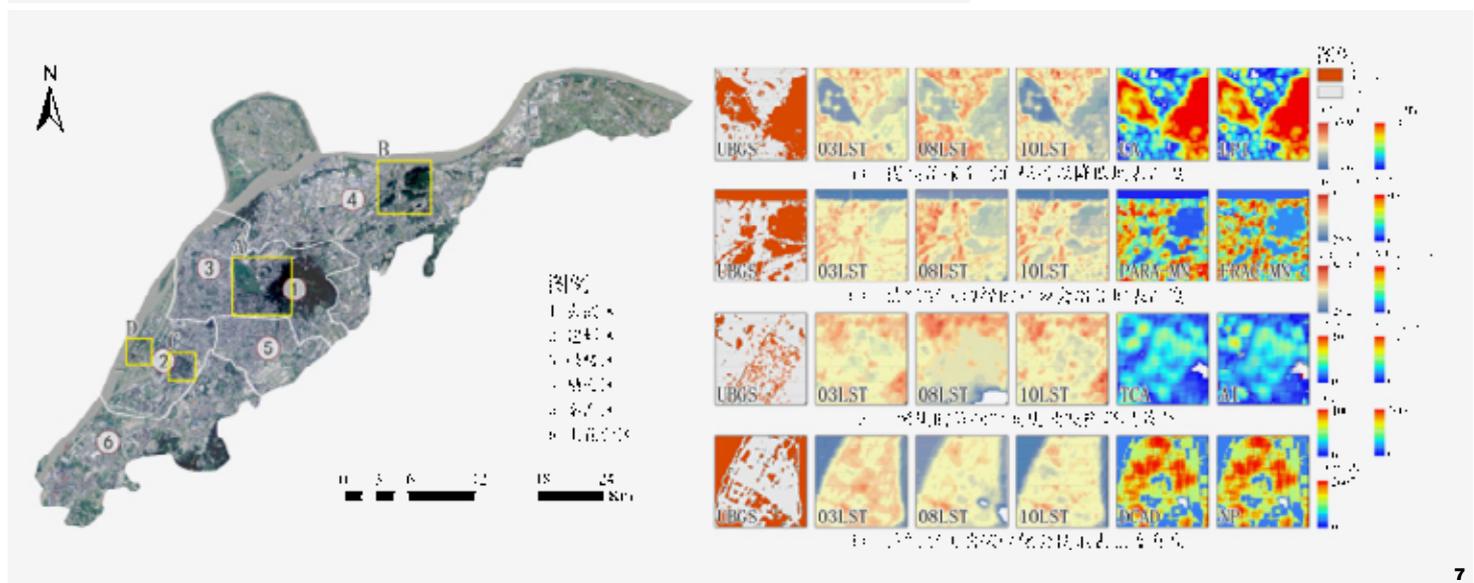


图6 空间格局指标与地表温度相关性箱图  
Fig. 6 Box chart of correlation between spatial pattern indexes and LST

图7 城市蓝绿空间格局指标与地表温度  
Fig. 7 Urban blue-green spatial pattern indexes and LST

面积的43%。类似蓝绿空间面积大、蓝绿斑块所占面积比例高的区域，地表温度较低；而蓝绿空间面积小、占比低的建设用地区域，地表温度较高（图7a）。这与已有研究结论一致<sup>[30-32]</sup>，说明增加蓝绿空间面积、增大蓝绿空间所占比例可有效增强蓝绿空间的降温效益。此外，提升蓝绿空间形状的自然度、减小边缘的破碎度有助于提升蓝绿空间的降温效益。如栖霞区的栖霞山在城市建设过程中逐渐被侵蚀、割裂，空间形态呈现高度人工化的特点，且边缘破碎度较高，该区域的地表温度较高（图7b）。以往的研究认为连通度是影响降温的重要因素<sup>[33]</sup>，而本研究表明蓝绿空间连通度不会对其降温效益产生影响。究其原因，蓝绿空间降温效益的影响范围往往超出了其物理上所占的面积<sup>[34-35]</sup>，同时叠加蓝绿空间降温的协同效应，使得连通度对降温效益的影响并不显著。本研究中关于“蓝绿空间聚集度越高、降温效果越好”的结论也间接证明了这一点。位于建邺区的银城国际居住区及其周边，虽然没有大型城市蓝绿斑块，但其内部小微蓝绿空间聚集度较高，地表温度相较于周边地区显著降低（图7c）。最后，降低蓝绿空间破碎度有助于提升降温效益。如江心洲中心区的蓝绿空间呈现出明显的破碎状态，其地表温度显著高于破碎度较低的长江区域（图7d）。

#### 4 城市蓝绿空间格局的优化策略

当下中国城市化进入后半程，城市发展迈入存量时代，城市建设工作重心由“增量”转变为“提质”。在密度城市的有限空间中，精细化统筹蓝绿空间布局、精准化调整蓝绿空间形态显得尤为重要，“蓝绿融合发展”也成为探索城市可持续发展新模式的重要课题。由此，以提升降温效益为目标，可

从以下几方面优化城市的蓝绿空间格局。

##### 4.1 重视蓝绿空间修复，提升城市蓝绿空间占比

增加城市蓝绿空间面积是改善热环境的重要途径。中国的城市绿色空间一般占建成区面积的30%~38%，蓝色空间面积则根据不同城市的自然地理状况各不相同。在公园城市建设背景下，未来的城市发展将更加强调蓝绿空间占比的提升。但在城市蓝绿空间发展受限的高密度城市中，很难大幅增加城市蓝绿空间面积、提高城市蓝绿空间占比。因此，在城市建设中应重视生态修复工作，通过修复河道、保育湿地、棕地复绿等途径可以实现增“蓝”添“绿”，提高城市蓝绿空间面积。

##### 4.2 保护蓝绿空间自然形态，降低蓝绿空间破碎程度

城市的扩张不仅使蓝绿斑块破碎化，而且对蓝绿空间边缘造成了侵蚀与扰动。高密度城市中大量的蓝绿斑块边缘被集中化的建设用地切割，被几何化的城市道路限定，呈现人工化、规则化的特点，丧失了自然特征。规则式的边缘压缩了城市建设用地与蓝绿空间的接触界面，降低了两者的空气流动，减弱了蓝绿空间对太阳辐射的遮挡作用，不利于蓝绿空间降温效益的发挥。对于已建设的规则式城市蓝绿空间边缘区域，应在建设用地与蓝绿空间接触界面建设带状、点状蓝绿空间，引导城市蓝绿空间向城市建设用地延伸，降低蓝绿空间破碎度，增加边缘的渗透性。对于尚未开发或开发程度较低的区域，应保护城市蓝绿空间自然形态，预防蓝绿空间破碎化。新建的建设用地应与蓝绿空间呈现“指状”方式相接，构建“城在园中”的公园城市。

##### 4.3 提高蓝绿空间聚集度，充分发挥小微蓝绿斑块作用

除增加蓝绿空间面积之外，提高聚集度一样能够提升降温效益。也就是说，若干小面积、高聚集度的蓝绿空间降温效果与大面积蓝绿空间的降温效果类似，这与王琳等<sup>[36]</sup>的研究具有一致性。因此，在城市规划建设时，可以针对不同的现实情况合理组织蓝绿空间。如在自然基底保护良好的区域，应保留大面积蓝绿斑块与廊道；在高密度建成环境中，宜“见缝插绿、补蓝”，在提升雨水花园、口袋公园等小型蓝绿空间数量的同时，注意聚集度等空间布局方式，充分发挥小微蓝绿斑块的降温作用。

#### 5 结论与展望

囿于基础数据与现有方法的限制，以下方面仍需进一步探讨。

(1) 基于遥感数据反演得到的地表温度反映的是地物表层的热红外辐射信息<sup>[37]</sup>。而城市空间具有多层结构特点，垂直方向温度变化较为复杂，根据遥感影像反演出的地表温度无法准确反映市民活动区域的温度情况，且与人的体感温度也有差异。在未来的研究中，可以尝试将空间点云数据与实测体感温度数据结合，在三维空间中对城市蓝绿空间的降温效益进行更为精细化的探讨。

(2) 在南京主城区中，蓝色空间主要由河道构成，呈现条带状的形态特征，研究结果中城市蓝色空间的FRAC-MN、PARA-MN等空间格局指标与地表温度并未呈现相关性，其原因可能是这些空间格局指标并不适用于表征条带状空间。由此，在未来的研究中，可以进一步将不同形态特点的蓝绿空间分类，精细化探讨空间格局指标与降温效益的相关性。

本文将高密度城市的蓝绿空间与绿色空间、蓝色空间的降温效益进行了对比,证明了蓝绿空间格局与地表温度的相关性更为显著,弥补了以往单一蓝色或绿色空间研究的局限。此外,还揭示了对于城市蓝绿空间格局而言,面积类指数CA、形状类指数PARAMN、核心类指数TCA与CPLAND、聚散度指数DIVISION、AI以及COHESION是降温效益的主要影响因素,并基于此提出了城市蓝绿空间的优化策略。研究成果有助于实现高密度城市蓝绿空间格局的系统性优化与精细化调控,能够为城市规划实践提供参考,推动城市蓝绿空间融合发展。

注:文中图表均由作者自绘。

#### 参考文献

- [1] 王荣,王遵娅,高荣,等. 1961-2020年中国区域性高温过程的气候特征及变化趋势[J]. 地球物理学报, 2023, 66(02): 494-504.
- [2] 房信宜. 国家气候中心: 我国高温事件已持续30天,影响人口超过9亿人[EB/OL]. (2022-07-14). [https://www.guancha.cn/politics/2022\\_07\\_14\\_649218.shtml?s=sywglt](https://www.guancha.cn/politics/2022_07_14_649218.shtml?s=sywglt)
- [3] 石渠,李雄. 气候变化背景下绿色基础设施的研究进展与热点前沿[J]. 风景园林, 2022, 29(07): 73-79.
- [4] 于晓雨,许刚,刘樵,等. 长江三角洲地区城市建筑三维形态对地表热环境的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5806-5816.
- [5] PAN T, KUANG W H, PAN R Y, et al. Hierarchical Urban Land Mappings and Their Distribution with Physical Medium Environments Using Time Series of Land Resource Images in Beijing, China (1981-2021) [J]. Remote Sensing, 2022(14): 580.
- [6] BAI X, DAWSON R J, ÜRGE-VORSATZ D, et al. Six Research Priorities for Cities and Climate Change[J]. Nature, 2018, 555(7694): 23-25.
- [7] EAKIN H., KEELE S, LUECK V. Uncomfortable Knowledge: Mechanisms of Urban Development in Adaptation Governance[J]. World Development, 2022, 159: 106056.
- [8] CHEN X, XU Y, YANG J, et al. Remote Sensing of Urban Thermal Environments Within Local Climate Zones: A Case Study of Two High-density Subtropical Chinese Cities[J]. Urban Climate, 2020, 31: 100568.
- [9] ZHANG H, WANG Z, CHAI J. Land Use/Cover Change and Influencing Factors Inside the Urban Development Boundary of Different Level Cities: A Case Study in Hubei Province, China[J]. Heliyon, 2022: e10408.
- [10] 张歆越,高晓路,柴琪,等. 中国地级城市建成区蓝绿空间时空格局及其气候影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(01): 190-207.
- [11] 成雅迪,吴昌广. 基于局地气候优化的城市蓝绿空间规划途径研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3935-3945.
- [12] 胡凤宁,周亮. 城市绿色基础设施降温作用及其影响因素研究进展[J]. 生态学报, 2023(03): 1-16.
- [13] 王琨,王竞娴,田朝阳,等. 乔木覆盖率及形态特征对公园夏季微气候舒适性的调节作用——以郑州市绿荫公园为例[J]. 中国园林, 2022, 38(11): 94-99.
- [14] 高凯. 缓解城市人居热环境的绿化技术[J]. 园林, 2013(12): 20-22.
- [15] GUNAWARDENA K R, WELLS M J, KERSHAW T. Utilizing Green and Blue Space to Mitigate Urban Heat Island Intensity[J]. Science of the Total Environment, 2017: 584-585.
- [16] 徐洪,杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(06): 790-798.
- [17] YU Z, YANG G, ZUO S, 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.
- [18] ZHANG Q, ZHOU D, XU D, et al. Correlation Between Cooling Effect of Green Space and Surrounding Urban Spatial Form: Evidence from 36 Urban Green Spaces[J]. Building and Environment, 2022, 222: 109375.
- [19] DU C, JIA W, CHEN M, et al. How can Urban Parks be Planned to Maximize Cooling Effect in Hot Extremes? Linking Maximum and Accumulative Perspectives[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 317: 115346.
- [20] 王勇,李发斌,李何超,等. RS与GIS支持下城市热岛效应与绿地空间相关性研究[J]. 环境科学研究, 2008, 129(04): 81-87.
- [21] 李书严,轩春怡,李伟,等. 城市中水体的微气候效应研究[J]. 大气科学, 2008(03): 552-560.
- [22] EATOQUE R C, MURAYAMA Y, MYINT S W. Effects of Landscape Composition and Pattern on Land Surface Temperature: An Urban Heat Island Study in the Megacities of Southeast Asia[J]. Science of The Total Environment, 2017, 577: 349-359.
- [23] 石龙宇,郑巧雅,廖振珍. 雄安新区生态基础设施建设与城市发展协同度评价[J]. 生态学报, 2022, 42(12): 4968-4977.
- [24] 殷若晨,方家,朱丹,等. 城市公园降温效益的测度与气候适应性设计策略[J]. 中国园林, 2022, 38(06): 121-126.
- [25] SHI L Y, ZHENG Q Y, LIAO Z Z. Evaluation of Coordination Degree Between Ecological Infrastructure Construction and Urban Development in Xiong' an New Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42: 4968-4977.
- [26] 苏王新,常青. 城市热缓解的基于自然的解决方案与实施路径——以北京市为例[J]. 风景园林, 2022, 29(06): 26-32.
- [27] 袁畅洋,张佳琦,汤思琪,等. 基于文献计量分析的城市蓝绿空间生态效益研究综述与展望[J]. 园林, 2023, 40(04): 59-67.
- [28] 南京市统计年鉴(2021)[DB/OL]. [2023-04-26]. [http://tjj.nanjing.gov.cn/material/njnj\\_2021/zonghe/index.htm](http://tjj.nanjing.gov.cn/material/njnj_2021/zonghe/index.htm)
- [29] 郭建国. 景观生态学——概念与理论[J]. 生态学杂志, 2000(01): 42-52.
- [30] 宋菊芳,江雪妮,郭贞妮,等. 城市蓝绿空间特征参数与地表温度的关联量化分析[J]. 中国城市林业, 2023, 21(01): 20-26.
- [31] LIN W, YU T, CHANG X, et al. Calculating Cooling Extents of Green Parks Using Remote Sensing: Method and Test[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 134: 66-75.
- [32] MADHUMITHA J, SONJIA K, CARSTEN M B, et al. The Bigger, the Better? The Influence of Urban Green Space Design on Cooling Effects for Residential Areas[J]. Journal of Environment Quality, 2016, 45(1): 134-145.
- [33] 陈竞姝. 韧性城市理论下河流蓝绿空间融合策略研究[J]. 规划师, 2020, 36(14): 5-10.
- [34] LI Y L, FANG S X, LI K, et al. Large Urban Parks Summertime Cool and Wet Island Intensity and Its Influencing Factors in Beijing, China[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021(65): 217375.
- [35] ASIEH M, ANDREW M, NIGEL J. The Microclimatic Interaction of a Small Urban Park in Central Melbourne with its Surrounding Urban Environment During Heat Events[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020(52): 126688.
- [36] 王琳,祝亚鹏,卫宝立,等. 快速发展的中小城市地表热环境及水体温度调控作用研究——以山东省滨州市为例[J]. 水土保持通报, 2018, 38(02): 102-109.
- [37] LI Z L, DUAN S B, TANG B H, et al. Review of Methods for Land Surface Temperature Derived from Thermal Infrared Remotely Sensed Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 899-920.