

# 北京城市副中心及周边区域蓝绿空间景观格局及降温效应评估

## Landscape Pattern and Cooling Effect Evaluation of Blue-Green Space in Beijing's Sub-center and Surrounding Area

宋加颖<sup>1</sup> 孟丹<sup>1\*</sup> 冯鹏<sup>2</sup> 刘勇洪<sup>3</sup> 胡非凡<sup>1</sup> 李小娟<sup>1</sup>  
SONG Jiaying<sup>1</sup> MENG Dan<sup>1\*</sup> FENG Peng<sup>2</sup> LIU Yonghong<sup>3</sup> HU Feifan<sup>1</sup> LI Xiaojuan<sup>1</sup>

(1.首都师范大学资源环境与旅游学院, 水资源安全北京实验室, 北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048; 2.中国四维测绘技术有限公司, 北京 100048; 3.中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081)

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Laboratory Cultivation Base of Environment Process and Digital Simulation, Capital Normal University, Beijing Key Laboratory of Resources, Environment and Geographic Information System, Capital Normal University, Beijing, China, 100048; 2. China Siwei Surveying and mapping Technology Co.,Ltd., Beijing, China, 100048; 3. Earth System Modeling and Prediction Centre, China Meteorological Administration, Beijing, China, 100081)

文章编号: 1000-0283(2024)04-0086-09  
DOI: 10.12193/j.laing.2024.04.0086.011  
中图分类号: TU986  
文献标志码: A  
收稿日期: 2024-01-08  
修回日期: 2024-02-21

### 摘要

科学评估北京城市副中心及周边区域建设不同阶段景观格局和热环境, 对其今后的发展规划和相关政策制定具有重要意义。以北京城市副中心外围规划为基准稍作调整作为研究区, 选取2016年、2018年、2020年和2022年共4期资源三号遥感影像数据, 以及Google Earth Engine (GEE) 中4年6月1日-9月30日的Landsat 8遥感影像数据, 通过面向对象分类、地表温度反演、相关性分析方法定量分析不同时期的蓝绿空间景观格局以及蓝绿空间的降温效应。结果表明: (1) 2016-2022年, 研究区蓝空间的面积占比在保持稳定的同时逐渐增加, 绿空间的面积占比先减少后增加; (2) 2016-2022年, 北京城市副中心及周边区域蓝绿空间景观格局中各斑块类型在景观中的分布越来越均衡; (3) 2016-2022年间, 地表温度均值呈“上升—下降—上升”的波动变化, 蓝空间的地表温度最低, 其次是绿空间, 蓝空间和绿空间在一定程度上起到降温的作用; (4) 提高聚集度、减少人类活动的割裂程度、减小空间破碎度均可提升蓝绿空间的降温效应。总体而言, 北京城市副中心及周边区域建设使得蓝绿空间面积增加, 景观格局分布更加均衡, 蓝绿空间的降温效果较为明显。

### 关键词

城市蓝绿空间; 景观格局; 热环境; 北京城市副中心及周边区域; 降温效应

### Abstract

Scientific assessment of land cover, landscape pattern, and thermal environment in different stages of Beijing's sub-center and surrounding areas' construction is significant for future development planning and related policy making. Taking the peripheral planning of Beijing's Sub-center as the baseline and slightly adjusted as the research area, the remote sensing image data of ZY-3 in 2016, 2018, 2020, and 2022 were selected, and Landsat 8 remote sensing image data from June 1 to September 30 in Google Earth Engine(GEE). Through object-oriented classification, land surface temperature inversion, and correlation analysis methods, the blue and green spatial landscape pattern and the cooling effect of the blue and green space in different periods were quantitatively analyzed. The results showed that: (1) From 2016 to 2022, the area proportion of blue space in the study area gradually increased while maintaining stability, while the area proportion of green space first decreased and then increased; (2) From 2016 to 2022, the distribution of various patch types in the UBGS landscape pattern of Beijing's sub-center and its surrounding areas has become more and more balanced; (3) During 2016 to 2022, the mean land surface temperature (LST) showed a "rising-falling-rising" fluctuation. The LST of blue space was the lowest, followed by green space, which played a cooling role to a certain extent; (4) Improving the degree of aggregation, reducing the degree of fragmentation of human activities, and reducing the degree of spatial fragmentation can improve the cooling effect of UBGS. In general, the construction of Beijing's sub-center and surrounding area increases the UBGS area, the landscape pattern distribution is more balanced, and the cooling effect of UBGS is more prominent.

### Keywords

urban blue-green space; landscape pattern; thermal environment; Beijing's sub-center and surrounding area; cooling effect

### 宋加颖

1999年生/女/山东青岛人/在读硕士研究生/研究方向为城市生态环境监测与评估

### 孟丹

1980年生/女/山东聊城人/博士/副教授/研究方向为资源环境遥感

### 冯鹏

1981年生/男/山西朔州人/硕士/高级工程师/研究方向为卫星遥感应用

\*通信作者 (Author for correspondence)  
E-mail: mengdan@cnu.edu.cn

基金项目:  
国家自然科学基金面上项目“基于近场动力学的区域地面沉降建模方法与应用研究”(编号: 42271487)

随着气候变化和城市化进程不断加深,过去大都市的快速“增量扩张”导致城市下垫面及景观格局发生演化<sup>[1]</sup>,改变了城市地表的热力性质和近地表的大气层结构,从而打破地气界面的能量交换平衡,城市出现了热岛效应<sup>[2,3]</sup>,土地利用及植被覆盖变化是城市热岛效应形成、演变的主要因素。

城市蓝绿空间 (Urban Blue-Green Space, UBGs) 是由城市中各类水域、湿地、绿地等开敞空间所构成的空间系统<sup>[4]</sup>,既包含农业空间和生态空间中的农田、山体、森林、草地等,城镇空间中的公园、防护绿带、公共开放空间等,也包含由河流、湖泊、水库、池塘、滩地、沼泽等不同形态水体构成的复合水体空间<sup>[5]</sup>,是城市空间的重要组成部分。蓝绿空间作为绿色基础设施的重要组成部分,具有诸多生态系统服务,对缓解高密度城区热岛问题、改善城市热环境、促进生态环境健康、改善局地微气候的作用显著<sup>[6,9]</sup>。城市蓝绿空间可以通过降低储热能力和创造更高的反射表面(高反照率)来减少吸收的太阳辐射量,从而缓解超高温辐射效应<sup>[9]</sup>。其中,绿地的降温功能主要来源于植被对太阳光的遮蔽,以及对太阳辐射的蒸发蒸腾和光合作用<sup>[10]</sup>;水体通过蒸散发和形成通风廊道,促进空气流动来产生降温效果,由于其具有高热惯性、高热容量和低热传导率,也是城镇日间降温的重要因素<sup>[11]</sup>。

城市蓝绿空间形态结构因子的合理组成和配置是影响城市热岛格局的关键因素。景观组成通常用土地覆被类型和各土地覆被类型所占比例来描述,而景观配置则侧重于描述单个区域的空间特征和不同区域之间的空间关系<sup>[12]</sup>。之前的研究发现,蓝绿空间的冷却效果取决于空间的大小、形状、连通性和复杂性等<sup>[13]</sup>。较大的绿地具有较高

的降温效果<sup>[14]</sup>,当蓝绿空间的面积大到一定程度( $>1 \text{ hm}^2$ )时,复杂的形状也有很强的冷却作用<sup>[15]</sup>。在北京,一个区域绿化覆盖率大于30%时,绿地对热岛有较明显的削弱作用;覆盖率大于50%,绿地对热岛的削减作用极其明显<sup>[16]</sup>。对于缓解绿地附近地区的城市热量,绿地的大小、形状和绿化可能效果有限,而增加绿地边缘的绿化和增强绿地的凝聚力是扩大降温效益的更有效手段<sup>[17]</sup>,形状更简单、连接更紧密、碎片更少的相对较大的绿地斑块降温效益更好<sup>[18]</sup>。有研究表明,河流的降温效果远高于其他湿地类型和绿地,在苏州,水体构成的“蓝色空间”降温能力( $10.5^\circ\text{C}$ )远大于植被“绿色空间”的冷岛强度( $4.8^\circ\text{C}$ )<sup>[19]</sup>,其中湖泊和水库的不规则形状可能会削弱冷却效果<sup>[20]</sup>。城市湿地的冷却能力与湿地的面积、形状和水文连通性之间存在很强的正相关关系,形状更复杂的湿地具有更好的降温效果<sup>[21]</sup>,湿地的形状和位置是影响城市区域冷岛强度的重要指标<sup>[22]</sup>。河流对周围温度的调节能力受到空间格局和区域气候因素的影响<sup>[23]</sup>。水体与植被的结合具有协同降温效应,蓝绿空间组构协同冷岛效应远高于单一生态元素效应<sup>[24]</sup>。同时,蓝绿空间的降温效应与季节变化和日变化有关,比如草地在夏季和春秋是热汇,而在冬季却成为了热源,感热通量的最大值和典型城市景观间的最大差异均出现在中午至下午两点之间<sup>[25]</sup>。大多数研究表明,城市蓝绿空间在夏季的降温效果比冬季更为显著。此外,Yu等<sup>[14,26]</sup>为了将蓝绿空间的降温效应研究与可操作的气候适应规划联系起来,提出了效率阈值(TVoE)的概念。TvoE可以使决策者利用最小的蓝绿空间达到最好的降温效果。

北京城市副中心的建设必然引起土地利用类型的改变,进而影响区域蓝绿空间布局,

而蓝绿空间的改变对城市热环境影响显著。从现有对北京城市副中心的研究来看,主要为土地利用、城市热岛效应等单方面的分析研究,缺少多方面、整体性的研究,此外关于蓝绿空间景观格局特征对降温效应的影响有待进一步讨论。基于此,本研究借助不同时相ZY-3和Landsat 8遥感影像数据,评估了2016-2022年北京城市副中心及周边区域蓝绿空间景观格局的变化,并以2016年为例,分析了蓝空间、绿空间、蓝绿空间协同降温效应,为北京城市副中心及周边区域的蓝绿空间规划布局等生态环境建设方面提供借鉴和参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

通州区是北京市城市副中心所在地,地处北京市东南部,京杭大运河北端( $39^\circ 36' - 40^\circ 02' \text{ N}$ ,  $116^\circ 32' - 116^\circ 56' \text{ E}$ ),面积 $907 \text{ km}^2$ ;地处永定河、潮白河冲积洪积平原;属暖温带大陆性季风气候区。西临朝阳区、大兴区,北与顺义区接壤,东隔潮白河与河北省三河市、大厂回族自治县、香河县相连,南和天津市武清区、河北省廊坊市交界。由于大运河漕运的重要性,通州、北京和天津享有“一京、二卫、三通州”之称。

2018年12月27日,党中央、国务院正式批复《北京城市副中心控制性详细规划(街区层面)(2016年-2035年)》,批复提出遵循中华营城理念、北京建城传统、通州地域文脉,构建蓝绿交织、水城共融、文化传承、多组团集约紧凑发展的生态城市布局,形成“一带、一轴、多组团”的空间结构。其中一带指依托大运河构建蓝绿交织的生态文明带,总长度约 $23 \text{ km}$ ;一轴指依托六环路建设的创新发展轴,总长度约 $14 \text{ km}$ ;多组团指

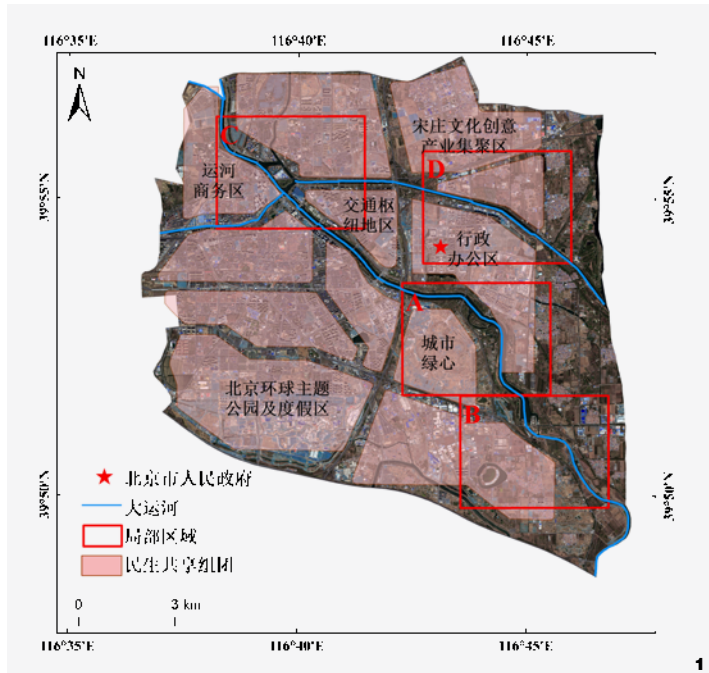


图1 研究区遥感影像(2020年4月11日资源三号321 (RGB) 波段组合)  
Fig. 1 Remote sensing image of the study area

的是依托水网、绿网、路网形成的12个民生共享组团和36个美丽家园(街区),在一带一轴交汇处,规划建设面积约11.2 km<sup>2</sup>的城市绿心公园,对原东方化工厂地区进行生态治理,建成大尺度的城市森林公园。基于此,本研究选取城市副中心外围规划为基准,向东稍作扩大至通州区界,作为研究区(图1),面积约178.52 km<sup>2</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 蓝绿空间信息提取

本研究采用资源三号(ZY-3)卫星遥感数据提取研究区土地利用信息,进而提取研究区蓝绿空间。ZY-3数据来源于中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com.cn/>),全色分辨率21 m,多光谱分辨率5.8 m,融合后分辨率2.1 m,具有红、绿、蓝和近红外4个波段。遥感影像分别取自2016年5月21日和5月26日、2018年5月4日、2020年4月11日和2022年5月2日,研究区内云量小于5%且可以较好地反应出植被的覆盖状况。ZY-3遥感数据的空间分辨率较高,可以较为精确提取城市蓝绿空间斑块信息,北京春季物候始于4月初<sup>[27]</sup>,植被覆盖地表信息可以识别,且城市内不同季节水体范围变化不大,本研究提取的蓝绿空间可用于评估城市夏季蓝绿空间降温效应。

ZY-3的数据预处理在ENVI5.3中完成,首先对多光谱影像进行辐射定标,将图像的亮度和灰度值转为绝对的辐射亮度,然后使用FLAASH工具实现多光谱影像的大气校正,消除因大气的反射和散射等造成的误差,使用RPC Orthorectification Workflow工具进行正射校正,以处理几何畸变;全色影像需要进行辐射定标和正射校正处理。对处理好的多光谱影像和全色影像进行配准和融合。选取Gram-schmidt Pan Sharpening (GS)方法完成图像融合,融合后遥感影像分辨率为21 m。对融合后的影像进行裁剪,得到研究区域范围的影像。2016年有两景影像,需要先镶嵌后裁剪。

根据研究区的遥感影像特征和实际情况,以及土地利用现状分类标准(GB/T21010-2017),本研究将研究区的土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和裸地6个类别,由于在建设期间,为防止施工中产生的浮尘、扬尘造成空气污染,会使用绿网覆盖裸土,所以遥感影像中绿网覆盖的地类划分为裸土。本研究土地利用的分类方法主要是基于eCognition的面向对象分类,该方法主要包括了影像分割、地物分类提取两个部分。首先将预处理后的遥感影像进行多尺度分割,产生影像对象,分割尺度过大会导致质异性;分割尺度过小,则会产生过多数量多边形,导致同质异谱现象的产生<sup>[28]</sup>。通过不断的实验与对比发现,本研究分割尺度参数设为200较为合适。因地物特征、空间分布方式等差异,每一地物类别都有相对独立的专属特征,从而与其他地物进行区分<sup>[29]</sup>。分割后利用NDWI、NDVI等光谱特征以及纹理、形状、空间信息等特征,通过阈值分类的方法,提取影像信息,结合eCognition规则集对影像进行分类。基于土地利用类型的分类结果,将研究区划分为蓝空间(水域)、绿空间(包括耕地、林地、草地)和其他空间(包括裸地、建设用地)这三类景观。

为保证面向对象分类结果的精度,本研究对4期遥感影像的土地利用分类结果进行精度评价。在ArcGIS中使用渔网工具生成共455个随机样本点,基于ZY-3高分辨率遥感影像生成验证样本,在eCognition中生成混淆矩阵对分类结果进行分析,4期遥感图像分类结果总体精度分别为:85.59%、83.90%、84.68%和87.83%,Kappa系数分别达到0.80、0.79、0.81和0.82。该分类结果可靠性较强且精确度较高。

### 1.2.2 蓝绿空间景观格局指数

景观格局分析可采用景观格局指数来进行描述<sup>[30]</sup>,使用Fragstats来进行计算<sup>[31]</sup>。根据景观指数选取原则<sup>[32]</sup>,本研究选取斑块数量(NP)、边缘密度(ED)、面积加权的平均形状指标(SHAPE\_AM)、聚

集度指数 (AI) 这4个斑块类型水平景观格局指数 (表1) 用于分析蓝绿空间景观格局结构特征, 采用传统的全局景观指数计算方法来进行计算分析; 为了更准确地反映景观格局指数和地表温度之间的关系, 采用移动窗口法分别计算城市蓝色空间、绿色空间和蓝绿空间的景观格局指数。

### 1.2.3 地表温度反演

计算地表温度所使用的数据来自 Google Earth Engine (GEE) 中提供的 Landsat Collection2 Level-1 数据集, 该数据集是经过准确大气校正后的遥感数据产品。有研究表明北京地区夏季城市热岛效应显著<sup>[33]</sup>, 同时为了避免选取某一天数据波动不能代表一个季节的均值, 本研究选取了研究区内2016年、2018年、2020年、2022年这4个年份6月1日—9月30日的 Landsat 8 遥感影像, 求取当年夏季地表温度均值。本研究采用大气校正法<sup>[34]</sup>反演地表温度。

### 1.2.4 蓝绿空间的降温效应分析方法

为了分析蓝绿空间的降温效应, 本研究

从分类统计不同景观类型的地表温度、景观格局指数与地表温度相关性两个方面进行分析。

首先, 将地面温度及不同用地类型数据进行空间叠加, 统计不同景观类型的地表温度。采用最小—最大值标准化 (Min-Max Normalization) 方法<sup>[35]</sup>对地表温度进行归一化处理, 以消除具体温度值受天气背景的影响。将研究区的景观类型和归一化后的地表温度进行空间叠加分析, 探讨不同景观类型对地表温度的影响。

其次, 研究蓝绿空间景观格局特征对降温效应的影响, 分析了蓝空间、绿空间、蓝绿空间协同降温效应。首先要计算景观格局指数空间分布图, 土地利用分类数据空间分辨率为2.1 m×2.1 m, 采用105 m×105 m移动窗口, 从研究区左上角开始移动, 每次移动1个栅格, 计算每个窗口内景观指数值, 并赋予各个窗口的中心栅格, 最终获得各个景观格局指数的空间分布图<sup>[36]</sup>。其次, 在ArcGIS中利用渔网工具创建100 m×100 m的渔网, 随机选取1 154个样本点, 并将景观格局指数计算

结果和地表温度反演结果链接至样本点, 导入SPSS软件中采用Kolmogorov-Smirnov进行数据的正态性检验, 结果表明, 除地表温度以外, 其他数据均不满足正态分布, 因此选择Spearman相关系数进行地表温度与景观格局指数的相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 蓝绿空间景观格局分析

研究区蓝绿空间分布如图2所示, 用于分析北京城市副中心及周边区域蓝绿空间的时空变化。对于整个研究区, 2016–2022年间, 蓝空间的面积占比在保持稳定的同时逐渐增加, 在2022年蓝空间的面积占比最大, 达到了5%, 而绿空间的面积占比先减少后增加, 在2020年占比最少, 仅有30%, 在2022年占比回升达到了40%。表明北京市城市副中心的生态建设在2022年已初见成效, 蓝空间和绿空间的面积占比在2022年都达到了研究时间段内最高水平。对于整个研究区, 2016年、2018年、2020年、2022年的绿空间面积依次为70.65 km<sup>2</sup>、66.48 km<sup>2</sup>、54.16 km<sup>2</sup>、71.33 km<sup>2</sup>; 蓝空间面积依次为7.66 km<sup>2</sup>、8.02 km<sup>2</sup>、7.54 km<sup>2</sup>、8.97 km<sup>2</sup>。

基于ArcGIS软件和Fragstats平台对研究区的蓝空间、绿空间进行景观格局分析。水域 (蓝空间) 和植被 (绿空间) 景观指数结果见表2。2016–2022年, 蓝空间聚集度 (AI) 先上升, 后下降, 2020年聚集度达到最高, 2022年稍有下降但高于2016年, 说明城市副中心建设使蓝空间朝着聚集的方向发展。边缘密度 (ED)、斑块个数 (NP) 则是呈先下降, 后上升的趋势, 且都在2022年达到最高, 这表明在2018和2020年由于城市绿心森林公园、北京环球度假区等地的建设, 蓝空间的边缘密度 (ED)、斑块个数 (NP) 发生下降, 而在

表1 景观格局指数公式及生态学意义

Tab. 1 The formula of landscape pattern index and its ecological significance

指数名称 Exponential name	计算公式 Calculation formula	生态学意义 Ecological significance
聚集度指数 (AI)	$AI = 2 \ln n + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij})$	反映景观的破碎化程度和空间异质性程度
边缘密度 (ED)	$ED = \sum_{j=1}^n P / A$	衡量景观中斑块形状和斑块边缘的复杂程度
斑块数量 (NP)	$NP = n$	反映某一景观的空间破碎程度
面积加权的平均形状指标 (SHAPE_AM)	$SHAPE\_AM = \sum_{j=1}^m [0.25P_{ij}/a_{ij}] \left( a_{ij} \sum_{i=j}^m a_{ij} \right)$	表示斑块类型的面积加权平均形状指数

注:  $i$ 代表景观类型中的某个类别, 即第 $i$ 类;  $j$ 代表某一景观类别中的某个斑块, 即第 $j$ 个斑块;  $a_{ij}$ 表示第 $i$ 类景观第 $j$ 个斑块的面积;  $P_{ij}$ 表示第 $i$ 类景观第 $j$ 个斑块的周长;  $n$ 表示景观类型中斑块数目;  $A$ 表示景观总面积;  $m$ 表示景观中的斑块类型数目。

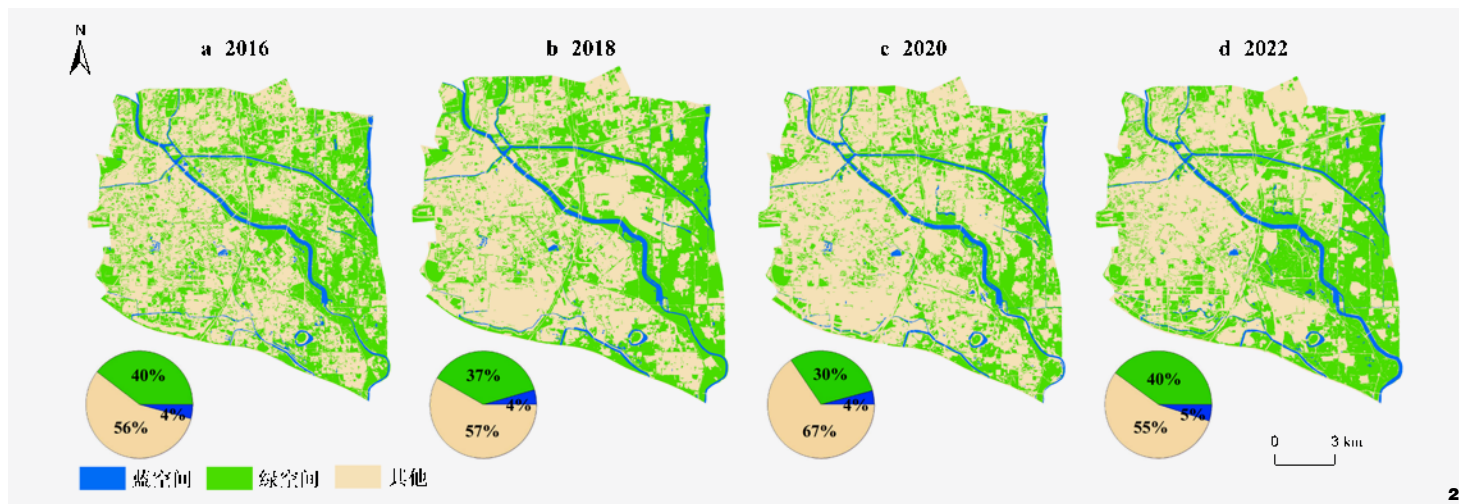


图2 蓝绿空间分布图  
Fig. 2 Blue-green spatial distribution map

表2 2016–2022年蓝绿空间景观格局指数计算结果  
Tab. 2 Calculation results of blue-green spatial landscape pattern index from 2016 to 2022

类别 Class	年份 Year	景观格局指数 Landscape pattern index			
		AI/%	ED/ (m/hm <sup>2</sup> )	NP	SHAPE_AM
蓝空间	2016	97.54	19.32	288	3.62
	2018	98.07	16.83	270	3.41
	2020	98.08	15.10	203	3.26
	2022	97.99	19.33	368	3.42
绿空间	2016	96.64	254.19	3 379	13.93
	2018	97.79	160.91	1 774	11.37
	2020	96.37	198.95	2 310	8.36
	2022	97.30	205.95	2 721	13.11

2022年建设基本完成，蓝空间斑块数量最多，但人类活动对蓝空间的分割使蓝空间的斑块边缘更加不规则。面积加权的平均形状指标 (SHAPE\_AM) 在2016–2020年逐年下降，2022年有所上升，反映了建设期间蓝空间斑块形状在2020年最规则，而在2022年由于城市绿心公园等地开园营业，使蓝空间的斑块形状规则性稍有下降，但依然高于2016年。

2016–2022年，绿空间边缘密度 (ED) 在2018年降到最低，2020年、2022年稍有增加，

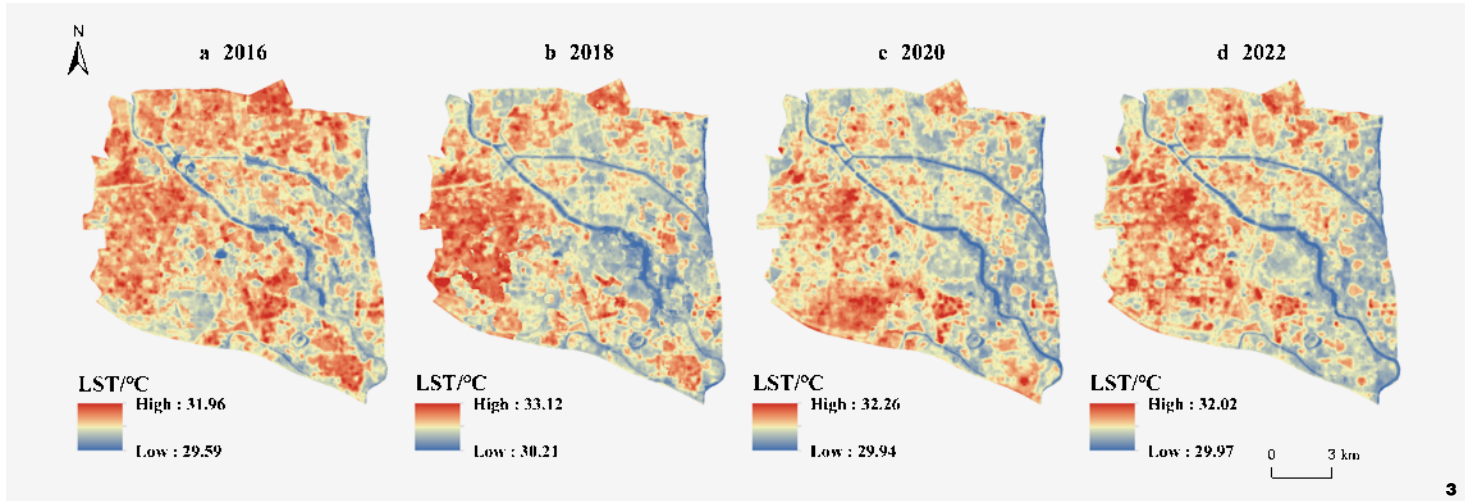
而且聚集度 (AI) 呈“上升—下降—上升”的波动变化，在2018年聚集度较高是因为这一年绿空间的斑块数量较少且人类活动对绿空间的分割程度较小，在2020年聚集度大幅下降且在2022年回升到较稳定的水平，反映了人类活动对绿空间的分割是朝着集聚、连片的方向发展的。斑块个数 (NP) 呈先下降、后上升的趋势，这表明在2018和2020年由于运河周边仍处于建设期间，相比于2016年绿空间的斑块个数 (NP) 减少，而在2022年随

着建设逐步完成植被覆盖有所回升。面积加权的平均形状指标 (SHAPE\_AM) 在2016–2020年逐年下降，2022年上升，反映了建设期间绿空间斑块形状同蓝空间变化一致，在2020年斑块形状最规则。

## 2.2 蓝绿空间的降温效应分析

北京城市副中心及周边地区地表温度反演结果如图3所示，可以看出：2016年，高温区涉及面积较广，在北部、西部、中南部和东南部成块分布；2018年，高温区域明显减少，且主要集中在西部地区，中南部区域尤其是城市绿心森林公园区域内，地表温度显著下降；2020年，北京环球度假区正在建设期间，导致该区域内的地表温度显著上升，城市绿心公园开园，该区域地表温度保持较低水平；2022年，伴随着北京环球度假区正式开园，该区域的地表温度也显著下降。

将研究区的蓝绿空间和归一化后的地表温度进行空间叠加分析，可以展现出不同时期蓝绿空间的地表温度，从而更好地探讨蓝绿空间对地表温度的影响。通过图4可以发



现：在这三种景观类型中，蓝空间的地表温度最低，其次是绿空间，一定程度上反映了蓝绿空间能够起到降低地表温度、缓解热岛效应的作用；2016–2020年蓝空间、绿空间和其他空间的地表温度持续下降，但在2022年有所回升，说明从2018年开始城市副中心的建设使得地表温度显著下降，而在2022年随着城市绿心公园和北京环球度假区开园，人流量、车流量增加，地表温度也相较2020年稍有上升，但均低于2016年。

以2016年为例，对景观格局指数和地表温度进行相关性分析，以此探究蓝空间、绿空间、蓝绿空间协同降温效应。

根据分析结果（图5）可知，蓝绿空间中AI与其他三个景观指数及地表温度均呈负相关，说明蓝绿空间的聚集度以及面积大小是影响其降温效应的关键因素之一。ED和SHAPE\_AM都与地表温度呈正相关，这两项指标反映了斑块形状的规则性，也表明人类活动对蓝绿空间降温效应的影响，蓝绿空间的斑块边缘不规则会降低其降温效应。在蓝色空间中NP与地表温度的相关性并不明显，而

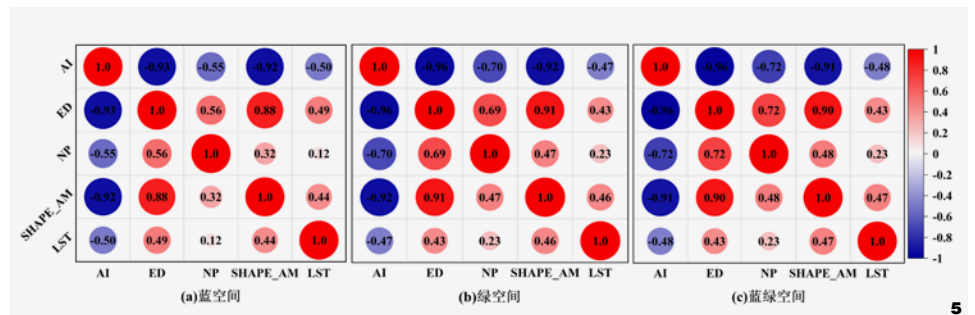
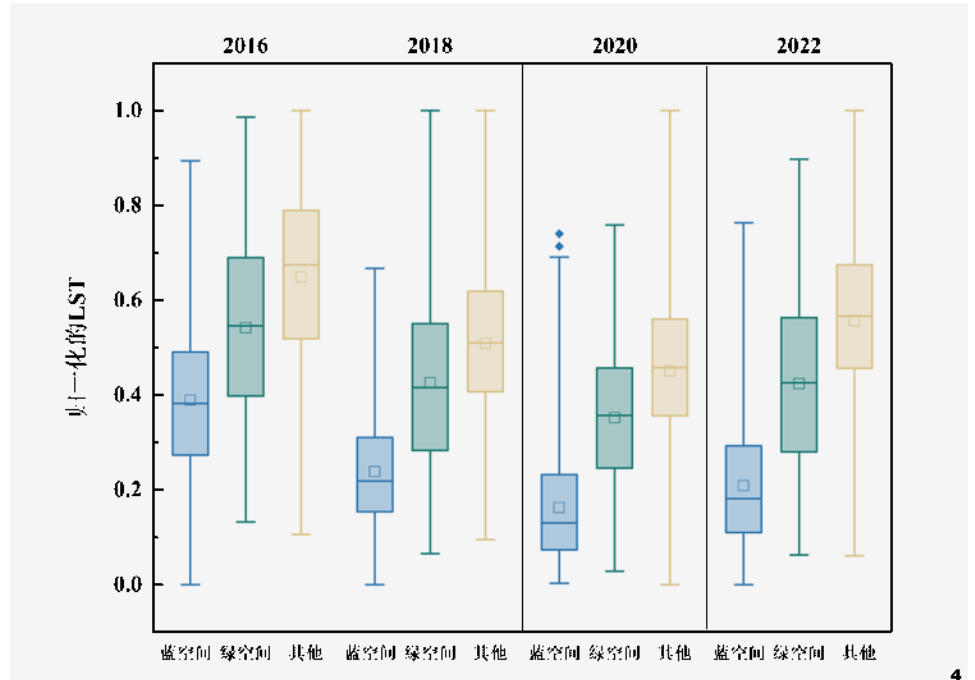


图3 2016–2022年地表温度空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of land surface temperature during 2016–2022

图4 不同景观类型的地表温度箱线图  
Fig. 4 Box plots of surface temperature for different land use types

图5 景观格局指数与地表温度相关性计算结果  
Fig. 5 Results of correlation calculation between landscape pattern index and land surface temperature

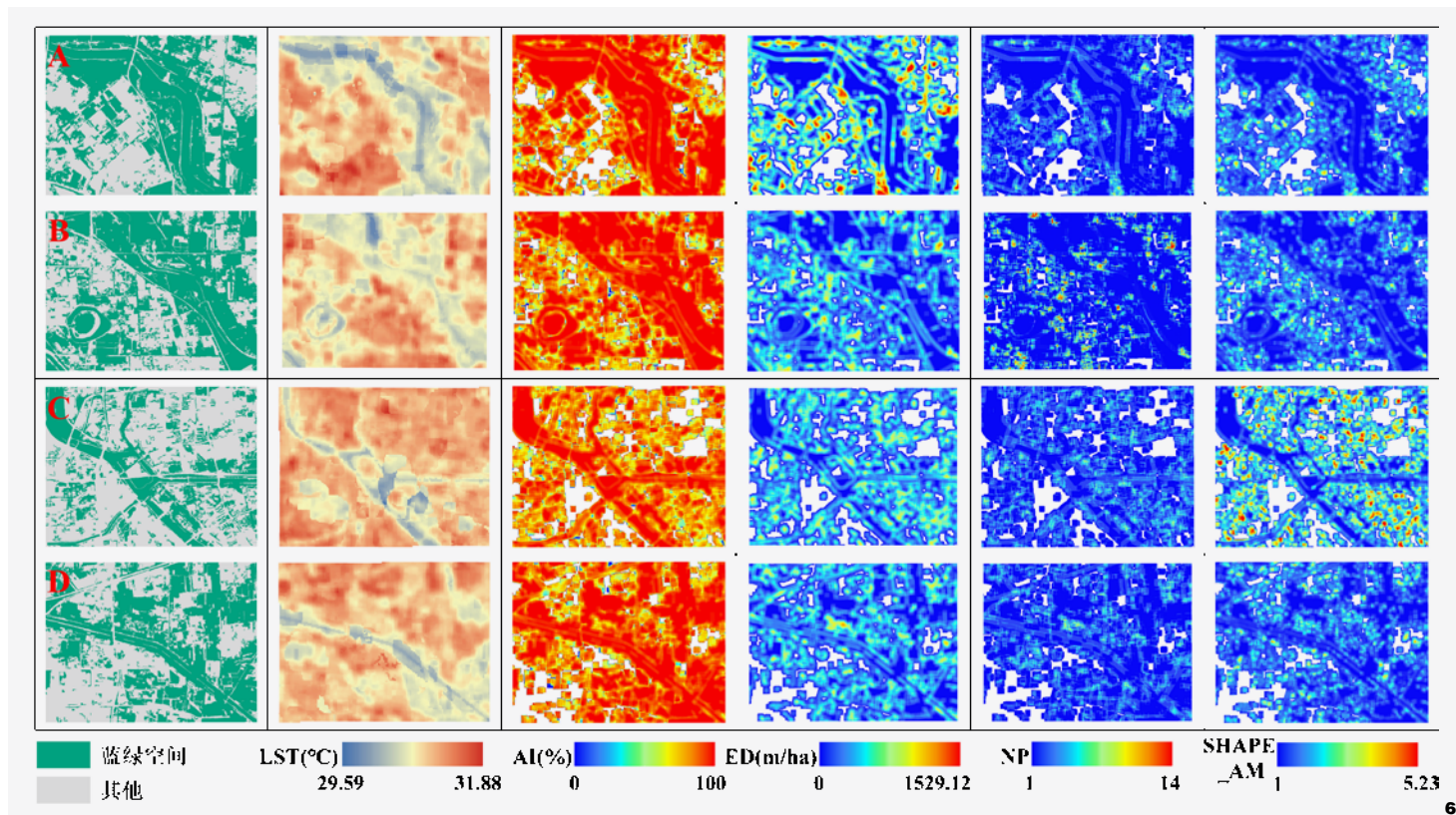


图6 蓝绿空间景观格局指数与地表温度  
Fig. 6 Blue-green spatial landscape pattern index and surface temperature

在绿色空间中NP与地表温度有较弱的正相关性，说明绿色空间越破碎，降温效果越差，反之斑块越大，降温效果越好。蓝色空间中AI、ED与地表温度的相关性大于绿色空间和蓝绿空间的，说明蓝空间的聚集度和斑块边缘密度更能影响地表温度。并且从整体上来看，蓝绿空间协同降温效应要高于单独的绿空间、蓝空间的降温效应。

选取研究区中4个局部区域(位置见图1)的地表温度及蓝绿空间景观格局指数进行空间展示(图6),A区域位于城市绿心公园周边,B区域位于通州大运河森林公园下游地区,C区域位于五河交汇运河商务区周边,D区域位于运河减河地区,4个区域蓝绿空间占比依次为57%、59%、65%、50%，地表温度均值依

次为30.86℃、30.89℃、31.02℃、30.96℃。其中,A区域地表温度均值最低,而蓝绿空间的占比并不是最高,蓝绿空间景观指数AI均值最高,ED、NP和SHAPE\_AM均值最低,说明此区域的蓝绿空间较为聚集,形状较为规则;C区域的地表温度均值最高,而蓝绿空间的占比最高,蓝绿空间景观指数AI均值最低,ED、NP和SHAPE\_AM均值最高,说明此区域的蓝绿空间较为破碎,呈不规则分布。由此可知,提高蓝绿空间的聚集度(AI)可以降低地表温度,提高蓝绿空间的破碎化(NP、SHAPE\_AM)及边缘的割裂程度(ED)会提高地表温度,通过蓝绿空间的景观合理规划与配置可以调解城市地表温度,改善城市热岛效应。

### 3 讨论

本研究定量分析了2016年、2018年、2020年和2022年的蓝绿空间分布以及蓝绿空间景观格局的时空变化。结果表明,2020年,北京城市副中心及周边区域建设期间蓝绿空间之外的其他用地类型面积最大,且主要集中在北京环球度假区和城市绿心森林公园区域内,这主要是因为在建设期间,为防止施工中产生的浮尘、扬尘造成空气污染,会使用绿网覆盖裸土,北京环球度假区累计绿网苫盖量达28.6 km<sup>2</sup>。城市绿心森林公园的原址是东方化工厂,规划总面积11.2 km<sup>2</sup>,是一处集生态修复、市民休闲、文化传承于一体的城市森林公园。2022年,伴随着城市绿心森林公园、北京环球度假区相继开园,园区内

的其他用地转变为蓝绿空间。城市绿心森林公园西北角为北京大运河博物馆、北京城市副中心图书馆和北京城市副中心剧院三大建筑。蓝绿空间的变化与北京城市副中心的规划基本相符。参考Liu等<sup>[37]</sup>的研究可知,到2035年北京城市副中心(通州区)的土地利用空间分布格局,在城镇可持续发展情景下生态用地面积与分布最优,最有利于实现城市可持续发展。

对北京城市副中心及周边区域蓝绿空间的景观格局变化进行分析,建设期间蓝空间斑块数量在增加的同时聚集度下降,说明北京城市副中心及周边区域蓝空间面积增加但分布较为分散。根据城市副中心的规划可知,这是由于生态文明带及其附近城市绿心森林公园、行政办公区等民生共享组团的建设,人类活动对该区域的切割程度最大。

将蓝绿空间分布数据和地表温度数据进行空间叠加分析,分析蓝绿空间的降温效应,发现蓝空间和绿空间的地表温度远低于其他景观类型,2016-2022年期间,蓝绿空间面积增加了1.98 km<sup>2</sup>,由于蓝绿空间规模越大,其降温能力越强<sup>[8]</sup>,反映了蓝绿景观通过蒸发和遮荫在缓解城市热岛方面发挥着重要作用<sup>[38]</sup>,这也与谢军飞等<sup>[39]</sup>对北京通州区(含北京城市副中心)地表温度的分析结论相符。结合城市副中心的规划可以发现,从2018年城市副中心的建设开始,运河商务区 and 城市绿心地表温度明显降低,北京环球主题公园及度假区的地表温度则是因建设先升高后逐渐降低,建设交通枢纽区和行政办公区使该区域地表温度逐步升高,宋庄文化创意产业集聚区建设完成后地表温度明显低于2016年。进一步分析蓝绿空间景观格局的降温效应可以发现,蓝绿空间的聚集度越大,面积越大,降温效果越好;蓝

绿空间越破碎,人类活动对蓝绿空间的分割程度越大,其降温效果越差。而且在4个景观格局指数中,聚集度(AI)与地表温度的相关性最强,这与Estoque等<sup>[40]</sup>的研究结果一致,其中聚集度的相关性蓝空间>蓝绿空间>绿空间。

本研究选取了ZY-3卫星数据作为土地利用解译和蓝绿空间景观格局分析的基础数据,该数据分辨率较高,研究结论比较真实、可靠。但本研究只选取了代表性较高的4个景观格局指数,数量较少,在后续的研究中,可以尽可能多地选取不同类型的景观指数,更加全面地分析蓝绿空间的降温效应。除景观格局角度以外,还有研究提出了从网络角度考虑缓解城市热岛效应,构建的地表热网框架可以为气候适应和城市可持续发展提供新的见解<sup>[41]</sup>。另外,蓝绿空间的协同降温效应是一个比较复杂的生态过程,除自然因素外,还受到社会经济等因素的影响,后期应专注于多角度多因子指标的协同降温作用。

#### 4 结论

(1) 2016-2022年,研究区蓝空间的面积占比在保持稳定的同时逐渐增加,绿空间的面积占比先减少后增加,且都在2022年都达到了研究时间段内最高水平,蓝绿空间的变化与规划基本相符。

(2) 根据景观格局指数,2016-2022年,北京城市副中心及周边区域蓝绿空间景观格局中各斑块类型在景观中的分布越来越均衡,人类活动对蓝空间和绿空间的分割朝着聚集、连片的方向发展,规划批复后人类活动对蓝绿空间的影响较大。

(3) 基于地表温度(LST)对北京城市副中心及周边区域蓝绿空间的降温效应进行

分析,蓝空间和绿空间的地表温度远低于其他景观类型,说明蓝绿空间在一定程度上能够起到降低地表温度、缓解城市热岛效应的作用,且建设期间人类活动会使地表温度上升,随建设完成后逐渐下降。

(4) 相对于蓝空间、绿空间单独的降温效应,蓝绿空间整体的降温效应更为显著,聚集度指数AI和形状类指数SHAPE\_AM、ED是降温效应的主要影响因素。

综上所述,北京城市副中心及周边区域蓝绿空间的建设整体在空间占比、景观格局、改善热环境方面都朝着越来越好的方向稳定发展,可以通过提高蓝绿空间的聚集度,减少对蓝绿空间的破坏、割裂,降低其破碎化程度来提高蓝绿空间的降温效果。

注:图1底图源于中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com.cn/>);其余图表均由作者绘制。

#### 参考文献

- [1] WANG J, CHEN Y, LIAO W, et al. Anthropogenic Emissions and Urbanization Increase Risk of Compound Hot Extremes in Cities[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(12): 1084.
- [2] YU Z, YAO Y, YANG G, et al. Spatiotemporal Patterns and Characteristics of Remotely Sensed Region Heat Islands During the Rapid Urbanization (1995-2015) of Southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 242-254.
- [3] 王煜, 唐力, 朱海涛, 等. 基于多源遥感数据的城市热环境响应与归因分析——以深圳市为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(22): 8771-8782.
- [4] 吴岩, 贺旭生, 杨玲. 国土空间规划体系背景下市县蓝绿空间系统专项规划的编制构想[J]. *风景园林*, 2020, 27(01): 30-34.
- [5] 黄铎, 易芳蓉, 汪思哲, 等. 国土空间规划中蓝绿空间模式与指标体系研究[J]. *城市规划*, 2022, 46(01): 18-31.
- [6] 苏王新, 常青, 刘筱, 等. 城市蓝绿基础设施降温效应研究综述[J]. *生态学报*, 2021, 41(07): 2902-2917.
- [7] 马瑞明, 谢苗苗, 鄢文聚. 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.



- [8] 赵海月, 胡森, 朱建宁, 等. 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[J]. 生态学报, 2023, 43(12): 4904-4919.
- [9] FAN H, YU Z, YANG G, et al. How to Cool Hot-Humid (Asian) Cities with Urban Trees? An Optimal Landscape Size Perspective[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 265: 338-348.
- [10] WONG N H, YU C. Study of Green Areas and Urban Heat Island in a Tropical City[J]. *Habitat International*, 2005, 29(3): 547-558.
- [11] 朱雯, 王敏. 基于遥感反演的江南水网地区城镇蓝绿空间格局对夏季降温的影响与尺度效应分析[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 86-97.
- [12] GUSTAFSON E J. Quantifying Landscape Spatial Pattern: What is the State of the Art?[J]. *Ecosystems*, 1998, 1(2): 143-156.
- [13] 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.
- [14] YU Z, GUO X, JØRGENSEN G, et al. How Can Urban Green Spaces be Planned for Climate Adaptation in Subtropical Cities?[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 152-162.
- [15] YANG G, YU Z, JØRGENSEN G, et al. How Can Urban Blue-Green Space be Planned for Climate Adaption in High-Latitude Cities? A Seasonal Perspective[J]. *Sustainable Cities And Society*, 2020, 53: 101932.
- [16] 李延明, 徐佳, 张济和, 等. 城市绿化对北京城市热岛效应的缓解作用[J]. 北京园林, 2002(4): 12-16.
- [17] SHIH W. Greenspace Patterns and the Mitigation of Land Surface Temperature in Taipei Metropolis[J]. *Habitat International*, 2017, 60: 69-80.
- [18] MASOUDI M, TAN P Y. Multi-year Comparison of the Effects of Spatial Pattern of Urban Green Spaces on Urban Land Surface Temperature[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 184: 44-58.
- [19] VAZ MONTEIRO M, DOICK K J, HANDLEY P, et al. The Impact of Greenspace Size on the Extent of Local Nocturnal Air Temperature Cooling in London[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 16: 160-169.
- [20] LIN Y, WANG Z, JIM C Y, et al. Water as an Urban Heat Sink: Blue Infrastructure Alleviates Urban Heat Island Effect in Mega-City Agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121411.
- [21] XUE Z, HOU G, ZHANG Z, et al. Quantifying the Cooling-Effects of Urban and Peri-Urban Wetlands Using Remote Sensing Data: Case Study of Cities of Northeast China[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 92-100.
- [22] SUN R, CHEN A, CHEN L, et al. Cooling Effects of Wetlands in an Urban Region: The Case of Beijing[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 20: 57-64.
- [23] JIANG L, LIU S, LIU C, et al. How do Urban Spatial Patterns Influence the River Cooling Effect? A Case Study of the Huangpu Riverfront in Shanghai, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 69: 102835.
- [24] JIANG Y, SONG D, SHI T, et al. Adaptive Analysis of Green Space Network Planning for the Cooling Effect of Residential Blocks in Summer: A Case Study in Shanghai[J]. *Sustainability (Basel, Switzerland)*, 2018, 10(9): 3189.
- [25] YU Z, CHEN T, YANG G, et al. Quantifying Seasonal and Diurnal Contributions of Urban Landscapes to Heat Energy Dynamics[J]. *Applied Energy*, 2020, 264: 114724.
- [26] YU Z, XU S, ZHANG Y, et al. Strong Contributions of Local Background Climate to the Cooling Effect of Urban Green Vegetation[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6798-6799.
- [27] 张聪聪, 孟丹, 李小娟. 京津冀地区植被物候时空变化及其对城市化的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 249-262.
- [28] 陈蕊, 张继超. 基于eCognition的遥感图像面向对象分类方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(2): 91-95.
- [29] 邓媛媛, 巫兆聪, 易俐娜, 等. 面向对象的高分辨率影像农用地分类[J]. 国土资源遥感, 2010(04): 117-121.
- [30] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. 生态学报, 2008(11): 5521-5531.
- [31] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [32] 张梦迪. 北京市通州区绿色空间格局演变及其对生境质量变化的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [33] 孟丹, 刘蕊蕊, 张聪聪. 北京市植物物候对热岛效应的响应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 844-854.
- [34] SOBRINO J A, JIMÉNEZ-MUÑOZ J C, PAOLINI L. Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT TM 5[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 434-440.
- [35] CAI Y, CHEN Y, TONG C. Spatiotemporal Evolution of Urban Green Space and Its Impact on the Urban Thermal Environment Based on Remote Sensing Data: A Case Study of Fuzhou City, China[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 41: 333-343.
- [36] 李栋科, 丁圣彦, 梁国付, 等. 基于移动窗口法的豫西山地丘陵地区景观异质性分析[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3414-3424.
- [37] LIU Y J, SHI J L, ZHENG Y M, et al. The Evolution Pattern and Simulation of Land Use in the Beijing Municipal Administrative Center (Tongzhou District)[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(2): 270-284.
- [38] WU Z, CHEN L. Optimizing the Spatial Arrangement of Trees in Residential Neighborhoods for Better Cooling Effects: Integrating Modeling with In-Situ Measurements[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 167: 463-472.
- [39] 谢军飞, 丛日晨, 王月容, 等. 北京通州地表温度的时空分布特征与绿化作用[J]. 中国园林, 2021, 37(04): 41-45.
- [40] ESTOQUE 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.
- [41] YU Z, ZHANG J, YANG G. How to Build a Heat Network to Alleviate Surface Heat Island Effect?[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 74: 103135.