

2000–2020 年长三角区域绿地景观格局的热环境作用及影响分析

The Dynamic Influences of Green Landscape Pattern on Land Surface Temperature in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2020

方俊博^{1,2} 董 涛^{1,2} 颜景理² 殷 杉^{2*}
FANG Junbo^{1,2} DONG Tao^{1,2} YAN Jingli² YIN Shan^{2*}

(1.沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866; 2.上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240)
(1. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning, China, 110866; 2. College of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 200240)

文章编号: 1000-0283(2025)07-0032-10
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2025. 07. 0032. 004
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2025-01-16
修回日期: 2025-03-20

摘 要
长江三角洲区域作为世界上城市化速度最快、人口最密集的地区之一，绿地景观格局在城市化过程中发生极大变化，对城市热环境和居民健康生活产生重要影响。在城市化过程中，绿地景观格局的热环境作用是如何随着时空尺度变化而改变，以及不同绿地景观格局指数的交互作用如何影响热环境，是亟需深入研究和分析的重要科学问题。采用景观格局指数、相关性分析和地理探测器等方法，揭示了2000–2020 年长三角区域绿地景观和地表温度格局的演变特征，探究了长时间序列和不同空间尺度上绿地景观格局与地表温度作用关系。结果表明：2000–2020 年，长三角区域绿地面积占比仅下降 0.9%，但其空间分布更加聚集，破碎化程度减弱。城市热岛区域面积增加 2.7%，强度不断加剧，逐渐聚集成区域热岛，分布范围明显扩大。绿地面积占比对热岛效应的贡献 ($q=0.168$) 显著大于其他绿地景观指数 ($q=0.091$)。随着时间的变化，绿地面积占比、聚集度和最大斑块指数的降温贡献逐渐增强；但随着分析单元的扩大，它们的降温贡献逐渐减弱。绿地景观指数的交互作用对热岛效应的解释力均具有增强作用，即多数景观指数的交互作用的解释力均大于两个因子单独作用的解释力之和。在较小的空间尺度中，斑块面积比例与斑块密度、标准化景观形状指数的交互作用最强，建议优先布局“覆盖面积—形状—连通性”复合型绿地，实现绿地景观格局热环境作用的最大化。旨在为优化调控城市绿地景观格局、降低长三角区域热风险，提供生态学方法和科学参考。

关键词

长三角区域；城市化；绿地景观格局；城市热岛；多尺度作用

Abstract

As one of the most rapidly urbanizing and densely populated areas in the world, the landscape pattern of green spaces and urban thermal environments in the Yangtze River Delta has experienced significant changes due to urbanization. The arrangement of green space is crucial for the urban thermal environment and residents' health. How the influence of green space landscape pattern on changes in land surface temperature varies with spatial and temporal scales, and how the interaction of landscape indices affects the land surface temperature, are important scientific issues that require further study and analysis. Using landscape pattern indices, correlation analysis, and geographic detectors, this study revealed the evolving dynamics of green landscapes and surface temperature patterns in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2020, while exploring the relationship between green landscape patterns and the heat island effect. The results show that from 2000 to 2020, the area proportion of green space decreased by only 0.9%, but the spatial distribution is more concentrated, and the degree of fragmentation has been weakened. The area proportion of urban heat islands increased by 2.7%, with apparent intensification, gradually gathering into

基金项目:
国家自然科学基金面上项目“绿地降温服务供需失衡与城市化过程的耦合机制研究”(编号: 42271096)；区域与城市生态安全全国重点实验室开放基金“城市化视角下的绿地景观和热环境格局演变及多尺度效应研究”(编号: SKLU2023-2-7)

方俊博
2000年生/男/吉林长春人/在读硕士研究生/研究方向为景观生态规划
董 涛
2000年生/女/黑龙江佳木斯人/在读硕士研究生/研究方向为景观生态规划
殷 杉
1982年生/男/山东青岛人/教授/研究方向为城市生态系统长期监测及生态服务价值

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: yinshan@sjtu.edu.cn

regional heat islands. The result showed that the contribution of greenspace area proportion to land surface temperature ($q=0.168$) was significantly greater than that of other greenspace landscape index ($q=0.091$). From 2000 to 2020, the contributions of green space area proportion, aggregation, and the most extensive patch index gradually increased. But with the expansion of the analysis unit, their contributions gradually diminished. The interactions of greenspace landscape indices consistently enhance the explanatory power for land surface temperature, either through nonlinear enhancement or bivariate enhancement. At smaller spatial scales, PLAND has the strongest interaction with PD and NLSI. It is suggested to prioritize the layout of “coverage - shape - connectivity” compound green spaces at more minor spatial scales to maximize the thermal environment effect of green landscape patterns. This study provides ecological methods and scientific reference for optimizing and regulating the landscape pattern of urban green space, to mitigate regional urban heat risks.

Keywords

Yangtze River Delta Region; urbanization; landscape pattern; urban heat island; scaling effect

长江三角洲（简称长三角）区域作为中国经济发展的核心引擎，是国内城市化进程开始最早且发展最快的区域之一，但随着城市化进程的不断推进，城市下垫面发生了巨大变化。绿地景观格局的变化叠加人为热源排放增多，改变了城市区域的热量平衡^[1-7]，导致城市热环境发生改变，城市极端高温、热浪现象频发，使得更多城市人口受到高温胁迫^[8-10]，城市热岛效应已成为人居环境研究的核心议题。已有研究表明，城市绿地，尤其是乔木，通过遮阴和蒸腾作用可以有效降温^[11-12]，这被认为是改善城市高温和居民热舒适度的自然解决方案^[13-14]。在全球快速城市化和城市热岛效应持续加剧的背景下，深入分析长三角区域城市绿地景观格局与城市热岛的时空演变规律，探究不同时空尺度下绿地景观格局对热环境的影响，提出缓解城市热岛的措施，是亟需解决的重要社会和科学问题。

关于绿地景观格局与热环境关联特征的研究，国内外学者主要从时空关联特征^[1,15]、热岛驱动机制^[16]和区域热环境调控的探索^[12]等方面开展了系统性研究，形成了多层次的研究框架。绿地景观格局与热环境时空关联特征方面，早期研究多聚焦单一城市的时空演变规律，Zhou等^[1]开创性地在美国巴尔斯

摩开展实证研究，首次量化了植被结构与热环境的响应关系。近年来，多尺度分析成为主流，Hidalgo等^[15]借助Sentinel-3卫星图像，从多个空间尺度揭示西班牙安达卢西亚地区热岛空间分异性。国内研究中，阴瑜鑫等^[9]基于Google Earth Engine利用城乡二分法估算长江经济带2003–2019年的城市地表热岛强度，通过地理探测器发现不同城市群热岛的主控因子不同，具有明显的时空异质性。在热岛驱动因素方面，学者们探索了景观格局特征对城市热环境的影响。Kumar等^[9]系统比较了蓝绿灰基础设施的降温效率，结果表明大规模、连片的绿地比分散的小型绿地更有效，因其能形成稳定的冷岛效应。蒋恬田等^[16]揭示了绿地景观格局对地表温度的多路径影响机制强调需通过精细化空间配置而非单纯增加面积来优化降温效果。在区域热环境调控方面，国内外学者围绕城市土地利用、生态规划等方向展开了广泛研究。Wu等^[2]对杭州市2000–2020年城市热岛时空演变规律的研究发现，热岛范围扩张与绿地破碎化呈显著正相关，并提出降低绿地斑块密度和增加城市水体聚集度是缓解杭州城市热岛的有效措施。Wu等^[3]发现了北京市热岛效应是自然与人为因素复杂交互的结果，其中植被覆盖减少和建筑密集化是核心驱动因素，提出扩大

公园、屋顶绿化和垂直绿化覆盖率是基于绿色基础设施缓解城市热环境的策略。

当前研究构建了“时空关联—驱动机制—调控策略”的多层次研究框架，实现了多技术手段和多学科的交叉融合。但目前仍存在一些不足之处：（1）驱动机制的复杂性认知不足，缺乏同一研究区内绿地景观格局对热环境的多时空尺度分析；（2）多因子非线性响应阈值等关键问题仍需深化，绿地景观指数交互作用对热环境的影响往往被忽略。因此，本研究以长三角区域为研究对象，基于MODIS卫星影像，量化2000–2020年绿地景观格局与地表温度的时空演变特征，结合相关性分析和地理探测器解析多尺度下绿地景观格局对热环境影响的驱动关系与交互作用，提出兼顾生态效益与城市发展的绿地配置方案，为提升城市生态建设水平和可持续发展提供理论依据和科学参考。

1 研究区域

长三角区域（115° 45′ —123° 25′ E，28° 01′ —32° 34′ N）作为中国经济发展的龙头，长三角区域发展已上升为国家战略。该地区人口密集，城市化程度高，土地类型丰富，河湖众多，土地利用变化速度明显，城市之间人口流动密切。依据《长江三角洲城

市群发展规划》^[17]，本研究选取上海市、江苏省、浙江省、安徽省的26个城市作为研究区域。区域总面积达21.08万km²，截至2023年，人口总数达2.35亿，GDP达24.2万亿，产业结构完善^[13]。研究区处于亚热带季风气候，雨热同期，植被资源丰富，森林资源丰富多样，树种结构以阔叶树和针叶树为主。主要树种包括香樟、无患子、悬铃木、栎树等^[18]。

2 研究方法

2.1 数据收集

本研究选取2000年、2010年、2020年共三期的土地利用数据，空间分辨率为30 m，数据来源于Yang等^[19] (<https://zenodo.org/records/12779975>)。中国行政区划数据、MODIS年平均白天地表温度数据(MOD11A2)下载于资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)^[20]。在每8天数据基础上计算平均值获得1–12月的平均地表温度LST，然后在12个月数据基础上计算平均值获得年度平均地表温度。MODIS卫星数据具有免费获取、覆盖范围广、高时间分辨率的优点^[21-23]。中国行政区划数据的比例尺为1：25万。MODIS白天地表温度数据为空间分辨率1 km的栅格数据，数据时间范围与土地利用数据一致。

2.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是马尔科夫模型^[24]在土地利用变化方面的应用。马尔科夫模型可以定量地表明不同土地利用类型之间的转化情况和转移速率。同时，它能够详尽地描述不同地类的初期面积、末期面积及转移的面积^[24]，见公式(1)。

$$S_{i,j} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， S 为面积， n 为土地利用的类型数， i 、 j 分别为转移前后的土地利用类型。本研究将土地利用栅格数据转为矢量数据，利用ArcGIS10.8中的相交(Intersect)工具，后通过以表格显示几何统计(Zonal Geometry)计算出转移的面积大小，将相交后的结果转换为Excel表格，再利用Excel的数据透视表功能统计得出不同年份间的土地利用转移矩阵。

2.3 景观格局指数

景观格局是指在一定空间范围内，不同景观要素的组合、分布和空间关系。景观指数能够高度浓缩景观格局信息，定量反映其结构组成和空间配置方面的特征^[25]。本研究

从类型(Class-level)水平，选择斑块面积比例(Percent of Landscape, PLAND)、斑块密度(Patch Density, PD)、边缘密度(Edge Density, ED)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)、标准化景观形状指数(Normalize Landscape Shape Index, NLSI)、聚集度(Aggregation Index, AI)。同时，景观格局指数随着分析单元的改变而变化，不同的分析单元计算绿地的景观格局指数可以探究其尺度效应。因此，通过网格分析法^[26-28]，本研究分别划分3 km、6 km、9 km、12 km、15 km的网格作为分析单元，分析不同空间尺度下绿地景观格局与城市热环境的关系。景观格局指数在FRAGSTATS 4.2中计算，详见表1。

表1 景观指数的选择及定义
Tab. 1 Definition of landscape index

景观指标 Landscape index	计算方式 Calculation method	范围 Range	单位 Unit	生态学意义 Ecological significance
PLAND	$\frac{n_{i,j}}{A} \times 100\%$ A 代表景观的总面积， $n_{i,j}$ 代表第 i 个景观类型中的第 j 个斑块的面积，比值 = 100% 时，则表示景观中只由一类景观斑块组成	[0, 100]	%	描述景观类型的面积占比
PD	$\frac{N}{A}$ N 表示斑块数量	$[1, +\infty)$	个/km ²	描述景观破碎化的重要指标，值越大，破碎化程度越高
LPI	$\frac{a_x}{A} \times 100\%$ a_x 指景观或某一斑块类型中最大斑块的面积，其数值可以反映景观斑块的优势度，间接反映人类活动干扰的大小	[0, 100]	%	确定景观优势类型
ED	$\frac{E}{A}$ E 代表给定斑块类型的总边长	$[0, +\infty)$	m/km ²	用于揭示景观或类型被边界分割的程度
AI	$(\frac{g_i}{m_g_i}) \times 100\%$ g_i 代表相应景观类型的相似邻接斑块数量， m_g_i 代表理论最大值	[0, 100]	%	反映景观中斑块类型的聚集程度
NLSI	$\frac{0.25E}{\sqrt{A}} \times 100\%$ 字母含义同上	[0, 1]	%	评价斑块形状规则程度

2.4 热岛强度划分

本研究利用均值—标准差法^[29]对研究区的热岛强度进行划分。LST均值可以稳定地衡量该地区一定时段内的温度，标准差代表了相对于平均温度的偏离与变异程度，通过均值与标准差的倍数组合来划分热岛强度^[29]。该方法能避免不同时相影像的差异，适合大区域城市热岛的时空变化研究。本研究的热岛等级划分标准如表2所示。

2.5 地理探测器

地理探测器 (Geodetector) 是探测空间分异性，以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[30]。该方法不仅可以补充当前研究对于驱动因子交互影响不足的局限，还免疫自变量共线性问题、判断空间的分异性、判断作用的线性关系与否、能够直观地度量驱动因子对于因变量的解释程度^[30]。地理探测器分

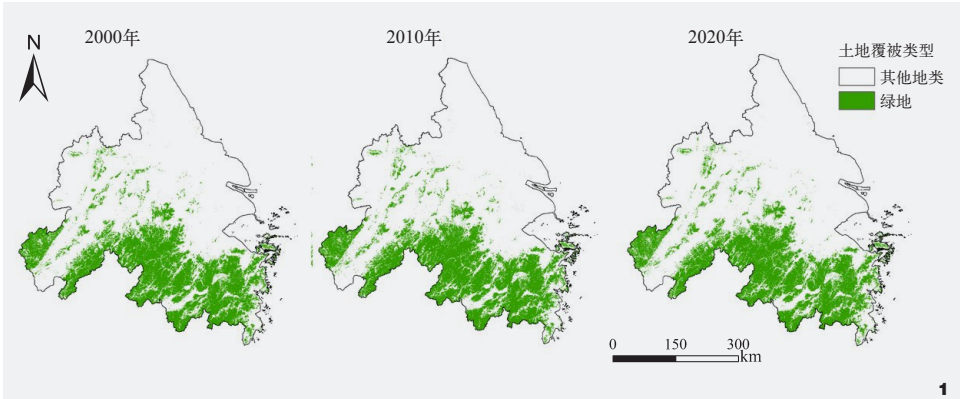


图1 2000–2020年长三角区域绿地分布
Fig. 1 Spatial distribution of green space in Yangtze River Delta from 2000 to 2020

析中，首先需要对自变量 (绿地景观指数) 进行离散化处理，转变为类型变量，把数据输入到集成到Excel中的地理探测器，运行软件获得地理探测器结果。结果中的 q 值表示驱动因子在多大程度上解释LST的空间分异。 q 值的取值区间为 $[0, 1]$ ，值越大说明驱动因

子对于因变量LST的解释力越强^[31]。 q 值计算见公式(2)。通过交互因子探测器评估双驱动因子共同作用时是否会增加或减弱对因变量的解释力，或这些因子对Y的影响是否为相互独立的^[32-33]。交互因子探测器中双自变量对因变量的交互作用类型如表3所示。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{S_w}{S_t} \quad (2)$$

式中， $h=1, 2, \dots, L$ ， L 为变量Y或因因子X的分层， N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的Y值的方差。 S_w 和 S_t 分别为层内方差之和和全区总方差。

3 结果与讨论

3.1 长三角区域绿地景观格局演变

长三角区域的绿地覆盖 (图1) 主要集中在浙江省的杭州、绍兴、宁波、舟山、金华、台州，安徽省的安庆、池州、宣城，江苏省的南京等城市。绿地总面积在20年内变化不大 (表4，表5)，总体呈现先增后减的趋势，共减少了1 915.8 km²。绿地面积占比从2000年的29.1%增长到2010年的29.4%，新增绿地多由耕地转入。2010–2020年城市化速度加快，部分绿地转为人工表面，面积

表2 热岛等级分类
Tab. 2 Classification of urban heat island

热岛等级 Heat island level	取值范围 Value range
热岛	$LST \geq \mu + s$
次热岛	$\mu + s > LST \geq \mu + 0.5s$
无热岛	$\mu + 0.5s > LST \geq \mu - 0.5s$
次冷岛	$\mu - 0.5s > LST \geq \mu - s$
冷岛	$LST < \mu - s$

注： μ 代表研究区的LST均值， s 代表(1倍)标准差。

表3 交互作用类型
Tab. 3 Interaction type

判据 Standard	交互作用 Interaction
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\max(q(X1), q(X2)) > q(X1 \cap X2) > \min(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

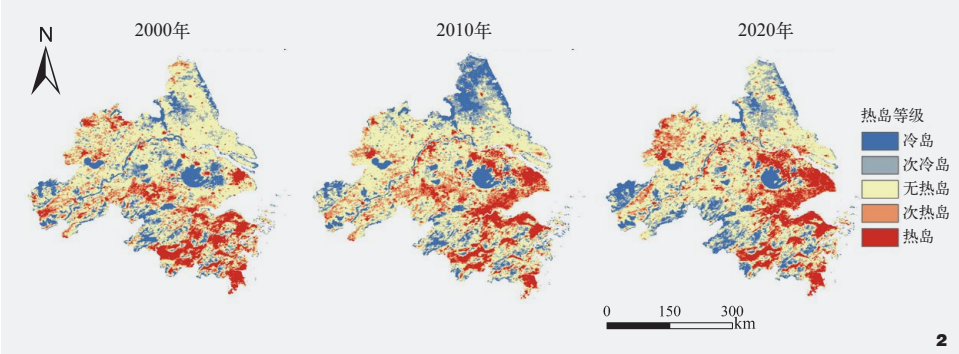


图2 不同等级热岛的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of urban heat island

占比下降至28.2%。

长三角区域绿地类型水平的景观格局指数如表6所示。PD呈降低趋势，从2000年的0.79下降至2020年的0.73。LPI总体呈现上升趋势，从2000年的7.73增加到2020年的12.67。NLSI总体呈略微增加的趋势，从2000年的0.03增加至2020年的0.04。ED呈降低趋

势，从2000年的13.1减少到2020年的4.9。这说明由于受自然因素和人为因素的影响，绿地斑块景观变化频繁且形状和边界趋于简单和平滑。AI呈降低趋势，从2000年的96.55下降至2020年的63.42。PLAND呈略微降低趋势，从2000年的0.29减少至2020年的0.28。总的来说，绿地的斑块面积占比略微减少，斑块

密度略微降低，破碎化程度有所缓解，最大斑块面积增大，边界趋于简单平滑。

3.2 长三角区域城市热岛时空演变

由于均值—标准差法通过归一化处理可以消除不同季节对热岛效应温度分布的影响，使得不同时段、不同城市的热岛强度具有可比性，且与地表温度遥感数据适配^[29]，故利用均值—标准差法将研究区的地表温度划分为5个等级的热岛，阈值如表7所示。2000–2020年热岛和次热岛区域基本分布在东部沿海区域且城市化程度较高、人口密集、人工表面较多的城市（图2），包括上海市、杭州市、苏州市、无锡市、常州市、杭州市、嘉兴市、宁波市、金华市、台州市、合肥市等。热岛区域由2000年的零散状分布发展成2020年的聚集状分布，在空间分布上总体呈向右倾斜的“之”字形。次热岛区域分

表4 2000–2010年土地利用转移矩阵（单位：km²）
Tab. 4 Land use transition matrix from 2000 to 2010

		2010年					
		耕地	绿地	水体	其他	人工表面	总面积
2000年	耕地	106 554.8	2 671.0	2 808.9	44.9	6 881.8	118 961.4
	绿地	1 923.8	59 234.1	10.9	3.1	203.6	61 375.5
	水体	1 474.7	32.4	15 482.2	3.0	587.0	17 579.3
	其他地类	13.0	6.8	4.7	17.3	6.4	48.3
	人工表面	45.8	0.2	365.0	0.1	12 414.2	12 825.2
	总面积	110 012.1	61 944.5	18 671.7	68.4	20 093.0	210 789.7

表5 2010–2020年土地利用转移矩阵（单位：km²）
Tab. 5 Land use transition matrix from 2010 to 2020

		2020年					
		耕地	绿地	水体	其他	人工表面	总面积
2010年	耕地	101 103.9	1 405.6	1 319.0	5.8	6 177.8	110 012.1
	绿地	3 727.5	58 048.7	6.2	1.8	160.3	61 944.5
	水体	2 625.2	2.4	15 445.1	1.6	597.4	18 671.7
	其他地类	9.7	2.9	0.8	10.9	44.1	68.4
	人工表面	34.4	0.1	135.5	0.1	19 922.9	20 093.0
	总面积	107 500.7	59 459.7	16 906.6	20.2	26 902.5	210 789.7

布较为分散，一般分布在热岛区域周围，且不断有次热岛区域转变升级为热岛区。同样利用景观指数法分析热岛的分布特征，发现2000–2020年热岛区域（热岛和次热岛）面积占比明显上升，但斑块数量呈下降趋势。同时城市热岛区域的聚集度增加，更多细碎的热岛斑块合并成更大的热岛斑块，形成区域热岛。城市热岛区域的扩张与城市规模扩大密切相关，热岛区域扩大聚集，导致更多的人口受到热岛高温胁迫。热岛的时空变化特征反映了长三角区域城市化进程的阶段性特征，2000年处于城市化初期，绿地覆盖相对稳定，热岛呈零散分布。2010年处于经济高速发展时期，上海及周边城市快速扩张，绿地面积达峰值后开始减少，热岛开始聚集。至2020年随着长三角一体化发展战略的持续深化，人工表面大幅增加，绿地蒸散冷却效率降低引发热岛区域的连片扩张。

3.3 绿地景观格局与地表温度的关联特征

通过相关性分析探究2000–2020年不同分析单元下景观格局指数与LST的关联特征（表8），结果表明绿地景观指数与地表温度的相关系数具有明显的尺度依赖性。在空间分异特征方面，PLAND、AI和LPI在小于6 km的较小空间尺度内与LST呈现显著负相关，其中NLSI在所有网格尺度中均保持稳定负相关关系，且在9 km尺度上达到峰值。这表明在较小空间尺度提升绿地覆盖度、促进斑块聚集并增强连通性，可有效抑制热岛效应；而在相对中等的空间尺度（9 km）适当增加斑块形状复杂度，则能通过增强蒸腾作用、遮阴效应和生态过程交互来优化降温效果。值得注意的是，PD在小尺度网格中与LST呈显著正相关，证实破碎化格局会抑制冷岛形成。时间演变分析显示，PLAND、AI和LPI的负向关

表6 绿地类型水平景观格局指数
Tab. 6 Landscape indices of class level green space

年份 Year	PD	LPI	ED	NLSI	AI	PLAND
2000	0.79	7.73	13.10	0.03	96.55	0.29
2010	0.74	7.78	12.62	0.03	96.70	0.29
2020	0.73	12.67	4.90	0.04	63.42	0.28

表7 热岛等级及阈值
Tab. 7 Heat island classification

热岛等级 Heat island level	LST 阈值 /℃ LST Threshold		
	2000 年	2010 年	2020 年
热岛	[23.73, + ∞)	[22.17, + ∞)	[23.44, + ∞)
次热岛	[23.02, 23.73)	[21.42, 22.17)	[22.55, 23.44)
无热岛	[21.60, 23.02)	[19.90, 21.42)	[20.77, 22.55)
次冷岛	[20.89, 21.60)	[19.15, 19.90)	[19.88, 20.77)
冷岛	(- ∞, 20.89)	(- ∞, 19.15)	(- ∞, 19.88)

表8 绿地景观指数与LST相关性分析
Tab. 8 Correlation analysis between green landscape index and LST

空间尺度 (km × km) Spatial scale		2000 年	2010 年	2020 年
PLAND	3 × 3	-0.085***	-0.085***	-0.491**
	6 × 6	0.067***	-0.125***	-0.382**
	9 × 9	0.122***	-0.051*	-0.313***
	12 × 12	0.163**	-0.002**	-0.259***
	15 × 15	0.191***	0.053**	-0.232***
PD	3 × 3	0.392***	0.392**	0.311**
	6 × 6	0.377***	0.342***	0.201**
	9 × 9	0.345***	0.321**	0.146***
	12 × 12	0.322**	0.304**	0.121***
	15 × 15	0.326***	0.336***	0.136***
NLSI	3 × 3	-0.263***	-0.263**	-0.177**
	6 × 6	-0.312***	-0.177***	-0.144**
	9 × 9	-0.325***	-0.269**	-0.261***
	12 × 12	-0.322**	-0.206**	-0.115***
	15 × 15	-0.319***	-0.246***	-0.117*
ED	3 × 3	0.398***	0.398**	0.043**
	6 × 6	0.383***	0.215***	-0.048**
	9 × 9	0.369***	0.217***	-0.063**
	12 × 12	0.362**	0.221**	-0.058*
	15 × 15	0.374***	0.245**	p>0.05
AI	3 × 3	-0.113***	-0.113***	-0.435**
	6 × 6	0.041**	-0.145***	-0.329**
	9 × 9	0.098***	-0.059**	-0.312**
	12 × 12	0.144**	p > 0.05	-0.221***
	15 × 15	0.159***	p > 0.05	-0.208***

接上表

空间尺度 (km × km) Spatial scale		2000 年	2010 年	2020 年
LPI	3 × 3	-0.087***	-0.087***	-0.484**
	6 × 6	0.065***	-0.123***	-0.373**
	9 × 9	0.119***	-0.047*	-0.301***
	12 × 12	0.161**	$p > 0.05$	-0.246***
	15 × 15	0.186***	$p > 0.05$	-0.221***

注：***代表 $p < 0.001$ ，**代表 $p < 0.01$ ，*代表 $p \leq 0.05$ 。

表9 2000–2020年绿地景观指数 q 值结果
Tab. 9 q value of green landscape index from 2000 to 2020

年份 Year	分析单元 (km × km) Analysis unit	PLAND	PD	LPI	ED	AI	NLSI
2000年	3 × 3	0.174	0.107	0.158	0.131	0.099	0.097
	6 × 6	0.181	0.111	0.149	0.14	0.078	0.088
	9 × 9	0.174	0.105	0.142	0.14	0.064	0.085
	12 × 12	0.168	0.096	0.128	0.136	0.067	0.086
	15 × 15	0.166	0.118	0.139	0.147	0.056	0.081
2010年	3 × 3	0.174	0.107	0.158	0.131	0.099	0.097
	6 × 6	0.118	0.08	0.105	0.049	0.072	0.036
	9 × 9	0.107	0.077	0.093	0.053	0.06	0.044
	12 × 12	0.093	0.074	0.077	0.051	0.058	0.043
	15 × 15	0.093	0.092	0.069	0.068	0.043	0.051
2020年	3 × 3	0.283	0.063	0.277	0.007	0.181	0.038
	6 × 6	0.234	0.035	0.223	0.021	0.124	0.049
	9 × 9	0.205	0.03	0.199	0.019	0.015	0.093
	12 × 12	0.18	0.021	0.167	0.02	0.074	0.039
	15 × 15	0.174	0.045	0.152	0.025	0.049	0.052

联性呈持续增强趋势，印证了降低绿地破碎度、提升覆盖率和连通性对强化聚集斑块降温效能的关键作用。NLSI的负相关性随时间递减，提示复杂形状斑块的生态效益存在衰减现象，需建立动态优化的边界调控机制。ED与LST的相关系数从正转负的演变特征，反映了全球变暖与城市扩张对绿地边缘冷却效应的复合影响，需重点关注边缘地类转化的热环境响应。基于上述发现，建议采取差异化绿地规划管理策略：微观尺度优先保障绿地的覆盖面积和连通性，形成具有一定规模的冷岛区域，宏观尺度通过系统性规划

构建长效降温机制，同时建立多尺度动态监测体系，发展适应性管理技术，最终形成微观—宏观协同的绿地网络体系，实现城市热环境优化目标。PLAND与LST在2000年和2020年3 km尺度网格中负相关性最强，相关系数为-0.085、-0.491 ($p \leq 0.05$)。在2010年6 km尺度网格中负相关性最强，相关系数为-0.125 ($p \leq 0.05$)。PLAND与LST的负相关性随年份变化而增强，但是随网格尺度的扩大而减弱。PD与LST在不同年份和不同分析单元上均呈显著的正相关性 ($p \leq 0.05$)，并且在不同年份中，3 km的网格中正相关性最强，相关

系数分别为0.392、0.392、0.311。绿地斑块密度越大，LST越高，且在较小的网格单元中这种关联特征越明显。这与其他研究人员在西安^[34-35]和北京^[3]的研究结果一致，表明绿地破碎化不利于改善城市热环境。

NLSI与LST在不同年份的不同分析单元上均呈现显著负相关性 ($p \leq 0.05$)，且在各年份中9 km网格中的负相关性最强，相关系数分别为-0.325、-0.269、-0.261，表明绿地斑块形状越复杂不规则，地表温度可能越低。NLSI与LST的负相关性随年份变化而减弱。

ED与LST在不同年份3 km的网格中的正相关性最强 ($p \leq 0.05$)，相关系数分别为0.398、0.398、0.043。二者的正相关性随年份变化而减弱，局部转向负相关，同一尺度的显著性水平普遍下降，这可能与环境干扰因素增强有关^[25]。

AI与LST在2000年、2020年的3 km和2010年的6 km的网格中负相关性最强 ($p \leq 0.05$)，相关系数为-0.113、-0.435、-0.145，表明绿地的聚集度越高，地表温度越低。二者负相关性随年份变化普遍增强。

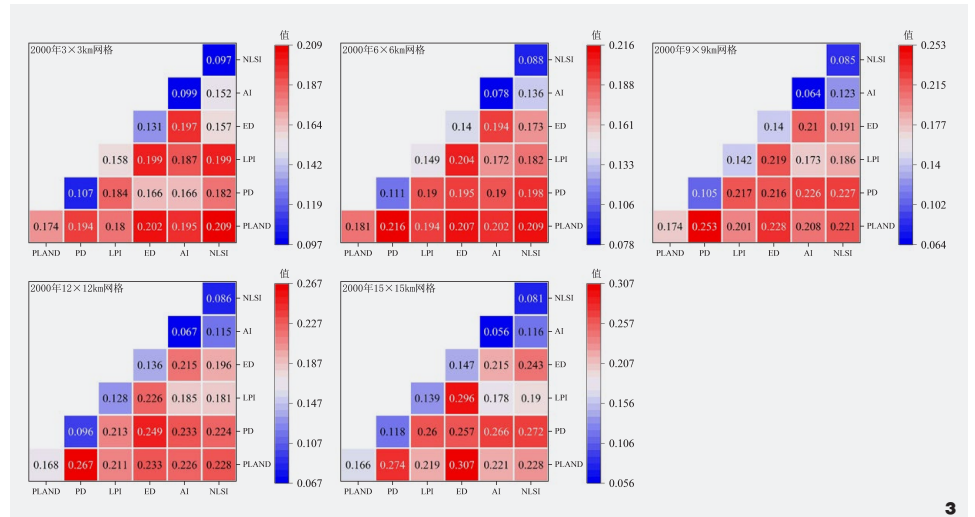
LPI与LST在2000年、2020年的3 km网格中和2010年6 km的网格中二者的负相关性最强 ($p \leq 0.05$)，相关系数分别为-0.087、-0.484、-0.123，表明在较小的网格尺度中，绿地最大斑块面积越大，绿地景观优势度增加，地表温度则越低。二者负相关性随年份变化而普遍增强。

3.4 绿地景观指数驱动及交互作用研究

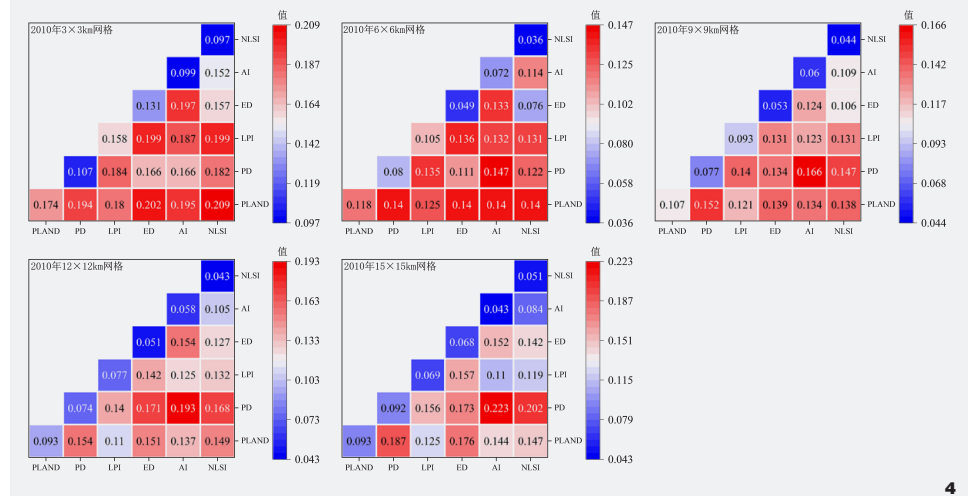
本研究利用地理探测器探究不同年份和不同分析单元网格下绿地景观格局指数对LST的贡献及交互影响作用。分异因子探测结果（绿地景观格局指数对LST的贡献性， q 值）如表9所示。结果发现，PLAND一直是LST的主

要驱动因素, 平均 q 值为0.168 ($p \leq 0.05$), 贡献性明显大于其他5个景观指数的平均 q 值 (0.091, $p \leq 0.05$)。LPI为LST次重要的驱动因素, 平均 q 值为0.149 ($p \leq 0.05$)。在同一年份中, 随着网格尺度的扩大, 地表温度受到更多因素的干扰, PLAND、AI和LPI对LST的贡献总体呈下降趋势。相同尺度网格中, 随着年份变化PLAND、AI和LPI对LST的贡献呈上升趋势, 因此在较小的空间尺度中应重点关注绿地的覆盖面积、聚集程度和整体的连通性、优势度, 发挥调控城市热环境的作用, 在未来的绿地景观规划中应加以重视。PD和ED对LST的贡献减弱, 可能是由于其他景观指数的协同作用增强, 绿地覆盖面积和连续性成为主导影响地表温度因素, 斑块密度和边缘密度的局部影响被削弱。因此, 实践中应优先提升小空间尺度绿地覆盖率, 同时优化景观格局, 保证绿地斑块连通性和整体规模优化, 非单纯增加斑块数量或边缘复杂度, 以实现最大降温效益。

2000年绿地景观指数交互探测结果 (图3) 显示, 绿地景观格局的覆盖特征 (PLAND和LPI) 和密度 (PD)、分散特征 (ED) 之间交互作用会对地表温度产生较为明显的影响, 且要大于PLAND、LPI、PD、ED各自单独作用时的解释力之和。3 km网格中PLAND $\cap$ NLSI的交互作用类型为双因子增强 (Bivariate Enhance), q 值为0.209。6 km和9 km网格中PLAND $\cap$ PD的交互作用类型也为双因子增强, q 值分别为0.216、0.253。12 km网格中PLAND $\cap$ PD的交互作用类型为非线性增强 (Nonlinear Enhance), q 值为0.267。15 km网格中PLAND $\cap$ ED的交互作用类型为非线性增强, q 值为0.307。PLAND $\cap$ PD、PLAND $\cap$ ED、ED $\cap$ PD、LPI $\cap$ ED的交互作用随网格扩大由双因子增强转变为非线性增强。



3



4

图3 2000年绿地景观指数交互探测
Fig. 3 Interaction detector of green landscape index in 2000

图4 2010年绿地景观指数交互探测
Fig. 4 Interaction detector of green landscape index in 2010

2010年绿地景观指数交互探测结果 (图4) 显示, 在较小的小网格尺度上, 绿地的形状特征 (NLSI) 和覆盖 (PLAND) 特征的交互作用更加能影响LST, 在更大的网格尺度, 绿地斑块的密度特征 (PD) 和结构特征 (AI) 交互作用更能影响LST。3 km网格中NLSI $\cap$ PLAND的交互作用类型为双因子增强, q 值为0.209。6 km网格中PD $\cap$ AI的交互作用类型为双因子增强, q 值为0.147。在9 km、12 km、

15 km网格中同样为PD $\cap$ AI, 交互作用类型为非线性增强, q 值为分别为0.166、0.193、0.223, 表明在2010年AI和PD是重要的交互影响因子, 交互作用随网格扩大由双因子增强转变为非线性增强。

2020年绿地景观指数交互探测结果 (图5) 显示, 尽管不同分析单元网格中交互作用最强的双因子并不相同, 但PLAND与其他景观指数的交互作用明显, 是重要的交互驱

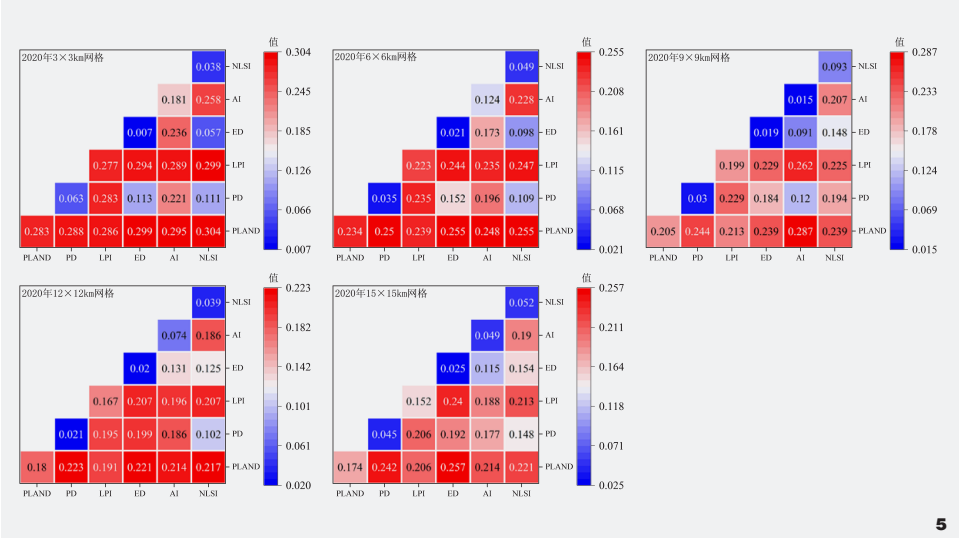


图5 2020年绿地景观指数交互探测
Fig. 5 Interaction detector of green landscape index in 2020

动因子。3 km和6 km网格中NLSI $\cap$ PLAND的交互作用类型均为双因子增强, q 值分别为0.304、0.255。9 km网格中AI $\cap$ PLAND的交互作用类型均为非线性增强, q 值为0.287。12 km网格中PLAND $\cap$ PD的交互作用类型为非线性增强, q 值为0.223。15 km网格中PLAND $\cap$ ED的交互作用类型为非线性增强, q 值为0.257。交互作用随网格扩大由双因子增强转变为非线性增强。

总体来说, 各时空尺度下, 绿地景观指数双驱动因子的交互作用均大于任一单因子的解释力或双因子解释力之和, 交互影响模型为双因子增强或非线性增强。绿地景观指数的交互作用均增强了对地表温度的影响, 单一指标优化可能无法实现最佳降温效果, 需要在多空间尺度协同多指标规划设计绿地景观格局。多数双驱动因子的对地表温度的交互模式随网格尺度扩大, 由双因子增强转为非线性增强, 这可能是由于在更大的空间范围内, 更多因素相互作用, 覆盖更广泛的空间分异模式, 导致双因子叠加后的解释力

增强。多数时空尺度中PLAND与其他景观指数的交互作用最强, 其中在小于3 km的空间网格尺度, PLAND与NLSI的交互作用对地表温度变化的解释力最强, 在较小的空间尺度提高绿地覆盖面积的同时应合理优化绿地的形状特征, 提升绿地的降温能力。而在大于等于6 km的空间网格尺度, PLAND与PD、AI的交互作用对地表温度变化的解释力最强, 应注重合并小型绿地斑块, 增加绿地连通性, 提高绿地覆盖面积的同时要优化空间分布格局, 长期进行生态修复。

4 结论与展望

绿地景观格局对城市热环境和居民健康生活有着重要影响, 本研究旨在通过揭示长三角区域绿地景观格局和地表温度的时空演变规律, 探究绿地景观格局对地表温度的影响及其多尺度效应。结果表明, 2000–2020年, 长三角区域绿地面积经历了先增后减的变化, 新增绿地多由耕地转变而来, 减少的绿地多转变为人工表面。20年间绿地面积

共减少了1 916 km² (0.9%), 绿地斑块破碎程度有所缓解, 空间连续性增强, 绿地趋向规模化整合。长三角区域热岛区分布范围扩大并且更加聚集, 覆盖面积增加了5 748 km² (2.7%), 热岛强度不断加剧, 反映出一定的城市化特征。相关性分析结果显示, 绿地景观指数与地表温度的相关关系具有明显的尺度依赖性。随着时间的变化, PLAND、AI和LPI与LST的负相关性逐渐增强; 但随着分析单元的扩大, 负相关性逐渐减弱。PD与LST呈正相关, 在较小的分析单元正相关性最强。地理探测器结果发现, PLAND是LST变化的重要交互影响因子, 其次是LPI, 解释力随空间尺度扩大而减弱。绿地景观指数的交互作用均增强了对地表温度的影响, 需要在多空间尺度协同多指标规划设计绿地景观格局。绿地景观的破碎化不利于缓解城市热岛效应, 应重点在小空间尺度中优先提升绿地覆盖率并强化斑块连通性与聚集度, 在保证绿地覆盖面积的前提下合理规划绿地的形状特征, 促进绿地提质增效而非一味地增加绿地斑块数量, 如生态修复或生态绿廊建设, 促进形成规模冷岛, 实现绿地降温作用的最大化。在更大的空间尺度中, 需长期规划绿地形状特征, 合理优化空间分布格局, 以发挥持续降温作用, 构建宏观和微观协同一体的绿地网络系统, 加强多尺度绿地动态监测和适应性管理。

本研究通过地理探测器探讨了不同时间和空间尺度下绿地景观格局对热环境的尺度效应和交互作用, 弥补了前期研究空间尺度单一、因子交互作用讨论不够丰富的不足, 为未来城市绿地的空间规划提供参考, 提高城市居民热舒适度, 促进长三角区域可持续发展。 

注: 文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] ZHOU W, HUANG G, CADENASSO M L. Does Spatial Configuration Matter? Understanding the Effects of Land Cover Pattern on Land Surface Temperature in Urban Landscapes[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(01): 54-63.
- [2] WU Y, HOU H, WANG R, et al. Effects of Landscape Patterns on the Morphological Evolution of Surface Urban Heat Island in Hangzhou During 2000-2020[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 79: 103717.
- [3] WU Z, YAO L, ZHUANG M, et al. Detecting Factors Controlling Spatial Patterns in Urban Land Surface Temperatures: A Case Study of Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 63: 102454.
- [4] NWAKAIRE C M, ONN C C, YAP S P, et al. Urban Heat Island Studies with Emphasis on Urban Pavements: A Review[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 63: 102476.
- [5] KUMAR P, DEBELE S E, KHALILI S, et al. Urban Heat Mitigation by Green and Blue Infrastructure: Drivers, Effectiveness, and Future Needs[J]. *The Innovation*, 2024, 5(02): 100588.
- [6] SHEN C, HOU H, ZHENG Y, et al. Prediction of the Future Urban Heat Island Intensity and Distribution Based on Landscape Composition and Configuration: A Case Study in Hangzhou[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 83: 103992.
- [7] PENG J, WANG Y L, ZHANG Y, et al. Evaluating the Effectiveness of Landscape Metrics in Quantifying Spatial Patterns[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(02): 217-223.
- [8] 阴瑜鑫, 张华, 安慧敏, 等. 基于GEE的长江经济带城市群热岛特征及影响因素[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(01): 160-169.
- [9] 胡凤宁. 景观结构对城市群地表热环境的多尺度时空影响[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.
- [10] 张曼玉, 王泓, 杨元建, 等. 长三角地区夏季地表热环境的季节内和日夜变化特征[J]. *中国科学技术大学学报*, 2019, 49(11): 920-929.
- [11] 赵松婷, 李新宇, 刘秀萍, 等. 首都功能核心区城市森林公园冷岛效应评价[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(02): 857-862.
- [12] 董建权, 彭建. 绿地空间降温效应综述: 景观调控视角[J]. *生态学报*, 2024, 44(04): 1336-1346.
- [13] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [14] 赵志平, 汉瑞英, 关满, 等. 2000-2019年京津冀地区植被覆盖状况变化及驱动因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(21): 8860-8868.
- [15] HIDALGO D, ARCO J. Space-time Analysis of the Earth's Surface Temperature, Surface Urban Heat Island and Urban Hotspot: Relationships with Variation of the Thermal Field in Andalusia (Spain)[J]. *Urban Ecosystems*, 2023, 26(02): 525-546.
- [16] 蒋恬田, 杨纯, 廖炜, 等. 城市绿地景观格局影响地表温度的通径分析——以长沙市为例[J]. *环境学报*, 2023, 32(01): 18-25.
- [17] 国家发展和改革委员会. 长江三角洲城市群发展规划[N]. 北京: 2016.
- [18] 谢长坤, 夏蕴强, 尹程, 等. 长三角城市群乡村植被特征与生物多样性保育策略[J]. *中国园林*, 2021, 37(05): 31-37.
- [19] YANG J, HUANG X. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2021[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 13(8): 3907-3925.
- [20] 徐新良. 中国地表温度LST年度1KM数据集[DS]. 2022.
- [21] 杨翠芹, 何伟, 郝茂盛, 等. 基于气象站和MODIS数据合肥地区城市热岛评价[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(S1): 243-250.
- [22] 康紫薇, 张正勇, 刘琳, 等. 基于MODIS的新疆地表温度时空变化特征分析[J]. *地理研究*, 2022, 41(04): 997-1017.
- [23] 张飞, 邵媛, 黄晖, 等. 近20年城市遥感研究现状及发展趋势[J]. *生态学报*, 2021, 41(08): 3255-3276.
- [24] 张超, 王琳, 张秋霞, 等. 布哈河流域土地利用转移矩阵及空间变化研究[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(05): 6-11.
- [25] JIA Y Q, TANG L N, XU M, et al. Landscape Pattern Indices for Evaluating Urban Spatial Morphology – A Case Study of Chinese Cities[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 27-37.
- [26] 杨鹏, 高祺, 张艳品, 等. 基于Fragstats4的景观格局指数与地表温度的相关性——以石家庄市为例[J]. *气象科技*, 2021, 49(03): 464-474.
- [27] 康愉旋. 基于Fragstats的沈阳市五所高校校园景观格局评价[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [28] CERRILLO R M, VIEIRA D J, OCHOA-GAONA S, et al. Land Cover Changes and Fragmentation in Mountain Neotropical Ecosystems of Oaxaca, Mexico Under Community Forest Management[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, 30(01): 143-155.
- [29] 陈松林, 王天星, 等. 间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(02): 145-150.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(01): 116-134.
- [31] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical Detectors-based Health Risk Assessment and Its Application in the Neural Tube Defects Study of the Heshun Region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(01): 107-127.
- [32] 李洪飞. 额济纳绿洲核心区土地利用景观破碎化及其驱动机制[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2024.
- [33] 方慧婷, 杨英宝, 汪子豪. 长三角夏季热岛效应时空演变分析[J]. *地理空间信息*, 2017, 15(08): 109-112.
- [34] 赵选. 西安城市热环境效应及绿地缓解作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [35] 杜航. 西安市地表景观格局的热环境效应研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.