

基于地理探测器与景观格局分析的西安市城市热岛时空特征及驱动机制研究

吴 琦

西安外国语大学旅游学院, 人文地理研究所, 陕西 西安

收稿日期: 2025年5月12日; 录用日期: 2025年6月30日; 发布日期: 2025年7月8日

摘 要

本文基于多源遥感数据与地理探测器方法, 系统分析了西安市中心建成区2019年与2023年不同季节的城市热岛效应时空特征及其驱动机制。研究利用多源数据, 提取地表温度并进行温区划分, 结合地理探测器定量评估NDVI、气温、道路密度和夜间灯光强度等因素对热岛效应的影响。结果表明, 高温区主要分布在城市核心区域, 夏季热岛效应最为突出, 2019年至2023年间热岛效应呈加剧趋势。气温和夜间灯光强度是影响热岛效应的主要驱动因素, 景观格局指数分析显示建筑物密度和形状复杂性对地表温度影响显著, 绿地和水体在秋冬季对缓解热岛效应具有潜在作用。研究建议加强核心城区绿地建设与水体保护, 优化城市空间布局, 提升城市生态系统服务功能, 为城市可持续发展和热环境治理提供科学依据。

关键词

城市热岛效应, 地理探测器, 景观格局指数, 西安市

Research on the Spatiotemporal Characteristics and Driving Mechanisms of Urban Heat Island in Xi'an Based on Geographic Detector and Landscape Pattern Analysis

Qi Wu

Research Institute of Human Geography, School of Tourism, Xi'an International Studies University, Xi'an Shaanxi

Received: May 12th, 2025; accepted: Jun. 30th, 2025; published: Jul. 8th, 2025

文章引用: 吴琦. 基于地理探测器与景观格局分析的西安市城市热岛时空特征及驱动机制研究[J]. 自然科学, 2025, 13(4): 751-767. DOI: 10.12677/ojns.2025.134079

Abstract

This study systematically analyzes the spatiotemporal characteristics and driving mechanisms of the urban heat island (UHI) effect in the central built-up area of Xi'an during different seasons in 2019 and 2023, based on multi-source remote sensing data and the geographic detector method. Surface temperature was extracted and thermal zones delineated using multi-source data, while the geographic detector quantitatively assessed the influence of factors such as NDVI, air temperature, road density, and nighttime light intensity on the UHI effect. Results indicate that high-temperature zones are primarily concentrated in the urban core, with the UHI effect most pronounced in summer and showing an intensifying trend from 2019 to 2023. Air temperature and nighttime light intensity emerged as the main drivers of the UHI effect. Landscape pattern index analysis revealed that building density and shape complexity significantly affect surface temperature, while green spaces and water bodies potentially mitigate the UHI effect during autumn and winter. The study recommends enhancing green space development and water body protection in the urban core, optimizing urban spatial layout, and improving urban ecosystem services to support sustainable urban development and effective thermal environment management.

Keywords

Urban Heat Island Effect, Geographic Detector, Landscape Pattern Index, Xi'an

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着城市化进程的加快,城市扩张步伐显著加快,城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)问题日益突出[1][2]。城市热岛效应不仅直接影响城市公共健康和空气质量,还导致能源消耗增加,严重影响人类生活质量[3]。因此,开展区域尺度的城市热岛效应研究,对于城市规划和生态环境建设具有重要意义。随着遥感技术的不断发展,卫星遥感影像被广泛应用于地球环境与气候研究。通过遥感热红外波段反演地表温度(Land Surface Temperature, LST),能够获取大范围的地表温度信息,为城市热岛效应研究提供坚实的数据支撑[4][5]。目前,城市热岛效应的影响因素主要涵盖地表覆盖、社会经济、地形和气象四个方面。地表覆盖的变化直接影响地表温度,常用指标包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、归一化建筑指数(Normalized Difference Built-up Index, NDBI)及不透水面比例等[6]-[8]。城市化进程加快增加了人为热排放,夜间灯光数据和人口密度常被用以代表社会经济因素[8][9]。气象因素中,气温变化在一定程度上引起地表温度变化[10]。学者们采用多种方法研究热岛效应与驱动因素的关系,包括地理探测器[11]、皮尔逊相关分析[12]和回归分析[13]等,其中地理探测器因其能够考虑空间异质性,广泛应用于热岛效应驱动因素研究[14]。

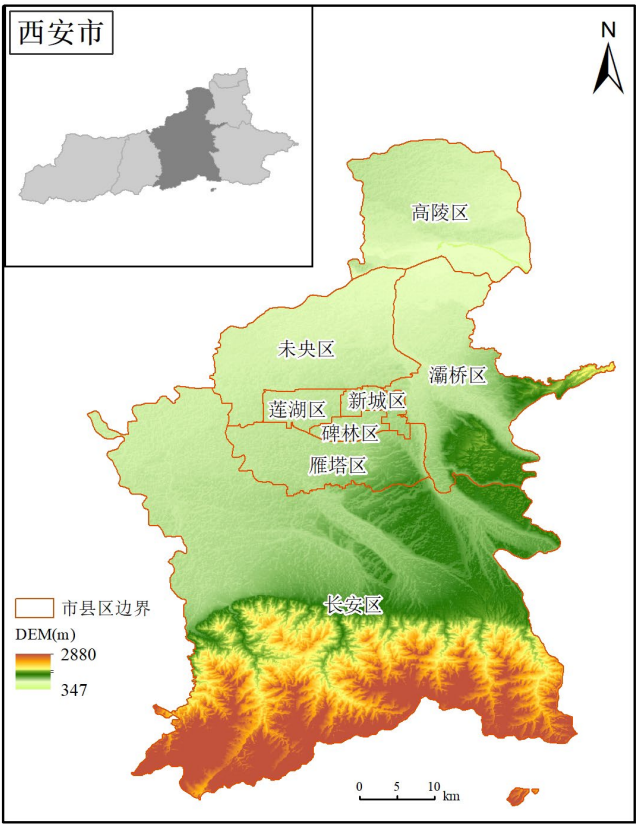
城市热岛存在明显的时空分布差异,包括多年时间序列、季节和昼夜变化[15],当前对不同影响因素的季节性差异分析仍较少。此外,热岛效应与城市景观格局密切相关,相关研究正由定性观察向定量分析转变。国内学者利用传统景观指数分析居住用地景观面积和形状复杂性对地表温度差异的影响,并对城市“热力景观”进行模式分析[16]。还有研究指出绿地分布面积大且集中区域的温度低于绿地覆盖率高但斑块分散破碎的区域,提出通过“绿岛”和“绿廊”规划缓解热岛效应的思路[17]。通过定量综合分析,

深化了对整体景观格局作用的理解。

自 2018 年以来，西安市城市化进程加快，城市及周边小气候显著变化，导致城市地表及大气温度普遍高于周边非城市环境，形成明显的城市热岛效应。这不仅对居民健康产生负面影响，增加热相关疾病风险，尤其对老年人和儿童等脆弱群体构成威胁，还使能耗和碳排放显著上升。同时，热岛效应扰乱生态平衡，影响植物生长和生物多样性，削弱城市生态系统服务功能[18]。因此，研究西安市中心建成区不同年份和季节的热岛效应，有助于全面了解该地区现状和特征，探索有效缓解措施，促进生态环境改善，提升居民生活舒适度和健康水平，实现生态可持续发展，为建设健康宜居城市提供科学依据。

2. 研究区概况

本文选取西安市七个区(新城区、碑林区、莲湖区、灞桥区、未央区、雁塔区和长安区)中提取的建成区作为主要研究区域(图 1)。市中心区域(新城区、碑林区、莲湖区)建筑密集，商业活动频繁，交通发达，地表温度较高，是研究城市热岛效应的重要区域；而外围区域(灞桥区、未央区、雁塔区、长安区)的地表温度则随着城市化进程的推进而受到一定影响。例如，夏季气候炎热干燥，在建筑密集、道路宽阔且绿地稀少的城市中心热岛效应更明显。选择这七个具有代表性的区域，有助于全面揭示西安市城市热岛效应在不同季节的时空变化规律及其影响因素。通过系统分析这些区域的热环境特征，本文旨在为城市规划者提供科学依据，优化城市空间布局，增强城市绿肺功能，从而有效缓解热岛效应，促进城市的可持续发展与环境管理水平提升。



注：arcmmap10.7 制作。

Figure 1. Location map of the study area
图 1. 研究区位置图

3. 数据与数据源

文中所用的遥感影像数据及地表温度数据均来源于哥白尼数据空间生态系统 (<https://dataspace.copernicus.eu/>)。用于提取建成区的夜间灯光数据采自美国国家海洋和大气管理局的 NOAA-CLASS 平台 (<https://lpdaac.usgs.gov/>)，气温数据则取自哥白尼气候数据存储库 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>)。除表 1 中列出的影像数据外，用于地理探测器分析的研究区内的兴趣点(POI)、道路及建筑物轮廓数据均来自 OpenStreetMap (<https://www.openstreetmap.org/>)2019 年及 2023 年发布的开放数据[19] [20]。

Table 1. Remote sensing imagery data
表 1. 遥感影像数据

数据集	分辨率	时间	用途
Sentinel-3A	1 km	春季 2019-3-25	提取 LST
		夏季 2019-6-30	
		秋季 2019-9-27	
		冬季 2019-12-22	
Sentinel-2	10 m	2019-12	建成区提取；土地利用类型分类
VIIRS	500 m	2019	计算夜间灯光强度、建成区提取
ERA5-Land	1 km	同 Sentinel-3A 数据集日期	计算日均温

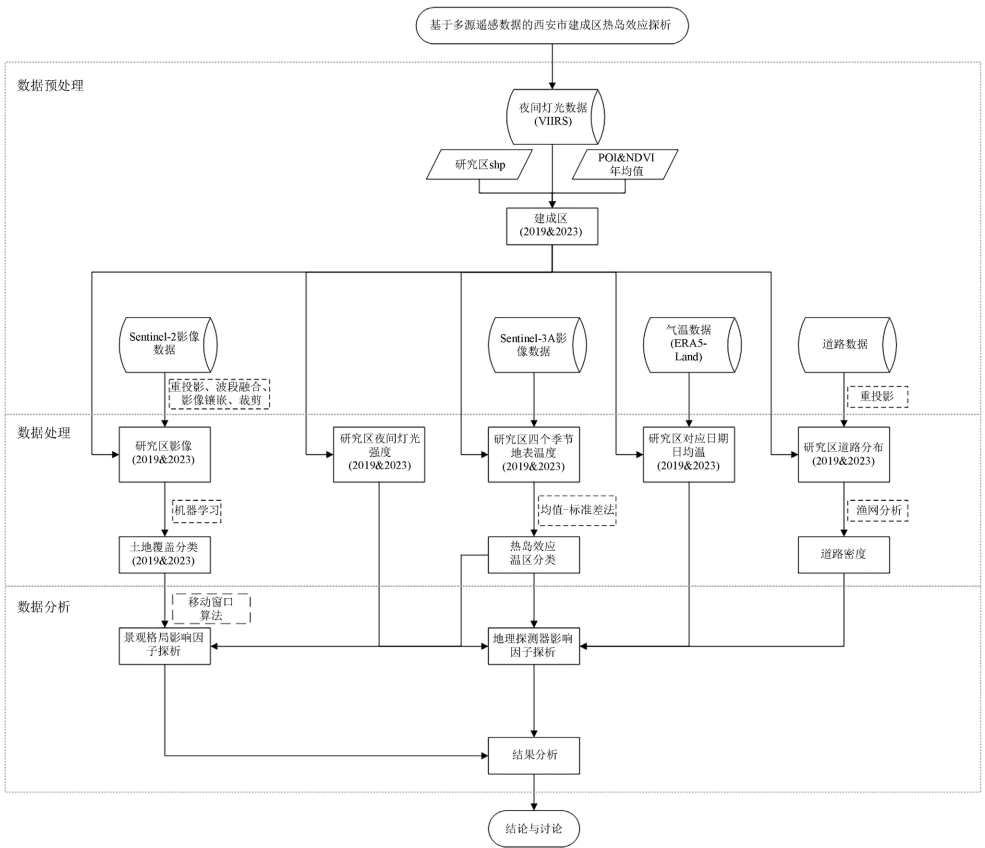


Figure 2. Technical flowchart
图 2. 技术流程图

4. 研究设计与方法

4.1. 研究内容与技术路线

本文基于多源遥感影像数据,提取了西安市建成区 2019 年和 2023 年的地表温度,并进行了温度等级划分,实现了城市热岛效应的定量化分析,揭示其空间分布特征。研究通过整合 Sentinel-2 和 Sentinel-3A 影像,结合夜间灯光(VIIRS)、气温(ERA5-Land)、NDVI 及 POI 数据,构建了全面的数据处理流程(图 2)。采用地理探测器方法,定量评估了植被指数(NDVI)、气温、道路密度和夜间灯光强度四大影响因素对热岛强度变化的解释能力,明确各因素对城市热岛效应的贡献度。此外,基于景观格局指数,分析了建筑物、水体、植被和农业用地四类景观类型对城市热环境空间分布的影响,深入探讨了不同景观格局对热岛效应的调控作用。研究旨在为城市规划和景观设计提供科学依据,推动通过优化城市绿地布局和景观结构,有效缓解热岛效应,提升城市生态环境质量与居民生活舒适度。

4.2. 研究方法

4.2.1. 建成区提取

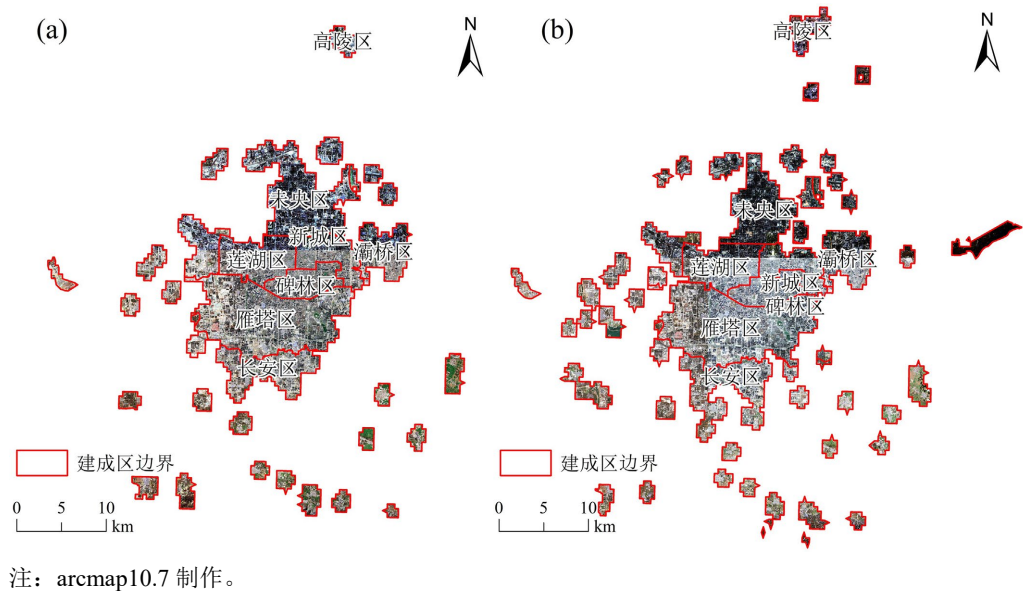


Figure 3. Extracted built-up area boundaries. (a) 2019; (b) 2023

图 3. 建成区边界。(a) 2019 年; (b) 2023 年

将 2020~2023 年每年的西安市 POI 数据进行数据清洗,筛选范围限定在西安市的新城区、碑林区、莲湖区、灞桥区、未央区、雁塔区和长安区,涵盖所有类别的 POI 数据。通过对这四年内的 POI 数据进行核密度分析,旨在揭示空间中不同区域的点密集程度。计算公式为:

$$g(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中, $g(x)$ 为空间中任意一点的核密度, r 为搜索半径,这里取 1500 米; $(x - x_i)$ 为点与中心点之间的距离; n 为距离空间中任意一点 x (距离 h) 的要求点数; K 为空间权重函数。分别利用 2019 年与 2023 年的 NDVI 年均值校正夜间灯光数据,增大城市间影像像元的亮度值差异,这里引入一种基于植被指数 NDVI 构建的城市灯光指数 $VANUI$,在对夜间灯光数据方面具有良好效果。计算公式为:

$$VANUI = (1 - NDVI) NTL \tag{2}$$

核密度分析结果结合校正后的夜间灯光数据基于阈值法提取建成区，计算公式为：

$$S = \sqrt{P_i \times NTL_i} \tag{3}$$

式中为 i 点的 POI 核密度值； NTL_i 为 i 点的夜间灯光亮度值。这种提取建成区的方法在一定程度上能够改善夜间灯光溢出问题，也可有效去除非城市建成区的地物干扰[21] [22]。为了得到 2019、2023 年建成区边界的遥感影像，利用 SNAP 软件对覆盖研究区的影像做 10 米重采样，并利用 ENVI6.0 对影像进行波段融合(Build Layer Stack)、影像镶嵌(Seamless Mosaic)操作，并按掩膜裁剪出 2019、2023 建成区的遥感影像，结果如图 3 所示，得到最终的 2019、2023 年研究区范围。

4.2.2. 热区划分方法

为了消除不同时期影像带来的差别，对结果进行归一化处理，便于从空间上比较不同时相地表温度的空间分布特征。归一化公式如下：

$$LST_n = \frac{LST_s - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \tag{4}$$

式中 LST_n 为地表温度归一化后的值； LST_s 为转换后的地表温度值； LST_{max} 和 LST_{min} 为地表温度的最大值和最小值，这里使用 Quick Stats 进行查看。将归一化后的地表温度用均值标准差法进行划分，将地表温度划分为高温区、次高温区、中温区、次中温区、低温区 5 个等级[5] [6]，如表 2 所示。

Table 2. Criteria for temperature zone division
表 2. 温区划分依据

温度等级	区间	范围
#5	高温区	$(Ta + Sd) < Ts \leq (Ta + 2Sd)$
#4	次高温区	$(Ta + Sd/2) < Ts \leq (Ta + Sd)$
#3	中温区	$(Ta - Sd/2) \leq Ts \leq (Ta + Sd/2)$
#2	次中温区	$(Ta - Sd) \leq Ts \leq (Ta - Sd/2)$
#1	低温区	$Ts < (Ta - 2Sd)$

4.2.3. 地理探测器

地理探测器由 Wang [23]等提出，是探测空间分异性与揭示其驱动因素的一组统计学方法，能够探测单一驱动因子以及两驱动因子的交互作用对因变量空间分异性的影响，并检验其统计显著性。本研究采用因子探测和交互探测，因子探测因子用 q 值量化分析各因子对城市热岛强度空间分异的贡献大小，其公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{5}$$

式中 L 为驱动因素 X 的分层数， N_h 和 N 分别为层 h 和研究区的单元数，和分别是层 h 和研究区的 Y 值的方差。 q 的值域为[0, 1]，值越大说明驱动因素 X 对因变量 Y 的解释程度越高，反之则越低。交互探测是判断各个因子之间的交互作用，即计算两因子交互时的 q 值，交互关系分为 5 类，包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立和非线性增强[14] [24]。

本文以西安市建成区为研究区，综合考虑该区的自然环境和社会经济发展情况，选取 2019、2023 两年的年均 NDVI 值即其年均气温作为自然环境指标，2019、2023 年的道路密度以及年均夜间灯光强度作为社会经济发展因素指标，如表 3 所示。地理探测器的因子必须是类别而非数值，采用自然断点法将各个指标划分为 5 类。

Table 3. Basis for indicator selection
表 3. 指标选取依据

	因素	代码	指标含义	备注
自然环境因素	NDVI	X1	$\frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{Red} + R_{NIR})}$	NIR , Red 分别表示近红外、红光波段的反射率
	气温	X2	近地 2 m 气温	单位为℃
社会经济发展因素	道路密度	X3	每百平方公里或每万人所拥有的公路总里程数	单位为 km/km ²
	夜间灯光强度	X4	$\frac{TNLI}{n}$	$TNLI$ 表示每个区县的总灯光值； n 表示区域的栅格数量

4.2.4. 景观格局指标计算

移动窗口算法是一种在处理数据流或时间序列数据时使用的技术，它涉及在一个固定大小的窗口中对数据进行分析。主要步骤包括：(1) 确定窗口大小，即窗口包含的数据点数量；(2) 初始化窗口，开始时窗口为空；(3) 随着新数据点到来，将其加入窗口末尾，同时移除窗口开头最旧的数据点，保持窗口大小不变；(4) 计算窗口内的统计量，如平均值、最大值、最小值和标准差，用于检测趋势或异常；(5) 实时输出统计结果，便于进一步分析。

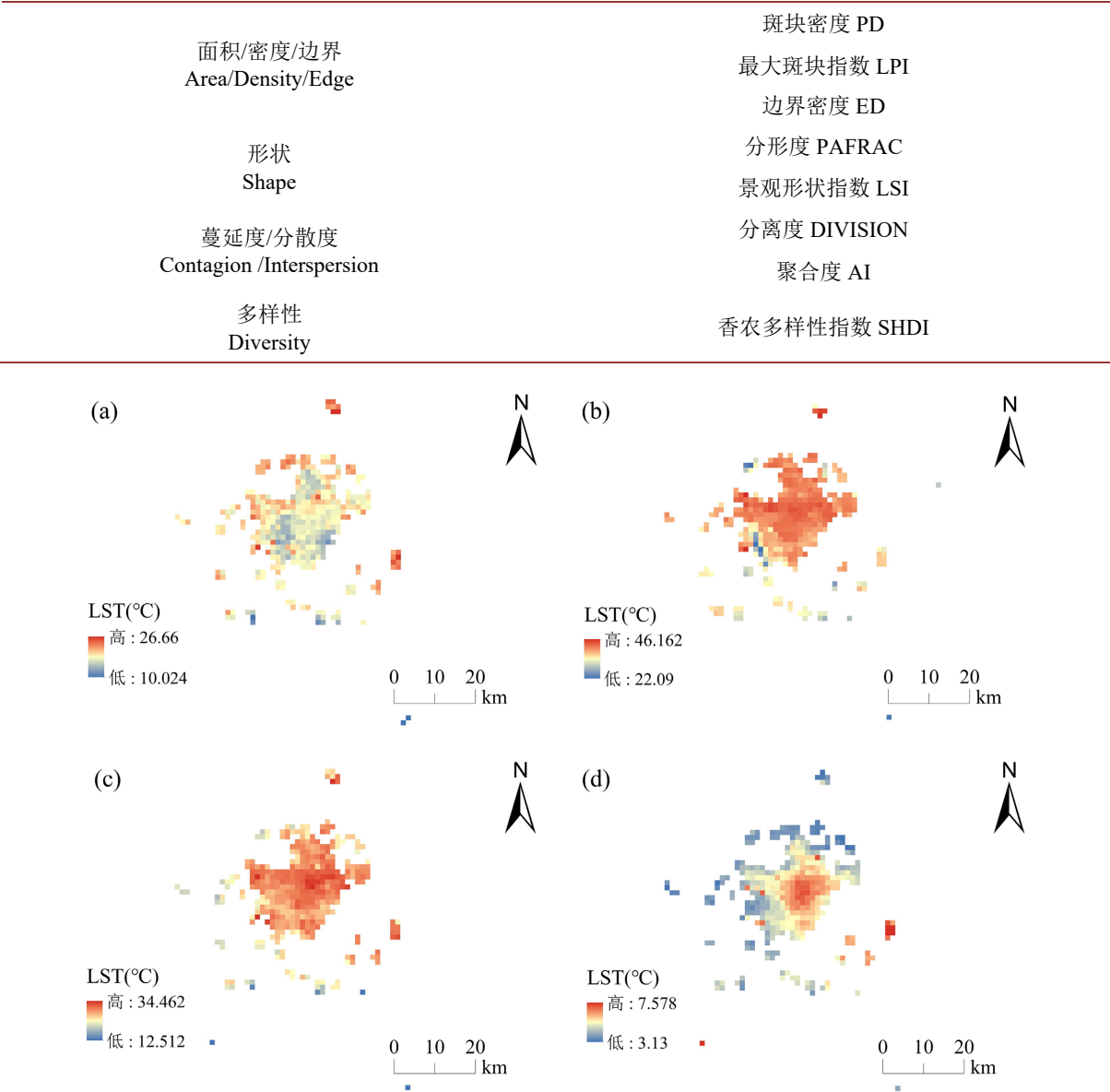
根据研究区实际土地利用与覆盖情况，对 2019 年和 2023 年的遥感影像进行了分类，划分为水体、建筑物、农业用地和草地/森林四类。分类采用随机森林算法，流程包括数据准备、特征提取、训练样本构建、随机森林分类器训练、分类、分类后处理以及精度评估与结果输出。分类完成后，在 ENVI 中利用多数/少数分析(Majority/Minority Analysis)、聚类(Clump Classes)和滤波(Sieve Classes)等工具对小斑块进行了去除与平滑处理，以消除被隔离的分类像元，使影像更加平滑。

基于分类后的土地利用数据，利用 Fragstats 软件采用移动窗口法计算景观格局指数。考虑到原始 10 米 × 10 米窗口尺寸下的计算量较大且景观类型相对单一，将该窗口作为单一景观单元进行指数计算时，各指数与地表温度几乎没有相关性，难以有效解释温度变化。经过多次试验后，窗口大小调整为 300 米 × 300 米，包含 30 × 30 个 10 米分辨率的景观像元。该较大窗口下计算的景观格局指数更能反映空间异质性，用以探究与地表温度的关系。指数分析揭示了若干重要的相互关系：边界密度(ED)与景观形状指数(LSI)及斑块数量(NP)呈正相关，表明城市化程度越高，城市热岛效应越明显；总斑块面积(CA)与香农多样性指数(SHDI)呈负相关，说明植被覆盖率和生态多样性越高，热岛效应越弱；最大斑块指数(LPI)与景观分割指数(DIVISION)之间的关系显示，较大的连续绿地有助于有效缓解热岛效应。表 4 列出了从 class、land 和 patch 三个不同尺度层次选取的景观格局指数。

Table 4. Selected landscape indices
表 4. 选取的景观指数

景观格局指数类别 Landscape metrics categor	景观格局指数 Landscape metrics
面积/密度/边界 Area/Density/Edge	总斑块面积 TA/CA 总斑块数 NP

续表



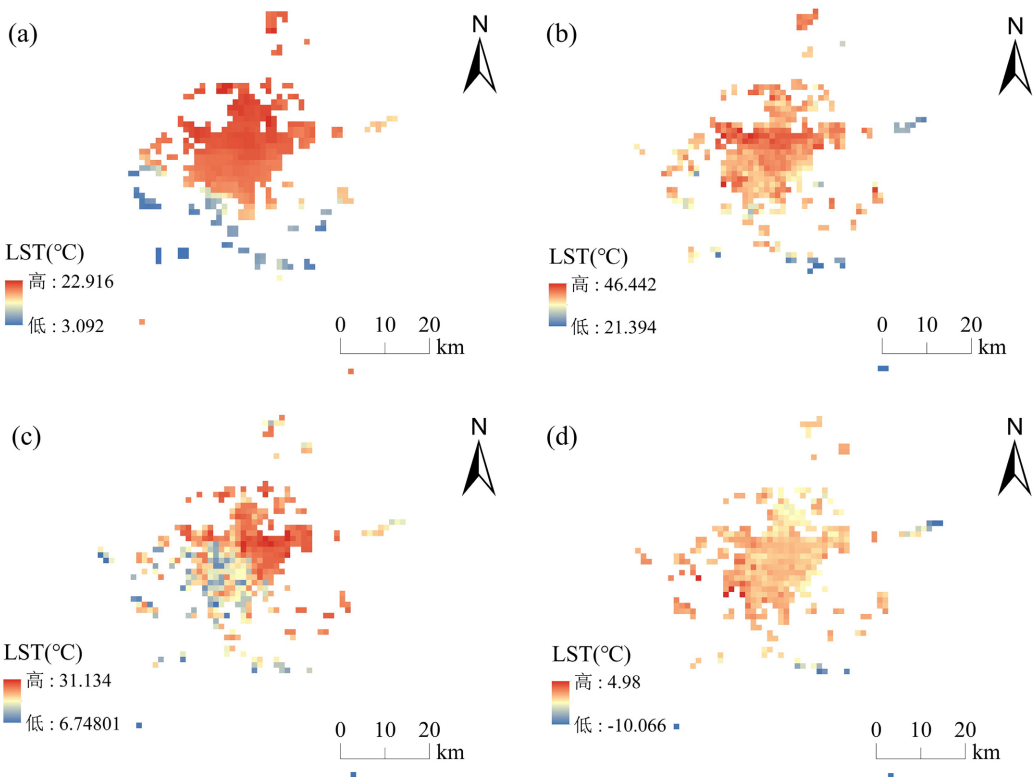
注：arcmmap10.7 制作。
Figure 4. 2019 four seasons LST results. In the figure, (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter
图 4. 2019 年地表温度结果。图中，(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

5. 结果分析与讨论

5.1. 建成区地表温度的空间分布特征

图 4 和图 5 分别展示了西安市建成区 2019 年与 2023 年四季地表温度的空间分布情况。地表温度受季节变化影响显著，呈现出明显的时空变化特征。在 2019 年春季，地表温度整体较为温和，范围集中在 15℃至 25℃之间，莲湖区和碑林区的温度相对较高。2023 年春季，地表温度略有上升，部分热点地区的温度达到 27℃，说明春季热岛效应随着城市化的推进有所增强，建筑和交通活动对环境温度的影响开始显现。2023 年夏季，高温区域的面积较 2019 年进一步扩大，高温区数量也显著增加，温度上

升至 35℃ 以上。特别是在商业活动和交通流量较大的核心区域，温度聚集现象显著。这一变化表明城市化进程中的人类活动和基础设施建设对环境温度的影响日益明显[25]。2023 年冬季，高温区虽然面积未大幅增加，但其温度范围有所上升，部分中心区域的温度仍保持在 10℃ 以上，反映出在寒冷天气条件下，建筑物及道路产生的热辐射对地表温度的调节作用依然显著。整体来看，地表温度随季节变化明显，春夏季热岛效应尤为突出，城市中心区高温区面积和强度均有所增加。与 2019 年相比，春季 2023 年局部热点区域的温度有所升高；夏季为全年最高温期，2023 年高温区范围扩展，核心区温度显著上升；秋季温度有所回落，但仍然存在热岛效应；冬季则是最低温期，城市中心保持相对较高的温度，2023 年中心区温度有所提高。两年间地表温度的波动表明城市化与季节变化之间存在密切关联[26][27]。未来的研究可以进一步探讨不同城市布局和绿地配置对城市热环境的影响，以提出有效的缓解策略。



注：arcmapi0.7 制作。

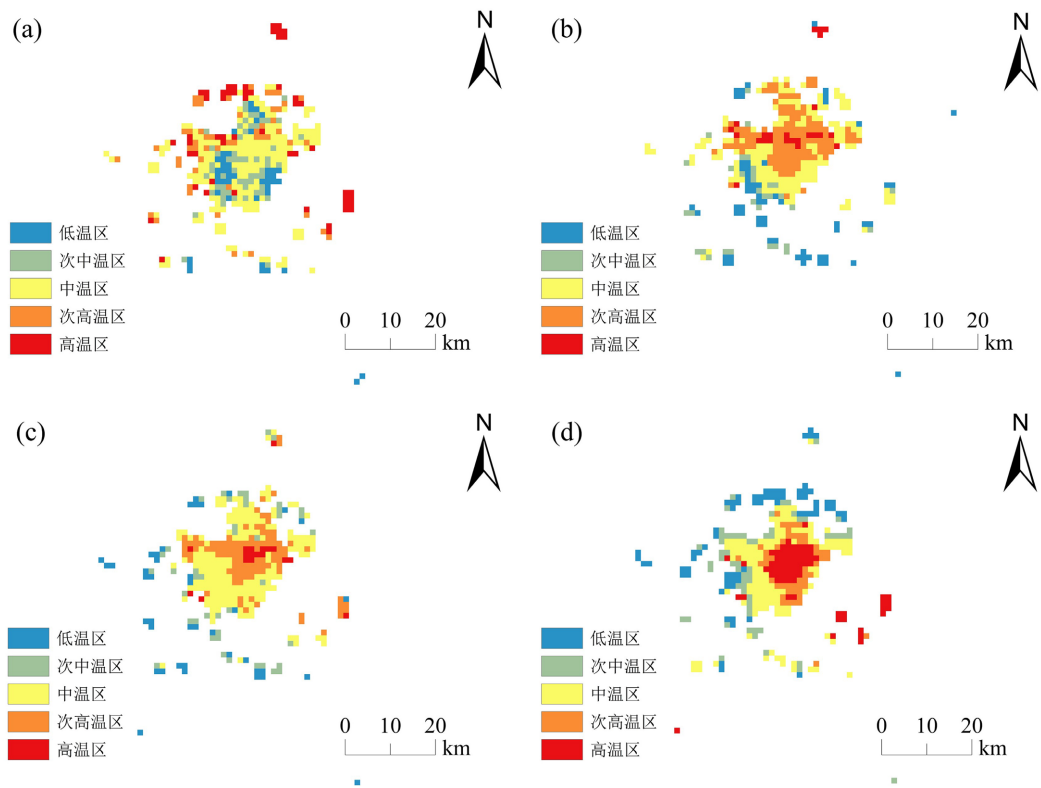
Figure 5. 2023 four seasons LST results. In the figure, (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter
图 5. 2023 年地表温度结果。图中，(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

5.2. 建成区热岛效应的时空演变特征

通过对不同年份和季节温区面积的统计分析发现，春季温区总面积增幅最为显著，从 2019 年的 484.88 km² 增加至 2023 年的 540.31 km²。根据图 6 和图 7 所示的 2019 年与 2023 年不同温区空间分布，春季高温区主要集中在城市中部的莲湖区、碑林区、雁塔区和新城，呈现出明显的聚集特征；而中温区则主要分布于未央区和高陵区。进入夏季，低温区面积有所扩大，高温区则零星分布于老城区。整体来看，夏季高温区所占比例较高，冬季则相对较低，低温区主要分布在建成区外围，中温区和高温区则集中于城市中心区域，高温区面积相对较小。

Table 5. Area statistics of temperature zones in different periods (2019 & 2023)
表 5. 不同时相温区面积统计(2019 & 2023)

热岛等级	低温区		次中温区		中温区		次高温区		高温区		温区总面积(km ²)	
时间	2019	2023	2019	2023	2019	2023	2019	2023	2019	2023	2019	2023
春季	55.38	89.85	70.15	6.15	228.90	238.77	63.99	201.85	66.46	3.69	484.88	540.31
夏季	75.07	49.23	40.61	49.23	185.83	273.23	157.52	104.62	29.54	54.15	488.57	530.46
秋季	50.46	87.38	54.15	49.23	226.44	168.62	129.22	131.69	22.15	71.38	482.42	508.31
冬季	88.61	32.00	75.07	51.69	164.91	308.92	62.76	84.92	87.38	23.38	478.73	500.92



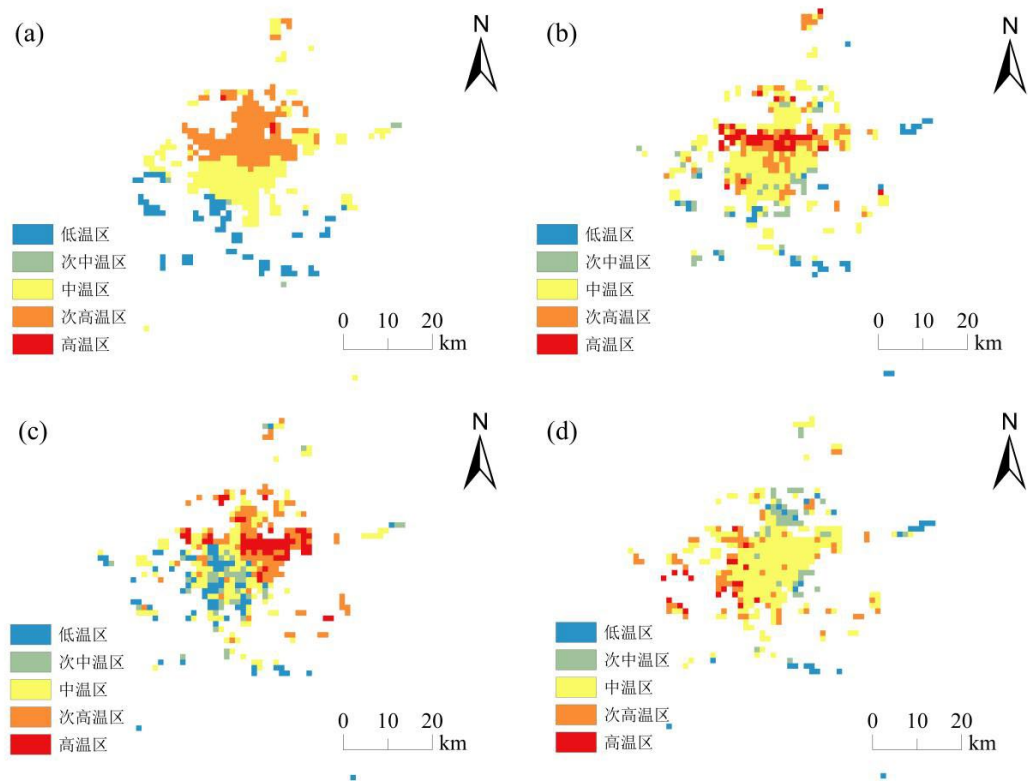
注：arcmap10.7 制作。

Figure 6. 2019 Temperature zone classification results for different seasons. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

图 6. 2019 年不同时相温区划分结果。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

根据图 8 中两年不同季节热岛等级的比较，四季中中温区面积分布最为广泛。夏季次中温区和高温区面积增幅显著，而秋冬季节温区变化幅度较小。各类热岛等级区域面积在不同季节表现出一定的动态变化，但总体来看，2023 年温区总面积较 2019 年有所增加(表 5)。与 2019 年相比，2023 年热岛效应在春季、夏季、秋季表现突出。图 9 显示，2019 年至 2023 年间，各温区面积占比经历明显波动，中温区、次高温区和高温区面积占比均有所提升，尤其集中于城市核心区。尽管冬季变化较小，但高温区面积依然有所增加，表明城市热岛效应在近几年持续加剧。这一趋势反映了城市化进程加快带来的热环境压力，建筑密集度提升、交通流量增加及绿地减少等因素共同促进了热岛效应的扩展[1][8][28]。夏季高温区面积扩大，说明城市热环境管理应重点关注高温季节的缓解措施[18][29]。针对热岛效应的时空演变特征，城市规划应结合不同季节和区域特点，优化绿地布局、控制建筑密度及改善交通结构，以缓解热岛效应，

提升城市生态环境质量和居民生活舒适度[10]。



注：arcmap10.7 制作。

Figure 7. 2023 Temperature zone classification results for different seasons. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

图 7. 2023 年不同时相温度区划分结果。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

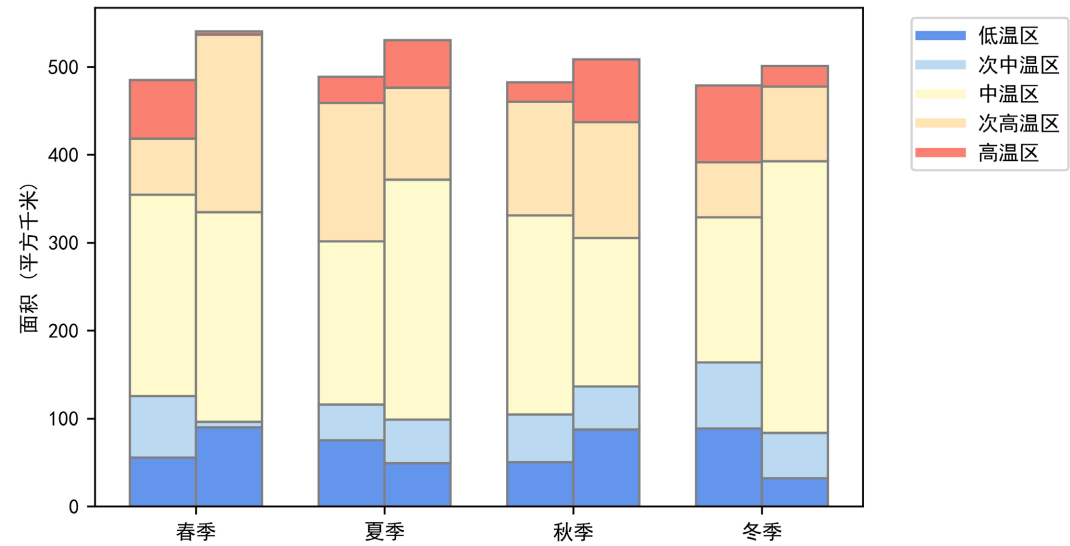


Figure 8. Trend of urban heat island area change, 2019 on the left, 2023 on the right
图 8. 热岛面积变化趋势，左边为 2019 年，右边为 2023 年

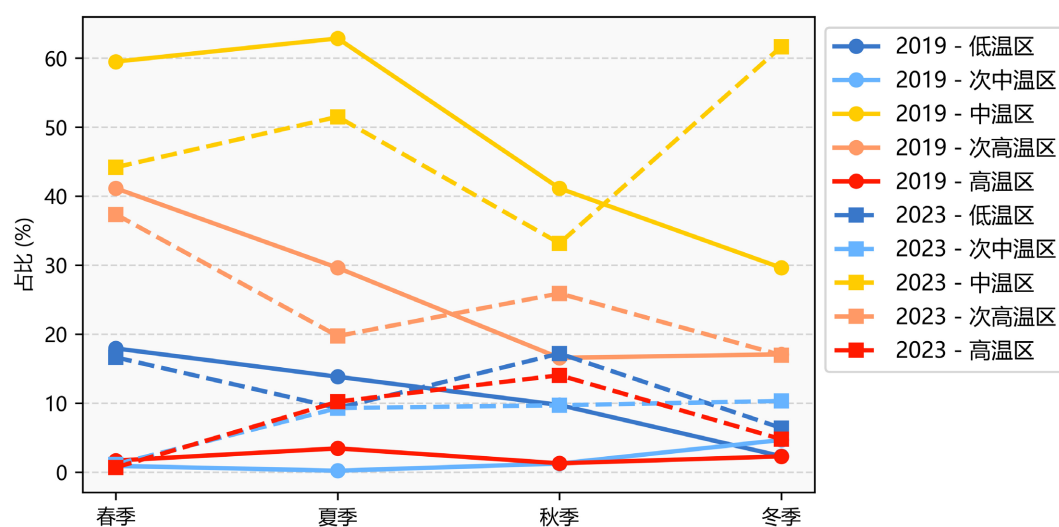


Figure 9. Trend of heat island area ratio change

图 9. 热岛面积占比变化趋势

5.3. 热岛效应影响因素分析

5.3.1. 基于地理探测器的影响因素分析

如表 6 所示,采用因子探测方法分析了四个潜在驱动因子对地表温度的影响程度(以 q 值衡量)。2019 年,四个驱动因子对地表温度的解释能力由强到弱依次为:气温(0.178) > 道路密度(0.155) > 夜间灯光(0.079) > NDVI (0.023),其中气温对建成区热岛强度的影响最大。到了 2023 年,驱动因子的解释顺序发生变化,夜间灯光(0.231)成为影响 LST 的主要因素,其次为气温(0.157)、NDVI (0.085)和道路密度(0.016)。对比两年数据可见,气温作为自然环境因素对 LST 的作用保持相对稳定,NDVI 对 LST 的关联始终较弱,而夜间灯光的贡献显著增强,反映出人类活动强度的提升对城市热环境的影响程度加深。与此同时,道路密度的解释力明显下降,可能与城市交通结构调整及道路绿化改造有关[13][24]。结果揭示了城市热岛效应驱动因素的动态变化特征。气温作为基础的自然环境变量,其对地表温度的稳定影响与已有研究结论相似[29],反映了气候条件对城市热环境的基础调控作用。夜间灯光作为人类活动强度的代表,其影响力的显著提升表明城市化进程中人类活动对热环境的贡献日益加剧[8][15]。道路密度影响力的下降可能反映了城市交通管理和绿化措施的改善,但仍需进一步结合具体交通流量和绿地分布数据进行深入分析。

进一步采用交互探测分析四个驱动因子之间的相互作用(图 10)。结果显示,2019 年气温与道路密度的交互作用对地表温度的影响最大,交互 q 值达到 0.275,表明自然环境与城市基础设施的耦合效应显著。2023 年,夜间灯光与其他因子的交互作用均表现出增强趋势,其中夜间灯光与气温的交互 q 值最高(0.337),其次为夜间灯光与道路密度(0.267)及夜间灯光与 NDVI (0.25)。表明人类活动与自然环境因素的耦合对热岛效应的影响日益突出[7]。这一现象的物理和社会经济机制主要包括:(1) 夜间经济活动的增加导致能源消耗和人为热排放显著上升,夜间灯光不仅反映了人口密度和经济活跃度,还直接增加了城市的热负荷[28];(2) 气温升高会加剧城市能源需求,进一步推动空调等制冷设备的使用,形成“热-能-排放”正反馈机制[13];(3) 夜间灯光与气温的协同作用可能通过改变城市局地气候、增强热量滞留等方式,增强热岛效应度[18]。与 Zhao 等(2021)已有研究结论相似[28],本研究进一步证实了夜间灯光与气温交互对热岛效应的影响。城市热环境治理应综合考虑自然与社会经济因素的协同作用,夜间灯光与气

温的强交互作用反映了夜间人类活动与气候条件共同塑造城市热环境的现实，应加强夜间光污染控制和能源管理，以缓解热岛效应[23] [30]。

Table 6. LST influencing factors detection results
表 6. LST 影响因素探测结果

	2019 年	2023 年
NDVI	0.023**	0.085**
气温	0.178**	0.157**
道路密度	0.155**	0.016**
夜间灯光	0.079**	0.231**

注：**代表 q 值在 0.001 水平显着($p < 0.001$)。

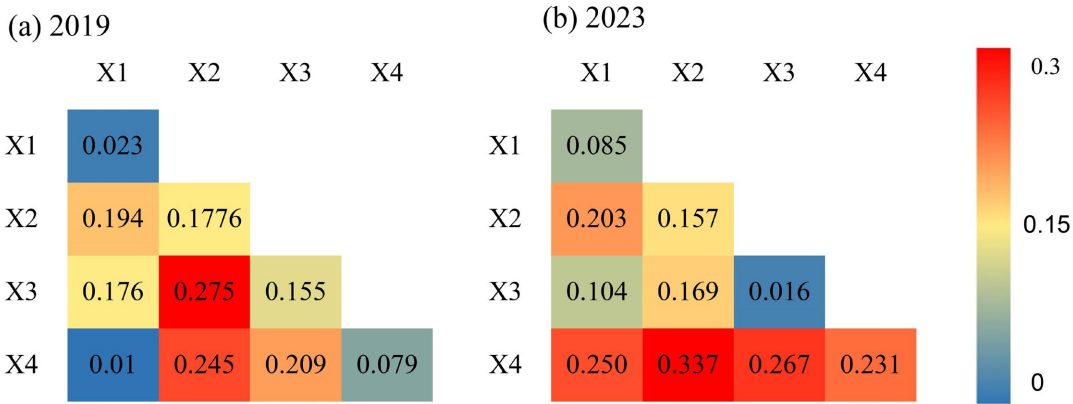


Figure 10. LST Driving factor interaction analysis
图 10. LST 驱动因子交互分析结果

5.3.2. 景观格局指数与热岛效应关系分析

分别计算不同景观指数与 2019 年、2023 年不同时相的西安市建成区地表温度的 Pearson 相关系数，结果如表 7 所示。整体上，春季和夏季的热岛效应明显，而秋季和冬季则表现出一定的季节性变化。

Table 7. Correlation coefficient between landscape indices and land surface temperature
表 7. 景观指数与地表温度的相关系数

获取地表温度的日期	总斑块面积 CA	边界密度 ED	景观形状指数 LSI	最大斑块指数 LPI	斑块数量 NP	斑块密度 PD	景观分型指数 PAFRAC	景观分割指数 DIVISION	Shannon 多样性指数 SHDI
2019-03-25	0.90	0.13*	0.90	0.87	0.53	0.53	0.35	0.58	0.19
2023-03-22	0.06**	0.12	0.06**	0.02**	0.07**	0.13**	-0.19	-0.09	-0.09
2019-06-30	0.85	0.11*	0.84	0.83	0.50	0.47	0.30	0.52	0.15
2023-06-22	0.06**	0.13	0.06**	0.02**	0.07**	0.12**	-0.20	-0.09	-0.09
2019-09-27	0.89	0.15*	0.89	0.87	0.52	0.52	0.34	0.57	0.21
2023-09-21	0.06**	0.12	0.06**	0.02**	0.07**	0.13**	-0.21	-0.09	-0.09
2019-12-22	-0.89	-0.12*	-0.89	-0.86	-0.53	-0.54	-0.36	-0.59	-0.19
2023-12-21	0.06**	0.12	0.06**	0.02**	0.06**	0.12**	-0.21	-0.08	-0.08

注：样本数：2019 年：3700；2023 年：3944。* $P < 0.05$ ；** $P < 0.01$ 。下同。

Table 8. Correlation coefficients between landscape pattern indices of buildings and land surface temperature
表 8. 建筑物景观格局指数与地表温度的相关系数

获取地表温度的日期		总斑块面积 CA	斑块密度 PD	最大斑块 指数 LPI	景观形状 指数 LSI	景观分割指数 DIVISION	聚合度 AI
春季	2019-3-25	0.799**	0.799**	0.796**	0.800**	0.800**	0.793**
	2023-3-22	0.885**	0.885**	0.886**	0.885**	0.885**	0.885**
夏季	2019-6-30	0.736*	0.736*	0.733*	0.736*	0.736*	0.731*
	2023-6-22	0.886**	0.886**	0.888**	0.886**	0.886**	0.886**
秋季	2019-9-27	0.786*	0.786*	0.783*	0.787*	0.787*	0.780*
	2023-9-21	0.876**	0.876**	0.878**	0.876**	0.876**	0.876**
冬季	2019-12-22	-0.800**	-0.800**	-0.797*	-0.801	-0.801	-0.796
	2023-12-21	0.850	0.850	0.852	0.850	0.850	0.850

在 2019 年，各季节中，总斑块面积(CA)和景观形状指数(LSI)与地表温度的相关性表现较强。春季和夏季，CA 和 LSI 与地表温度间的正相关性显著。2019 年 3 月、6 月和 9 月，CA 和 LSI 与地表温度呈显著正相关，而在 11 月，所有指数与地表温度均呈现负相关，表明地表覆盖变化对地表温度的影响显著。相比于 2019 年，在 2023 年春季、夏季和秋季，CA、边界密度(ED)和 LSI 指数均有所降低，表明这几个季节景观的复杂性有所减弱；而冬季相较于 2019 年有所回升，说明冬季热岛效应有所加强，与城市化进程导致的生态环境恶化有关。

Table 9. Correlation coefficients between landscape pattern indices of agricultural land and land surface temperature
表 9. 农业用地景观格局指数与地表温度的相关系数

获取地表温度的日期		总斑块面积 CA	斑块密度 PD	最大斑块 指数 LPI	景观形状 指数 LSI	景观分割指数 DIVISION	聚合度 AI
春季	2019-3-25	0.198	0.198	0.197	0.198	0.198	0.173
	2023-3-22	0.398	0.398	0.397	0.398	0.398	0.397
夏季	2019-6-30	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.146
	2023-6-22	0.408**	0.407**	0.406**	0.408**	0.408**	0.407**
秋季	2019-9-27	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.189
	2023-9-21	0.360**	0.360**	0.359**	0.360**	0.361**	0.359**
冬季	2019-12-22	-0.198	-0.198	-0.197	-0.198	-0.198	-0.172
	2023-12-21	0.339*	0.338*	0.337	0.339*	0.339*	0.338*

Table 10. Correlation coefficient between landscape metrics of water bodies and land surface temperature
表 10. 水体景观格局指数与地表温度的相关系数

获取地表温度的日期		总斑块面积 CA	斑块密度 PD	最大斑块 指数 LPI	景观形状 指数 LSI	景观分割指数 DIVISION	聚合度 AI
春季	2019-3-25	0.174	0.174	0.173	0.174	0.174	0.173
	2023-3-22	0.135	0.215	0.136	0.216	0.237**	0.232**
夏季	2019-6-30	0.147	0.147	0.147	0.147	0.147	0.146
	2023-6-22	0.140	0.232**	0.140	0.230**	0.250**	0.243**

续表

秋季	2019-9-27	0.191	0.190	0.190	0.191	0.191	0.189
	2023-9-21	0.127	0.232**	0.127	0.231**	0.253**	0.242**
冬季	2019-12-22	-0.174	-0.174	-0.173	-0.174	-0.174	-0.172
	2023-12-21	0.084	0.181	0.085	0.178	0.203	0.189

Table 11. Correlation coefficient between vegetation landscape pattern indices and land surface temperature
表 11. 植被景观格局指数与地表温度的相关系数

获取地表温度的日期		总斑块面积 CA	斑块密度 PD	最大斑块 指数 LPI	景观形状 指数 LSI	景观分割指数 DIVISION	聚合度 AI
春季	2019-3-25	0.106	0.105	0.106	0.106	0.106	春季
	2023-3-22	0.120	0.120	0.119	0.120	0.121	
夏季	2019-6-30	0.118	0.117	0.118	0.118	0.118	夏季
	2023-6-22	0.109	0.109	0.108	0.109	0.109	
秋季	2019-9-27	0.092	0.090	0.092	0.092	0.092	秋季
	2023-9-21	0.137	0.137	0.136	0.137	0.137	
冬季	2019-12-22	-0.096	-0.095	-0.096	-0.096	-0.096	冬季
	2023-12-21	0.146	0.145	0.145	0.146	0.146	

不同景观类型的格局指数与地表温度的相关性存在较大差异，有的景观格局指数表现出了较明显的季节分异性和年际差异。如表 8 所示，建筑物在不同季节和年份的相关系数波动较大，但在一年内所有景观指数均呈现高相关性，且 2023 年的相关系数有所上升，表明城市建成区扩张对地表温度变动的影响逐渐加大。

表 9、表 10、表 11 中，由于分布面积相对较小，农业用地、水体和植被的相关系数整体较低，且变化相对平稳，未表现出明显的季节性波动。相比之下，农业用地的 CA 和景观分形指数(LPI)值较高，说明其与地表温度间存在一定的正相关关系。水体与植被的景观格局指数与地表温度的相关系数在 2019 年数据显示不高，而在 2023 年秋季与冬季相关性有所增强。但由于这些相关系数较小，表明地表温度与植被景观指数之间的线性关系并不强，因此水体和植被中的景观格局指数可能不是预测或解释地表温度变化的最佳指标。

本研究的结果表明，不同的景观指数对地表温度的影响存在季节性与空间异质性。建筑物景观指数与地表温度的高相关性，说明城市核心区建筑密度和形状复杂性是热岛效应的重要调节因素，这与 Yao 等(2020)的研究结论接近[6]。Zhou 等(2011)指出，土地覆盖类型的空间配置对热岛效应有重要影响，尤其是大面积连续的建筑用地更易形成高温区[31]。本研究发现，水体和植被在秋冬季对缓解热岛效应的作用更为显著，这与陈爱莲(2014)和王雪等(2017)在北京的实证结果相符[32] [33]。造成这种季节性差异的原因，可能在于秋冬季节蒸发冷却效应和绿地的热缓冲作用更为突出，而夏季高温期城市热负荷主要由建筑物和道路主导。相比之下，农业用地和水体的相关性变化较小，说明其在城市化进程中对地表温度的调控作用可能被建筑扩张所掩盖。

6. 结论

本文基于多源遥感数据和地理探测器方法，系统分析了西安市中心建成区 2019 年与 2023 年不同季节的城市热岛效应时空特征及其驱动因素，得出以下主要结论：

(1) 西安市的高温区主要集中在城市核心区域,包括莲湖区、碑林区、雁塔区和新城区。这些区域建筑密集、交通繁忙且人类活动频繁,成为城市热岛效应的重要源头。整体来看,夏季的高温区比例最高,且 2023 年相比 2019 年,冬季虽然变化相对较小,但高温区面积仍有所增加,体现了春季和夏季热岛效应的加剧趋势。

(2) 气温是影响地表温度变化的主要驱动因素,其影响力在 2019 年和 2023 年间保持稳定。社会经济因素中,夜间灯光强度在 2023 年成为影响热岛效应的主要驱动力,反映出人类活动对城市热环境的影响日益显著。道路密度的影响力有所下降,推测与城市交通结构调整和道路绿化改造有关。2019 年气温与道路密度的交互作用对热岛效应贡献最大,而 2023 年夜间灯光与气温的交互作用增强,说明人类活动与自然环境因素的复杂耦合关系对城市热环境具有重要影响。

(3) 景观格局指数分析揭示不同景观类型对地表温度的影响存在显著差异。建筑密度是影响热岛效应的重要因素。农业用地、水体和植被的相关性相对较低,但水体和植被在 2023 年秋冬季相关性有所增强,反映绿地和水体在缓解热岛效应中发挥着潜在的调节作用。景观格局的季节性和年际变化反映了城市化进程对生态环境的影响,强调了合理规划绿地面积和形状、优化景观结构的重要性。

西安市城市热岛效应的形成是自然环境与社会经济因素共同作用的结果,具有明显的时空异质性和季节性变化特征。文中的研究结果对城市规划和热环境管理具有重要的实际指导意义。在未来城市规划中应重点加强核心城区的绿地建设和水体保护,合理控制建筑密度和道路布局,减少夜间光污染,提升城市生态系统服务功能。建议在城市核心区扩大连续绿地和水体的面积,借鉴“绿岛”和“绿廊”布局理念,以提升城市生态系统服务功能[34];同时应合理控制建筑密度与形状复杂性,优化道路布局,减少热量聚集区的形成;对于夜间灯光与气温的强交互作用,可加强夜间能源管理和光污染控制,倡导绿色照明和节能减排;城市热环境治理应结合季节变化,制定差异化的绿地修复与水体养护策略,提高城市居民的生活质量和健康水平,促进城市可持续发展[35]。

参考文献

- [1] 樊辉. 基于 Landsat TM 的城市热岛效应与地表特征参数稳健关系模型[J]. 国土资源遥感, 2008, 19(3): 45-51.
- [2] Voogt, J.A. (2020) Urban Heat Islands. In: *Atmosphere and Climate*, CRC Press, 265-272.
- [3] 陈俊. 二三一体化不动产管理模式服务不动产统一登记工作[J]. 现代经济信息, 2019(2): 54-55.
- [4] Howard, L. (1833) *Climate of London Deduced from Meteorological Observation*. Harvey and Darton.
- [5] Rao, P.K. (1972) Remote Sensing of Urban Heat Islands from an Environmental Satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **53**, 647-648.
- [6] Yao, L., Li, T., Xu, M. and Xu, Y. (2020) How the Landscape Features of Urban Green Space Impact Seasonal Land Surface Temperatures at a City-Block-Scale: An Urban Heat Island Study in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, **52**, Article ID: 126704. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126704>
- [7] 沈中健, 曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 842-852.
- [8] 熊鹰, 章芳. 基于多源数据的长沙市人居热环境效应及其影响因素分析[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2443-2458.
- [9] 汪洋, 杨丹, 闵婕, 等. 山地高密度城市热岛效应的多约束因子格局分析与定量探测: 重庆都市区案例研究[J]. 地理研究, 2021, 40(3): 856-868.
- [10] 葛静茹, 王海军, 贺三维, 等. 武汉市都市发展区地表温度季节性空间分布与驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(2): 351-360.
- [11] 向炆, 周志翔. 基于地理探测器的城市热岛驱动因素分析: 以武汉市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8): 1768-1779.
- [12] Chi, Y., Sun, J., Sun, Y., Liu, S. and Fu, Z. (2020) Multi-Temporal Characterization of Land Surface Temperature and Its Relationships with Normalized Difference Vegetation Index and Soil Moisture Content in the Yellow River Delta, China. *Global Ecology and Conservation*, **23**, e01092. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01092>
- [13] 牛陆, 张正峰, 彭中, 等. 中国地表城市热岛驱动因素及其空间异质性[J]. 中国环境科学, 2022, 42(2): 945-953.

- [14] 李壮, 季民, 张镔漫. 基于地理探测器的合肥市热岛效应影响因素分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(3): 56-59.
- [15] 李雨露, 孟丹, 郭晓彤, 等. 北京市地表温度的季节变化及其驱动因素空间异质性分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 69-79.
- [16] Liang, S., Li, X. and Wang, J. (2013) Quantitative Remote Sensing: Concepts and Algorithms. Academic Press.
- [17] Cui, J.Y., et al. (2011) Urban Heat Island Effect Study and Prediction Analysis Based on Landsat TM Data. *Remote Sensing Technology and Application*, **25**, 8-14.
- [18] Zhang, Q., Wu, Z., Yu, H., Zhu, X. and Shen, Z. (2020) Variable Urbanization Warming Effects across Metropolitans of China and Relevant Driving Factors. *Remote Sensing*, **12**, Article No. 1500. <https://doi.org/10.3390/rs12091500>
- [19] Yang, J. and Huang, X. (2021) The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, **13**, 3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>
- [20] Peng, S., Ding, Y., Liu, W. and Li, Z. (2019) 1 km Monthly Temperature and Precipitation Dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, **11**, 1931-1946. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1931-2019>
- [21] 卓莉, 张晓帆, 郑璟, 等. 基于 EVI 指数的 DMSP/OLS 夜间灯光数据去饱和和方法[J]. 地理学报, 2015, 70(8): 1339-1350.
- [22] 刘智丽, 张启斌, 岳德鹏, 等. 基于 Sentinel-2A 与 NPP-VIIRS 夜间灯光数据的城市建成区提取[J]. 自然资源遥感, 2019(4): 227-234.
- [23] Wang, J., Zhang, T. and Fu, B. (2016) A Measure of Spatial Stratified Heterogeneity. *Ecological Indicators*, **67**, 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.052>
- [24] Liu, W., Meng, Q., Allam, M., Zhang, L., Hu, D. and Menenti, M. (2021) Driving Factors of Land Surface Temperature in Urban Agglomerations: A Case Study in the Pearl River Delta, China. *Remote Sensing*, **13**, Article No. 2858. <https://doi.org/10.3390/rs13152858>
- [25] Liu, Y., Peng, J. and Wang, Y. (2017) Diversification of Land Surface Temperature Change under Urban Landscape Renewal: A Case Study in the Main City of Shenzhen, China. *Remote Sensing*, **9**, Article No. 919. <https://doi.org/10.3390/rs9090919>
- [26] Dai, Z., Guldmann, J. and Hu, Y. (2018) Spatial Regression Models of Park and Land-Use Impacts on the Urban Heat Island in Central Beijing. *Science of the Total Environment*, **626**, 1136-1147. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.165>
- [27] Lu, L., Weng, Q., Xiao, D., Guo, H., Li, Q. and Hui, W. (2020) Spatiotemporal Variation of Surface Urban Heat Islands in Relation to Land Cover Composition and Configuration: A Multi-Scale Case Study of Xi'an, China. *Remote Sensing*, **12**, Article No. 2713. <https://doi.org/10.3390/rs12172713>
- [28] Zhao, X., Liu, J. and Bu, Y. (2021) Quantitative Analysis of Spatial Heterogeneity and Driving Forces of the Thermal Environment in Urban Built-Up Areas: A Case Study in Xi'an, China. *Sustainability*, **13**, Article No. 1870. <https://doi.org/10.3390/su13041870>
- [29] Yang, C., Yan, F., Lei, X., Ding, X., Zheng, Y., Liu, L., et al. (2020) Investigating Seasonal Effects of Dominant Driving Factors on Urban Land Surface Temperature in a Snow-Climate City in China. *Remote Sensing*, **12**, Article No. 3006. <https://doi.org/10.3390/rs12183006>
- [30] Niu, L., Tang, R., Jiang, Y. and Zhou, X. (2020) Spatiotemporal Patterns and Drivers of the Surface Urban Heat Island in 36 Major Cities in China: A Comparison of Two Different Methods for Delineating Rural Areas. *Sustainability*, **12**, Article No. 478. <https://doi.org/10.3390/su12020478>
- [31] Zhou, W., Huang, G. and Cadenasso, M.L. (2011) Does Spatial Configuration Matter? Understanding the Effects of Land Cover Pattern on Land Surface Temperature in Urban Landscapes. *Landscape and Urban Planning*, **102**, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009>
- [32] 陈爱莲. 景观格局对城市地表热岛效应的影响研究——以北京市为例[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [33] 王雪, 于德永, 曹茜, 等. 城市景观格局与地表温度的定量关系分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 329-336.
- [34] Cai, Y., Zhang, H., Zheng, P. and Pan, W. (2016) Quantifying the Impact of Land Use/Land Cover Changes on the Urban Heat Island: A Case Study of the Natural Wetlands Distribution Area of Fuzhou City, China. *Wetlands*, **36**, 285-298. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0738-7>
- [35] Yang, C., Yan, F., Lei, X., Ding, X., Zheng, Y., Liu, L., et al. (2020) Investigating Seasonal Effects of Dominant Driving Factors on Urban Land Surface Temperature in a Snow-Climate City in China. *Remote Sensing*, **12**, Article No. 3006. <https://doi.org/10.3390/rs12183006>