高蓓杰,熊秋林,陈文波,等.基于街景数据的南昌市三环内绿视率对城市热环境的多尺度影响分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6353-6365.
Gao B J, Xiong Q L, Chen W B, et al. Multi-Scale impacts of street view-based green view index on urban thermal environment within the third ring road of nanchang [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6353-6365.

基于街景数据的南昌市三环内绿视率对城市热环境的多尺度影响分析

高蓓杰[1,2,3],熊秋林[1,2,3*],陈文波[1,2,3],何海清[1,2,3],黄怡容[1,2,3],洪清文[1,2,3],杨柯柯[1,2,3],赵鑫玥[1,2,3] (1.东华理工大学测绘与空间信息工程学院,江西 南昌 330013；2.东华理工大学,江西省流域生态过程与信息重点实验室,江西 南昌 330013；3.东华理工大学,南昌市景观过程与国土空间生态修复重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要：选取南昌市三环内为研究区,利用语义分割技术计算街景图像的绿视率(Green View Index,GVI),借助 Google Earth Engine(GEE)平台反演 LST.采用热点分析、剖面分析和地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression,GWR),系统分析了 GVI 和 LST 的时空格局,并深入解析了不同网格尺度下 GVI 对 LST 的影响差异.结果表明:2017~2021 年,南昌市三环内整体 GVI 水平呈现下降趋势,研究区 60.9%的区域 GVI 下降;但局部 GVI 提升并形成持续绿化优势带,极显著热点占比由 31.6%增至 41.1%.同期,整体 LST 升高,热岛效应加剧;南昌市三环内高温及次高温面积占比从 6.5%升至 25.0%,强热岛和极强热岛区域面积从 46.0%增至 50.8%.三环内 GVI 对 LST 的影响表现出空间非平稳性,不同尺度 R^2不同;其中 500m×500m 尺度下 R^2 最高,2017 年、2019 年、2021 年分别为 0.58、0.65、0.70.GVI 对 LST 的影响存在空间尺度效应,南昌市三环线内的最佳网格尺度为 500m×500m.研究结果揭示了城市 GVI 的时空变化及其对 LST 的多尺度影响,不仅有助于从三维绿量视角理解城市绿化对 LST 的影响,而且可为城市规划提供理论参考.

关键词：绿视率；地表温度；时空格局；多尺度；地理加权回归
中图分类号：X87 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6353-13

Multi-Scale impacts of street view-based green view index on urban thermal environment within the third ring road of nanchang. GAO Bei-jie[1,2,3], XIONG Qiu-lin[1,2,3*], CHEN Wen-bo[1,2,3], HE Hai-qing[1,2,3], HUANG Yi-rong[1,2,3], HONG Qing-wen[1,2,3], YANG Ke-ke[1,2,3], ZHAO Xin-yue[1,2,3] (1.School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China；2.Jiangxi Key Laboratory of Watershed Ecological Process and Information, East China University of Technology, Nanchang 330013, China；3.Nanchang Key Laboratory of Landscape Process and Territorial Spatial Ecological Restoration, East China University of Technology, Nanchang 330013, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6353~6365

Abstract：This study was conducted within the area enclosed by the Third Ring Road of Nanchang, China. The Green View Index (GVI) was calculated using semantic segmentation of panoramic street view imagery, while Land Surface Temperature (LST) was retrieved through the Google Earth Engine (GEE) platform. Hotspot analysis, profile analysis, and Geographically Weighted Regression (GWR) model were employed to investigate the spatiotemporal patterns of GVI and LST and explore the scale-dependent impact of GVI on LST. The main conclusions are as follows: (1) From 2017 to 2021, the entire study area showed a declining trend, with 60.9% of the area experiencing a reduction in GVI. However, the local GVI had been enhanced and had formed a continuous green advantage zone, and the proportion of statistically significant hotspots increased from 31.6% to 41.1%. (2) During the same period, the overall LST had increased, and the Urban Heat Island (UHI) effect had intensified. The proportion of high and sub-high temperature areas rose sharply from 6.5% to 25.0%, and the proportion of strong and extremely strong UHI areas expanded from 46.0% to 50.8%. (3) The relationship between GVI and LST was foundto be spatial non-stationarity, with R^2 values varyingacross different grid scales. At the 500m×500m resolution, the GWR model achieved the best performance, with R^2 values of 0.58, 0.65, and 0.70 in 2017, 2019, and 2021, respectively. (4) A significant scale effect was identified in the impact of GVI on LST, and the 500m×500m grid was identified as the optimal analysis scale within the study area. The researchresults reveal the spatiotemporal variations of urban GVI and its multi-scale impacts on LST. This not only helps to understandthe impactof urban greening on LST from the perspective of three-dimensional greenvolume, but also providestheoretical references for urban planning.

Key words: green view index (GVI)；land surface temperature (LST)；spatiotemporal patterns；multi-scale；geographically weighted regression

收稿日期：2025-04-02
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42107274);江西省自然科学基金项目(20202BABL213030);江西省水利科学院开放基金项目(2022SKLS03)
* 责任作者, 副教授, xiong_ql@163.com

随着城市化的发展,城市热环境问题日益凸显,成为制约城市可持续发展的重大挑战之一.根据世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)数据显示,2023 年全球均温较工业化前水平升高 1.45±0.12°C[1].城市化进程伴随的绿地空间与生态用地的转出,一定程度上削弱了城市降温功能,导致地表温度(Land Surface Temperature, LST)持续上升,加剧了城市热岛(Urban Heat Island, UHI)效应[2].LST 的升高不仅直接影响城市微气候,还对居民生活质量和身体健康构成严重威胁[3].在此背景下,绿色植被通过蒸腾作用与遮阴效果可有效降低局部温度.而绿视率(Green View Index, GVI)作为三维绿量的视觉表征指标,量化了人的视域中绿化面积占比[4],对环境温控效果有较大影响.GVI 与三维绿量呈正比关系[4],不仅能有效阻挡部分太阳辐射,还能通过植物的蒸腾作用吸收热量并释放水分,从而有效降低 LST[5-7].GVI 对 LST 的影响在不同规模和结构的城市中存在差异[8-9].因此,探索 GVI 和 LST 的时空演变格局及其相互影响,对调节城市热环境、优化城市绿地布局、提升居民生活质量至关重要,既能为城市规划提供理论支持,还能在实践中指导更合理的绿地设计,助力城市可持续发展.

近年来,专家学者们从多个维度揭示了绿地属性对热环境的调控机制.传统研究多聚焦于绿地面积、类型等二维指标的空间分异规律[10-14],例如绿地景观结构显著影响气温的空间格局和波动变化[14-15].此类研究虽详细分析了绿地降温的尺度效应,但多局限于二维指标,难以捕捉绿地的立体结构及人类可视范围的三维绿量,因而无法全面表征绿化对热环境的调控作用.随着三维绿量概念的兴起,绿视率(GVI)作为量化可视绿量的新兴指标,初期研究主要集中于居民视觉舒适度与健康效益评估[16-17]以及街道绿化评价方法[18-21].因其三维属性与人类感知的高度契合,GVI 近年逐渐被引入热环境研究领域[22],如 Zhou 等[23]证实街道 GVI 与 LST 呈显著负相关,聂艳霞等[24]进一步指出 GVI 对热环境的解释力优于传统二维指标.然而,现有研究多局限于某一时段或尺度,尚未系统分析 GVI 对热环境的多时空尺度影响,难以揭示其动态效应与空间异质性.

综上所述,现有研究难以揭示三维绿量的时空演变特征及其对城市热环境的长期影响,且尚未分析 GVI 降温效应在空间尺度上的敏感性,导致难以回答“何种空间尺度下 GVI 的降温效果最优”这一核心问题.针对上述局限,本研究通过构建 GVI 与 LST 的多时空尺度网格耦合分析框架,以揭示 GVI 对 LST 的时空影响规律及其空间拐点.实现了三维视角下从静态到动态的多尺度“绿化−热环境”响应研究,识别了 GVI 降温效应的最佳网格尺度,为城市绿地系统规划提供了理论依据.

南昌市夏季高温特征显著,其“一江两岸、蓝绿交织”的独特格局与快速城市化进程形成了鲜明对比,为探究 GVI−LST 的交互机制提供了天然实验场所.本文拟以南昌市三环内作为研究区,基于道路网络布设街景采样点,采用网络爬虫技术获取全景街景图像并对其进行语义分割,提取街景图像的三维 GVI 数据;再结合 GEE 平台反演 LST,利用渔网工具创建多尺度网格,采用热点分析与地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression,GWR)等方法,系统揭示南昌市三环内 GVI 与 LST 的时空格局及其多尺度影响规律,识别南昌市三环内的最佳网格尺度.研究旨在分析三维视角下城市绿量的变化及其对热环境的调节作用,以支持差异化的绿地降温策略,为优化绿地降温效能、实现“精准控温”提供理论支持,也为“气候适应型”城市建设提供科学依据和基础支撑.

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区及采样点布设

南昌市(28°10′−29°11′N,115°27′−116°35′E)地处中国长江中游城市核心区,属于亚热带季风气候,夏季高温高湿特征显著,素有“火炉”之称.其地势西北高、东南低,丘陵和水网交织,具有独特的“蓝绿交织”空间格局,共同构成调节城市热环境的天然冷源(图 1(a)、图 1(b));与同气候带的武汉、长沙相比[25],南昌市“蓝绿空间”的降温效应影响更为显著.根据南昌市统计年鉴,南昌市建成区绿地率从 2017 年的 39.9%提升至 2021 年的 40.0%[26-27],为探究绿地与热环境的动态响应提供了理想样区.

为研究绿视率(GVI)对地表温度(LST)的影响和空间调节作用,本研究选择南昌市三环(约 973km^2)内作为研究区,如图 1(b),该区域覆盖主要交通干道与中心城区,不仅是城市热岛效应的核心区,也是

《南昌市国土空间总体规划(2021~2035)》中“公园城市”建设的重点区域,具有高密度街景数据采集条件、热环境变化剧烈等特点,适合开展 GVI 对 LST 的空间响应研究.

本研究基于南昌市道路网络数据(OSM 开源平台),在 ArcGIS 平台提取道路中线绘制单线道路数据,打断道路数据中交叉道路口.参照前人研究[28],以 50m 为间隔布设初始采样点,通过 python 脚本将 WGS84 坐标批量转换为百度坐标系(BD−09),确保与百度地图 API 接口兼容.最终爬取 2017 年、2019 年与 2021 年 7~9 月(植被茂盛期)有效街景采样点如图 1(c).

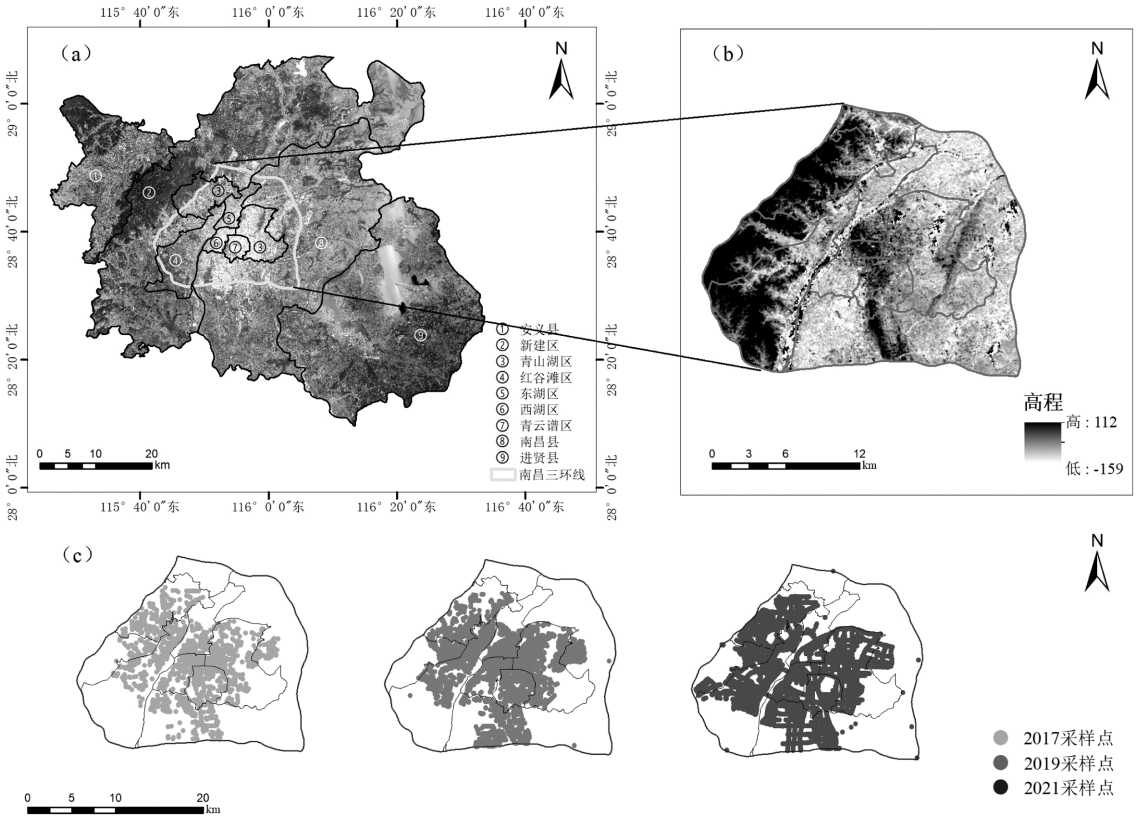


图 1　研究区及采样点分布((a)、(b)为研究区概况,(c)分别为 2017 年、2019 年和 2021 年采样点分布)

Fig.1　The Study Area and Sampling Sites Distribution.((a)and(b)illustrate the geographic overview of the study area, (c) shows the spatial distribution of sampling sites in 2017, 2019 and 2021, respectively)

1.2　数据来源及处理

遥感影像数据:使用 2017 年、2019 年和 2021 年 7~9 月云量小于 10%且天气晴朗的 Landsat−8OL1/TIRS 陆地卫星遥感影像(条带号 121,行编号 040)进行 LST 反演,反演精度为 30m.LST 结果精度验证数据 MOD11A1 来自 NASA 官网,空间分辨率为 1km,该数据精度较高,因此作为验证数据使用[29].

建成区数据采用 Li 等[30]以全球高分辨率(30 米)人造不透水面数据为基础,借助谷歌地球引擎(Google Earth Engine)平台进行开发的城市边界数据集.

街景图像(Street View Image,SVI)为开源百度街景数据,设置图像分辨率为 2048×664,水平方向 360°、垂直视角 180°,通过百度地图应用程序接口(API)按经纬度爬取,以经纬度坐标命名并存储.最终获得 2017 年、2019 年和 2021 年 7~9 月有效采样点街景图像 6950 张、11785 张和 29974 张,涵盖三环内主要交通干线.对爬取到的街景图像在使用前均进行一致性检查,确保尺寸大小一致和无过度曝光,以确保输入的数据质量.

土地利用数据选择了哨兵 Sentinel−2 的 10m 分辨率卫星数据,用于识别水体、林地、耕地和建成区等主要土地覆被类型,辅助分析 LST 变化;南昌市道路网络矢量数据来源于开放街道地图(Open Street

Map,OSM);水系矢量来源于中国科学院地球大数据科学数据中心[31],用于剔除水域像元.如表 1

表 1 数据来源

Table 1 Data source

数据	来源
Landsat 8 遥感数据	美国 USGS 官网(https://www.usgs.gov/)
MOD11A1 数据集	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/
百度街景全景图像	https://lbsyun.baidu.com/faq/api?title=webapi
南昌市道路网络	开放街道地图 (https://www.openstreetmap.org/)
南昌市水系矢量	https://data.casearth.cn/dataset/
南昌市建成区数据	http://data.ess.tsinghua.edu.cn/
土地利用数据	https://livingatlas.arcgis.com/landcoverexplorer/#mapCenter=113.39450%2C28.54727%2C5.13945568 5108976&mode=step&timeExtent=2017%2C2023 &year=2023&downloadMode=true

2 研究方法

2.1 多尺度网格划分

为探究 GVI 与 LST 的多尺度影响,本研究采用渔网法对研究区进行系统网格划分,相较于传统统计单元(如行政区),矢量网格单元通过规则化的空间分割,能够有效平衡地理边界明确性与空间分辨率灵活性,更适用于点状分布数据的聚合分析.本文参考相关研究[32-33]并结合景观生态学中“粒度效应”理论[34],利用 ArcGIS 渔网工具,创建了多个尺度网格,初始设定尺度为 2000m、1000m 和 500m 尺度,随后根据 GWR 拟合效果逐步细划网格,最终生成一组嵌套网格:2000m×2000m、600m×600m、500m×500m、400m×400m,用以研究不同格网尺度下 GVI 对 LST 的影响及最佳研究尺度确定.

考虑到 GVI 采样点分布不均的问题,定义网格点密度阈值以筛选有效分析单元.点密度计算公式为:

$$D_i=N_i/\mathrm{Count}_i \quad (1)$$

式中:D_i 表示 ID 为 i 的格网点密度,N_i 表示格网 i 内绿视率采样点数,Count_i 表示第 i 个格网面积.

此外,根据遥感数据和街景图片发现,河流湖泊等水体表面无植被覆盖,采样点较少,GVI 数值偏小,且水体周围会产生明显的冷岛效应[35-36],LST 数值偏小.因此,为消除 GVI 值较低且 LST 较低的干扰区域,本文根据中国科学院地球大数据科学数据中心发布的水系矢量图和遥感影像,识别并剔除覆盖水体的网格单元,定义剩余网格为最终研究网格单元.对于筛选后的每个格网,计算其内部所有采样点的 GVI 均值和 LST 均值.

2.2 基于语义分割的 GVI 计算

为量化三维可视绿量,本研究基于 ADE_20K 数据集构建适配南昌市植被特征的语义分割模型[37],所采用的 DeepLabv 3 模型是研究学者们公认具有较高精度的语义分割模型,且常用于数据时空分析和环境特征分析[28],其空洞卷积模块可有效识别街景图像中零散分布的植被.本研究随机提取了分割样本中的 30 张图像进行人工目视分割,精度分割线性相关显示 r>0.9,精度足满足实验需求.

采用收集到的百度街景全景图像作为数据源,定义数据集中树、草、山峰、植物群落、花、山丘、花盆为绿色视觉元素,计算这些元素面积之和占整个视野面积的比例(图 2),即为该点的 GVI 值.

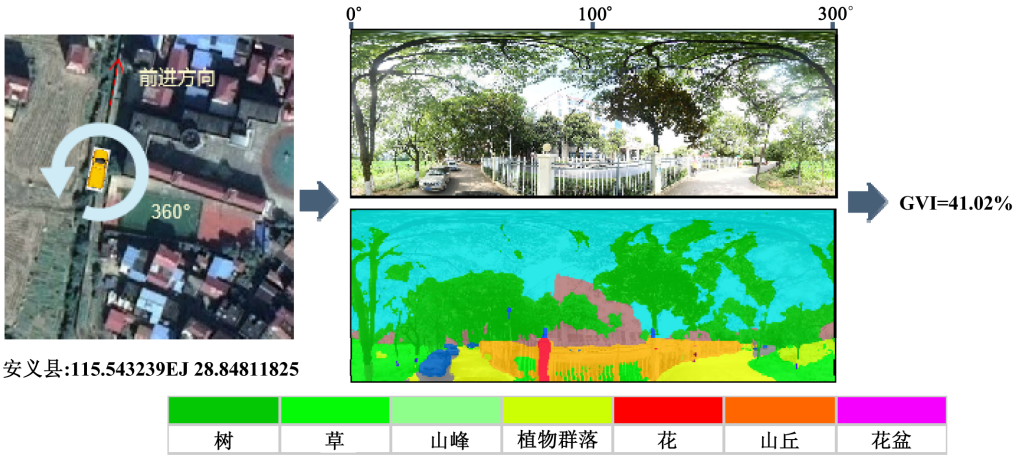


图 2 绿色视觉元素计算绿视率

Fig.2 Green view index (GVI) calculation

$$GVI=\frac{N_g}{N_{总}}\times 100\% \tag{2}$$

式中:N_g 表示从图像中提取的绿化要素所占的像素,$N_{总}$表示图像总像素,为定值.

2.3　LST 反演

2.3.1　单窗算法　基于 GEE 平台,采用单窗算法,通过 Band10 反演 LST[38-40].如式(3):

$$T_s=\{a(1-C-D)+[b(1-C-D)+C+D]T_{10}-DT_a\}/C \tag{3}$$

式中:T_s 代表地表温度(K);a、b 为常量,经调整后取值−67.35535 和 0.458608;T_{10} 表示卫星传感器探测到的像元亮度温度;C 和 D 为中间变量;T_a 表示大气平均作用温度(K).

2.3.2　LST 强度分级　采用 Min-Max 归一化方法对三期 LST 反演数据进行归一化处理,以三期数据的最大、最小值为统一归一化参数,根据前人研究,划分不同强度等级[41],见表 2.

表 2　LST 强度等级分类

Table 2　Classification of LST intensity levels

LST 强度等级	归一化范围
高温	0.65~1
次高温	0.55~0.65
中温	0.45~0.55
次中温	0.4~0.45
低温	0~0.4

2.4　城市热岛强度计算

表 3　热岛效应强度等级分类

Table 3　Classification of urban heat island intensity levels

热岛强度	强度范围
无热岛	UHI≤1
弱热岛	1<UHI≤2
中等热岛	2<UHI≤3
强热岛	3<UHI≤4
极强热岛	UHI≤4

本研究采用城乡二分法构建热岛强度模型,以非建成区作为乡村背景,依据叶彩华等[42]提出的 UHI 指标计算城乡温差,评估城市热岛效应强度,如式(4)[43]:

$$UHI_i=LST_i-\frac{\sum_i^n LST_r}{n} \tag{4}$$

式中:UHI_i 是象元 i 所对应的热岛强度,℃;LST_i 是象元 i 的地表温度,℃;n 为乡村背景内的有效象元数;LST_r 为乡村像元 r 的地表温度(℃).根据已有研究[44],将热岛强度分为五类,这有助于揭示城市内部不同区域的城乡温度差异,如表 3.

2.5　地理加权回归分析(GWR)

本研究通过 GWR[45],分析不同格网尺度下变量的时空关系,该模型用 R^2 反映变量之间的拟合度,R^2 越大,表示 GVI 对 LST 的影响越显著[46],如公式 5

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{k=1}^{n}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}+\varepsilon_i \tag{5}$$

式中:y_i 为 $n\times 1$ 维解释变量;x_{ik} 为 $n\times k$ 维解释变量矩阵;(u_i,v_i)为第 i 个观测点的空间位置坐标;$\beta_k(u_i,v_i)x_{ik}$ 为影响因素 k 在回归点 i 的回归系数;ε_i 为独立分布的随机误差项,服从正态分布.

2.6　冷热点分析

冷热点分析可以展现高值或低值要素在空间上发生聚类的位置.本文引入冷热点分析识别 2017 年、2019 年和 2021 年 GVI 聚集的热点和冷点区域[47-48].计算公式如下[49]:

$$G_i^*=\frac{\sum_{i=1}^{n}w_{ij}x_j}{\sum_{i=1}^{n}x_j} \tag{6}$$

$$ZG_i^*=\frac{G_i^*-EG_i^*}{\sqrt{\mathrm{VARG}_i^*}} \tag{7}$$

式中:G_i^* 表示局部相关性指数;x_j 表示空间单元 j 的属性值;w_{ij} 表示空间权重;EG_i^* 和 VARG_i^* 分别表示 G_i^* 的数学期望和变异系数.

3　结果与分析

3.1　南昌市三环内 GVI 时空格局

本文创建了不同尺度网格,现基于 500m×500m 网格尺度对三期 GVI 数据进行空间分布特征分析(图 2).从空间分布来看,2017 年三环内赣江东岸整体 GVI 水平高于西岸,极低和较低 GVI 等级主要分布在西湖区、青云谱区和青山湖东区交界处.2019 年三环内 GVI 空间分布相对均衡,各 GVI 等级均匀分布,其中新建区、青山湖西区和红谷滩区交界处 GVI 水平显著下降.至 2021 年,GVI 空间格局变化明显,中等和较低 GVI 等级区域向周边扩散,整体 GVI 降低.

将 2017 年、2019 年和 2021 年的公共网格进行相交统计,结果显示,2017~2019 年,GVI 提升的地域面积占总采集面积的 42.1%,降低区域面积占

57.9%;2019~2021 年,GVI 提升的地域面积占总采集面积的 44.4%,降低区域面积 55.6%;2017~2019 年,GVI 提升的地域面积占总采集面积的 39.1%,降低区域面积 60.9%.且 2017~2021 年,极低、较高和极高 GVI 等级区域占比分别减少了 2.4%、8.8%和 16.2%;中等和较低 GVI 等级区域占比分别增加了 13.4%和 14.0%,表明 GVI 分布的两极化有所缓解.总体来看,尽管局部地区 GVI 有所改善,但南昌市整体的 GVI 水平呈现出下降的趋势,印证了城市化进程中绿地流失的整体态势.



图 3 南昌市绿视率等级分布

Fig.3 Distribution map of green view index levels in Nanchang

(a)、(b)、(c)为南昌市三环内 2017 年、2019 年和 2021 年南昌市绿视率等级分布图

冷热点分析进一步揭示了 GVI 的空间集聚特征,分析结果显示(图 4),南昌市三环线内,2017 年、2019 年和 2021 年的 GVI 分布呈现明显的空间聚集性,且集聚特征依次增强.基于热点分析原理,极显著热点表征绿化优势区域,极显著冷点指示绿化薄弱区域.2017 年,极显著热点(99%置信度)占比 31.6%,零星分布在青山湖西区南部、青山湖东区和东湖区交界处,南昌县近西湖区、青山湖东区地带;而极显著冷点(99%置信度)占比 36.2%,大量分布在三环线内中心区域.2019 年,极显著热点占比 22.8%,集中分布于东湖区东南部、青山湖东区北部和南昌县,形成孤立的绿化优势核心;而极显著冷点占比 47.1%,在红谷滩区、西湖区、青云谱区和青山湖区南部连片分布,构成中心城区偏南的绿化薄弱带.2021 年,绿化格局发生结构性转变,极显著热点占比增至 41.1%,主要聚集在三环线内北部(东湖区、青山湖区、新建区及红谷滩北部),呈现扩散模式;极显著冷点占下降至 41.0%,在红谷滩区南部、西湖区及青山湖东区南部连片分布.此外,未通过 90%置信水平检验的区域被定义为非显著区域.

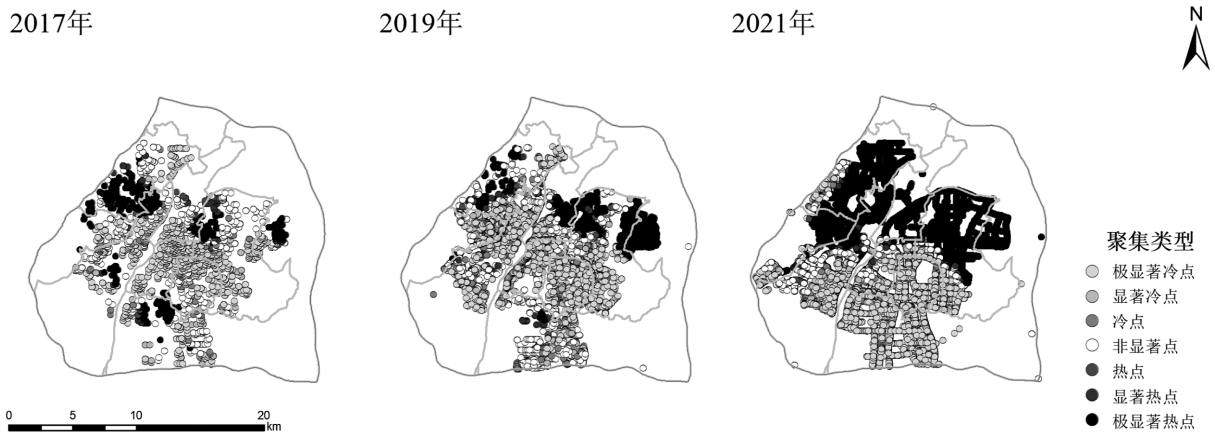


图 4 南昌市三环线内 GVI 热点分析

Fig.4 Hotspot analysis map of green view index (GVI)within the third-ring road area of Nanchang

综合分析表明,2017~2021 年,南昌市三环内中心城区西北部原先孤立存在的小规模高 GVI 区域逐渐连成一片,形成持续绿化优势带,南边绿化薄弱,连片分布,且局部 GVI 有所提升.

3.2　南昌市 LST 时空格局

3.2.1　LST 时空分布　基于 GEE 反演的南昌市三环内 2017 年、2019 年和 2021 年 7~9 月 LST 空间格局显示(图 5),2017 年赣江东岸 LST 明显高于西岸,高温和次高温区域主要分布在青云谱区中心和南昌县近核心城区地带,面积总占比为 6.5%;低温和次低温区域则大面积分布在非建成区,如九龙湖、耕地等区域,面积占比 67.5%.2019 年 LST 高温及次高温区域进一步扩张,面积占比分别为 2.4%和 16.0%,覆盖红谷滩区、青云谱区、青山湖东区和南昌县近核心区;而低温和次低温区则围绕森林公园、鄱阳湖及赣江支流水系形成的连续冷岛,面积占比分别为 33.3%和 15.5%.至 2021 年,高温区空间格局发生显著变化,高温及次高温区快速蔓延,连接成片,面积占比达到 25.0%,几乎覆盖整个青云谱区和青山湖东区,南昌县近核心城区 LST 也显著升高;低温和次低温区域减少,呈圈层分布在三环最外层,面积占比为 42.5%,表明高温区连片扩展,LST 升温趋势加剧.综合来看,2017~2021 年,LST 呈现“持续升高”状态,且连片形成“中心高、外围低”的圈层结构.

热岛强度等级划分进一步揭示了城市化进程对热环境的胁迫效应(图 5),2017 年,南昌市三环内强热岛(UHI>3)以上区域面积占比 46.0%,集中连片在赣江东岸的建成区和红谷滩区;无热岛区域面积占比 38.7%,主要分布在三环外围自然区域.2019 年,南昌市热岛强度加剧,原先零星分布的高强热岛(UHI>3)区域集中连片扩散,面积占比为 53.4%.而无热岛区域(UHI≤1)则与梅岭森林、大型水体空间分布高度耦合,占比 33.6%.至 2021 年,热岛中心向东岸蔓延,几乎完全覆盖整个中心城区核心[50].强热岛(UHI>3)以上区域面积为 50.8%,无热岛区域(UHI≤1)占比也增至 35.6%.总体而言,2017−2021 年,南昌市三环内 LST 整体持续升高,城市热岛效应先增后减,但总体波动较小.且外围自然区域 LST 升温相对缓慢,热岛效应相对稳定,呈现“核心加剧−外围稳定”的空间分异现象,这一分异模式,凸显了高密度建成区生态空间挤占与自然本底保留区的热调节能力差异.

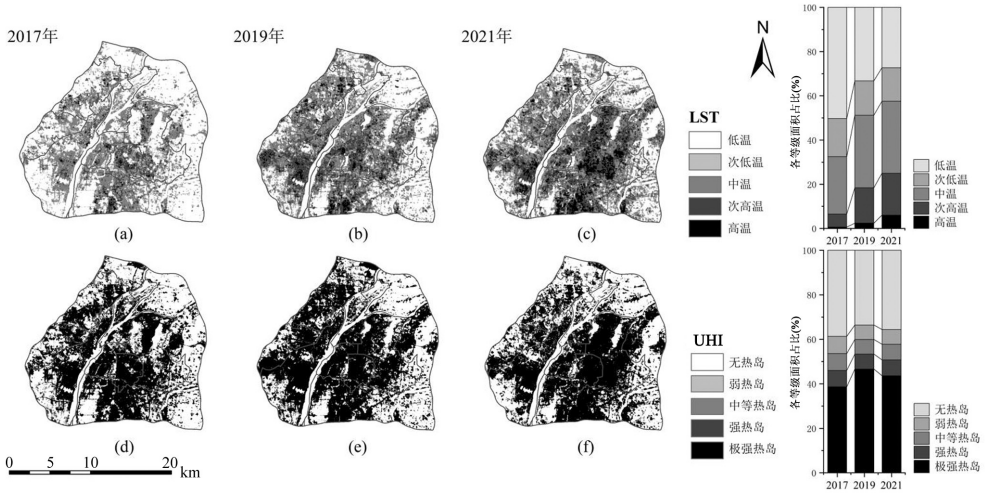


图 5　南昌市三环内 LST 及热岛强度等级空间分布(附面积占比柱状图)

Fig.5　Spatial distribution of LST and urban heat island intensity levels within the third−ring road area of Nanchang (with bar charts of area proportions)

(a)、(b)、(c)为 2017 年、2019 年和 2021 年的 LST 强度空间分布图,(d、(e)、(f)为 2017 年、2019 年和 2021 年的热岛强度空间分布图,右侧柱状图则表示了各级温度和热岛强度面积占比的变化情况

为进一步揭示南昌市三环内 LST 空间分异性的驱动机制,本研究基于东西和南北剖面线(图 6)提取 2017 年、2019 年和 2021 年的土地利用数据,开展温度−覆盖耦合分析,实现不同土地利用类型和 LST 变化的一一对应分析.

2017 年东西剖面自西向东结果显示:①为远郊复

杂地类区域,以非建筑区为主,整体 LST 较低,不同地类间分布复杂,LST 变化剧烈,林地降温效应强于耕地.②为赣江西岸高密度建成区,LST 显著上升,其间因林地等降温效应,LST 降低形成波谷.③为前湖公园,⑤为赣江,其明显的冷岛效应导致该段LST骤降,且降温幅度大于林地.④为两片水域间的建筑区,LST 急剧升高.⑥为赣江东岸建筑区,其间复杂的建筑密度和绿化建设导致LST起伏剧烈,水域和耕地处产生明显波谷.⑦为远郊地区,建筑面积较低,整体LST小于核心建成区.2019 年与 2021 年东西剖面温度趋势总体与 2017 年一致,LST 波动与地类高度匹配,且两极间温差罗达,波峰峰值升高,表明 LST 显著升高.

2017 年南北剖面自北向南结果显示:①为远郊地类丰富区域,LST 显著小于三环线中心区域.②为建筑区,与东西剖面相似,因其间林地的降温效应,LST 降低形成波谷.③为赣江河谷区域,水域和耕地存在明显降温效应,建筑区 LST 升高形成波峰.④为近青山湖风景区范围,与东西剖面相似,其明显的冷岛效应导致 LST 骤降,建筑区范围呈现明显波峰.⑤为赣江东岸建筑区,其间复杂的建筑密度和绿化建设导致 LST 起伏剧烈,受地类变化影响显著.⑥为青云水库段,LST 骤降,典型冷岛效应.⑦为远郊地区,建筑区密度差异大,LST 起伏剧烈.2019 年和 2021 年 LST 波动趋势与 2017 年相似,不同的是,南北剖面①段波峰波谷两极化明显,表明该段 LST 剧增.

整体来看,2017 年、2019 年和 2021 年的同一条剖面上(地类相似),LST 曲线形态相似,验证了地类结构对 LST 的稳定影响.林地、耕地和水域均表现出降温效应,其中水域降温作用最显著,且建筑区 LST 值显著高于其他地类.时间变化来看,波峰逐年升高,波谷逐年抬高,反映出三环线范围自然基地压缩,降温功能减弱.

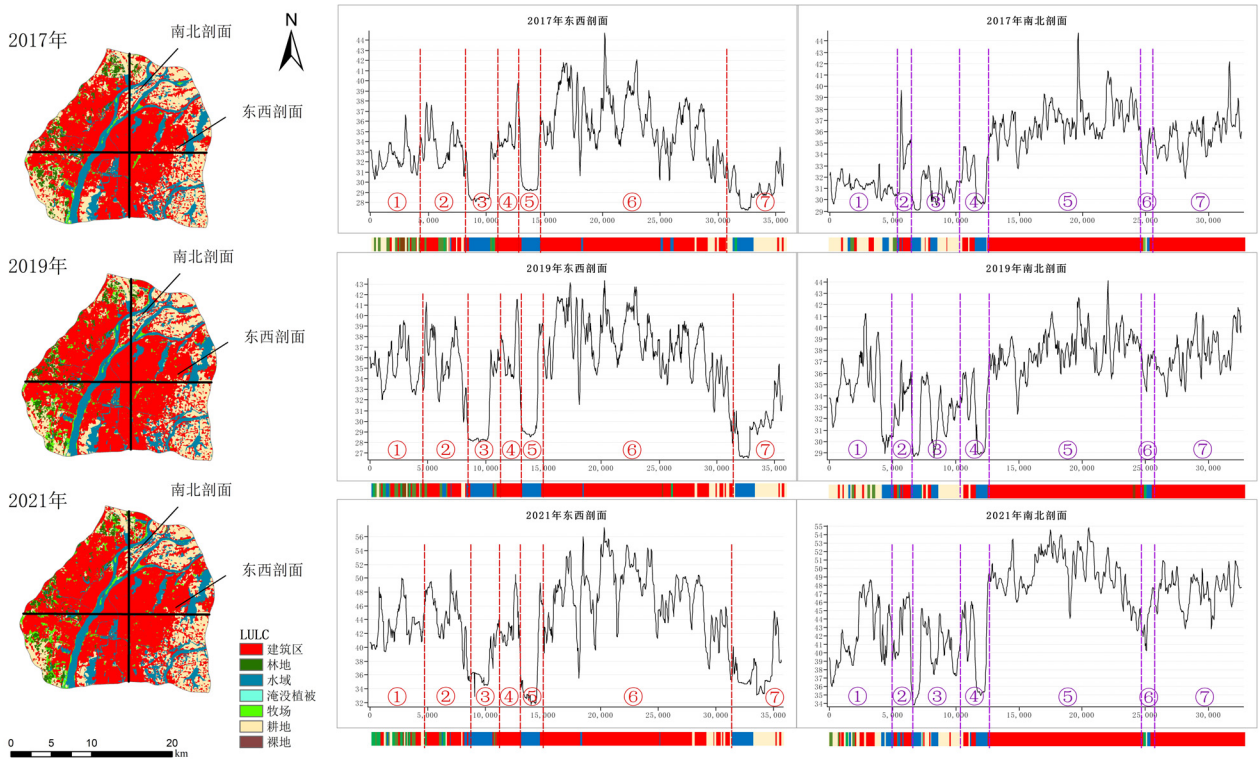


图 6 南昌市三环内 LST-覆被剖面分析

Fig.6 Profile analysis of Land Surface Temperature andland cover along cross-sectionswithin the third-ring road area of Nanchang

3.2.2 LST 反演结果验证 为了验证本研究反演的 LST 精度,选用 MOD11A1 地表温度每日产品(1km 分辨率)对其进行精度验证.首先利用双线性插值法对反演得到的 30m 分辨率 LST 数据重采样至 1km,以保证空间分辨率一致.随后提取 2017 年、2019 年和 2021 年各 1000 个随机点,剔除无效值和异常值后,进行 Pearson 相关分析.结果见表 4,2017 年、2019 年和 2021 年的相关系数 r 分别为 0.799,

0.8,36 和 0.880,且 P 均<0.01,表明三组数据之间为显著正相关.线性拟合如图 5,2017 年、2019 年和 2021 年 R^2分别为 0.64、0.70 和 0.76.结果证明本研究反演 LST 结果与 MODIS 数据呈显著正相关关系,线性拟合效果良好,本研究所反演的 LST 精度满足实验需求.

表 4　Pearson 相关性分析结果

Table 4　Results of Pearson Correlation Analysis

年份	r	P	样点数
2017	0.799**	<0.01	986
2019	0.836**	<0.01	1000
2021	0.880**	<0.01	987

** 在0.01级别(双尾),相关性显著.

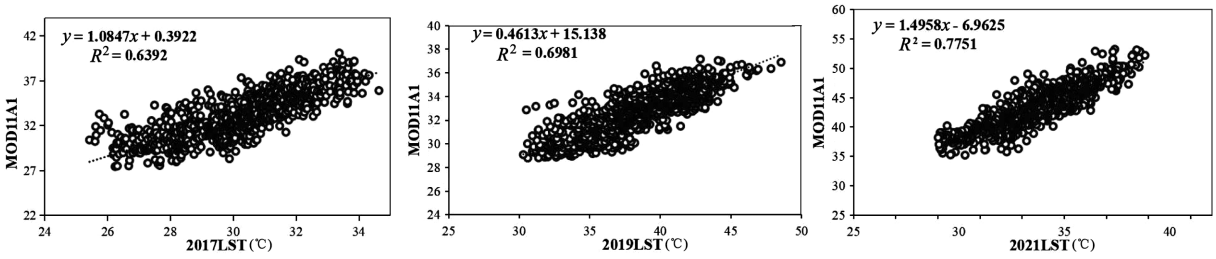


图 7　反演数据精度验证

Fig.7　Accuracy validation of retrieved LST

图中(1)、(2)、(3)分别为 2017 年、2019 年和 2021 年精度验证散点图

3.3　GVI 和 LST 关系

3.3.1　GVI 与 LST 相关性分析　为了初步探究 GVI 与 LST 之间的关联性,本研究基于南昌市三环内 2017 年、2019 年和 2021 年的 GVI 采样点,分别随机抽取了 1000 个样本进行 Pearson 相关分析(表 5),经数据清洗后分别保留有效样本 1000 个(2017 年)、999 个(2019 年)和 1000 个(2021 年).结果显示,GVI 与 LST 在三期数据中均呈现显著负相关(2017 年:r=−0.374,P<0.01;2019 年:r=−0.340,P<0.01;2021 年:r=−0.181,P<0.01),表明 GVI 值较高的区域通常对应较低的 LST 值,验证了 GVI 对 LST 的降温作用.此外,2017 年 GVI−LST 相关性强度(|r|=0.374)显著高于 2019 年(|r|=0.340)和 2021 年(|r|=0.181),表明与 2017 年相比,2017 年至 2021 年的城市化进程削弱了 GVI 的降温效能.

表 5　Pearson 相关性分析结果

Table 5　Results of Pearson Correlation Analysis

年份	r	P	样点数
2017	−0.374**	<0.01	1000
2019	−0.340**	<0.01	999
2021	−0.181**	<0.01	1000

** 在0.01级别(双尾),相关性显著.

3.3.2　GVI 对 LST 影响的空间异质性分析　基于 GWR 模型的多尺度网格分析结果表明,南昌市三环内 GVI 对 LST 的调控作用存在显著的空间非平稳性(GVI 对 LST 的影响随空间位置变化而波动)和尺度依赖性指(图 8).从时间维度看,2017~2021 年间,不同网格尺度下 GVI 与 LST 的相关系数(R^2)呈动态演变.在 2000m×2000m 大尺度下,R^2均值为 0.52、0.30 和 0.34(2017 年、2019 年和 2021 年),高值格网由三环中心向赣江西岸迁移后向赣江东岸扩散.当尺度继续细划,600m×600m 尺度下,R^2 均值为 0.56、0.64 和 0.53(2017 年、2019 年和 2021 年),高值网格由三环中心向外扩散.至 500m×500m 时,模型拟合度达到峰值,R^2均值分别为 0.58、0.75 和 0.70(2017 年、2019 年和 2021 年),高值区向四周扩散,至 2021 年,广泛分布于青山湖区、红谷滩区、西湖区、青云谱区及南昌县,表明该尺度既能有效捕捉南昌市三环内高密度植被的遮阴降温效应,又可解析远郊自然植被的热调节贡献,从而在宏观与局部尺度间取得最优拟合.400m× 400m 网格尺度时,R^2 值显著下降,分别为 0.57、0.20、0.11(2017 年、2019 年和 2021 年),高值网格集中分布在三环中心区域,但模型稳定性较低.

综上所述,无论是 2017 年、2019 年或 2021 年,相同尺度下 GVI 对 LST 的影响相似;随着尺度减小,GVI 对 LST 影响的显著性有所增强,在 500m×500m 尺度下,R^2 为最高值;但当尺度继续减小时,R^2 也相应减小,表明 500m×500m 尺度是南昌市三环内 GVI 对 LST 影响最显著的尺度.在该尺度下,既能够捕捉到足够详细的局部变化,又能避免过小尺度带

来的干扰,因此 500m×500m 被认为是南昌市内探索 GVI 对 LST 影响的最佳网络尺度.

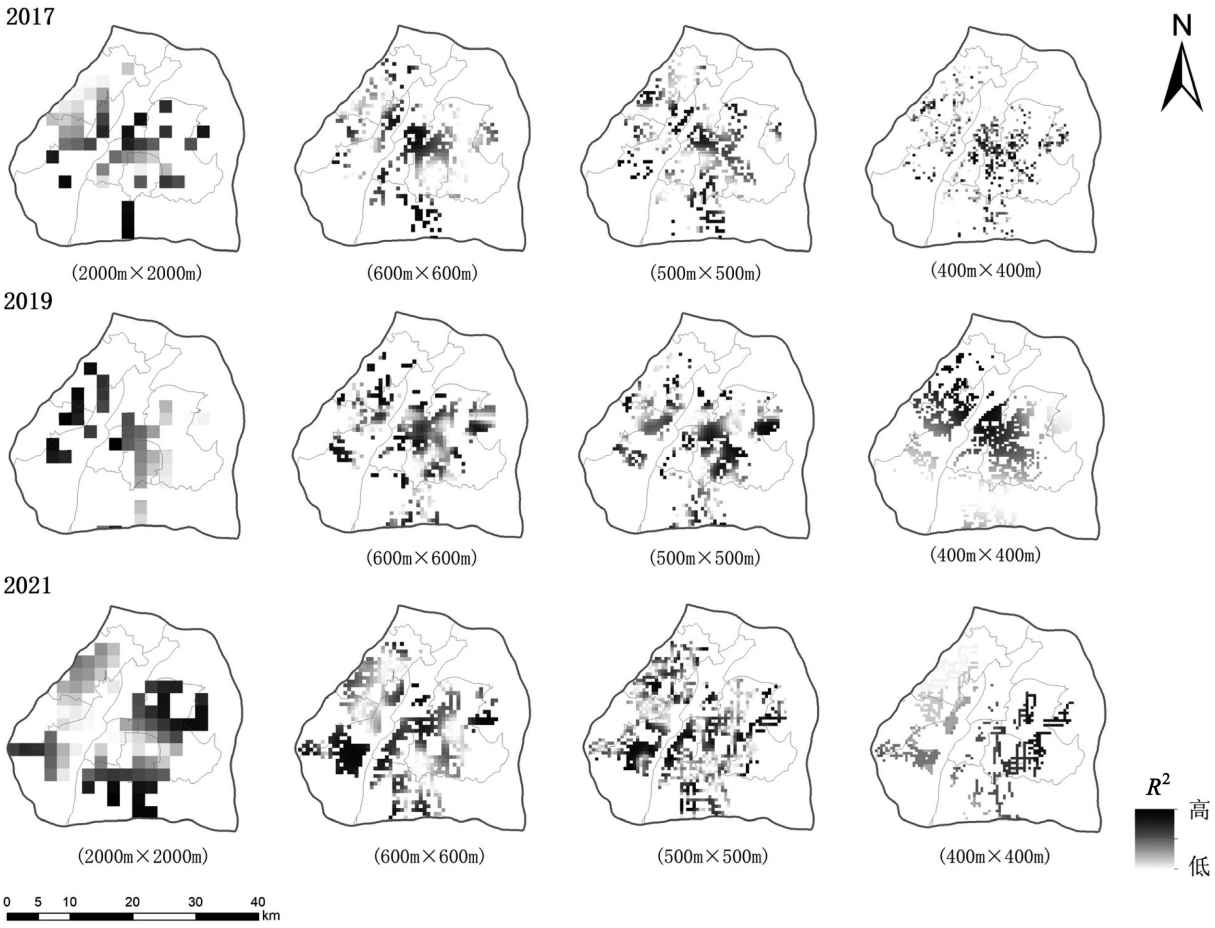


图 8 2017 年、2019 年和 2021 年南昌市三环内不同尺度的 GWR 结果

Fig.8 Results of geographically weighted regression (GWR) at different scales within the third-ring road area of Nanchang in 2017, 2019 and 2021, respectively

4 讨论

4.1 GVI 时空变化及成因分析

研究发现,2017~2021 年间,尽管局部区域(中心城区北部)因政策驱动(《南昌市城市绿化管理规定(2019 修订)》[51])形成持续绿化优势带,但整体 GVI 仍呈下降趋势(60.9%区域 GVI 下降).首先,GVI 作为基于视觉的三维绿量指标,依赖于成熟植被的绿化成效,而绿化建设存在滞后性[52],难以在短期内通过 GVI 反映生态建设效果;其次,城市建成区的持续扩张会挤压绿地空间,尤其是高密度开发区,导致植被空间占用或破碎化,中心城区绿地退化难以避免[53].这一趋势与 Qiao 等[54]对中国大城市“增量扩张-生态挤压”矛盾的观察一致.

4.2 LST 时空变化及驱动分析

LST 反演结果表明,2017~2021 年间,三环内热岛效应显著增强,高温区由点到面、由局部到整体显著扩张,总体 LST 上升.这一趋势表明了南昌市三环内在城市化过程中城市热环境异常:核心建成区因不透水表面占比增加与绿地破碎化导致高温区域扩张.此外,尽管研究区整体热岛效应加剧,但部分地区由于自然冷源(梅岭、赣江水域)通过蒸腾与蒸发作用抑制了热岛蔓延[35-36],这一结果印证了 Zhao[55]等提出的“自然冷源规模化效应”理论,即连续蓝绿空间可通过降低边界层热通量,缓解城市热力学失衡.

4.3 GVI 对 LST 的多尺度影响分析

与传统二维绿地指标相比,GVI 的三维属性更灵敏地反映了人类活动密集区的热调节潜力[23-24],例如街道绿化遮阴对行人热舒适的改善.同时,本研究采用点密度筛选与规则化网格控制方法,剔除

GVI 样点稀疏区域,仅保留结构稳定、样本充足的网格单元进行分析,以提高样本代表性,对结果的不确定性加以控制.

研究结果表明,GVI 与 LST 呈显著负相关关系,具有空间非平稳性和尺度依赖性.南昌市三环线内 500m×500m 尺度下 GWR 相关系数最大(R^2 为 0.58、0.74、0.65).表明该尺度下二者拟合效果最优,GVI 对 LST 的调节作用最显著,是三环内研究 GVI 对 LST 影响的最优分析网格尺度.这一结果不仅与实验预期(GVI 具有温控效能)相符,与国内外已有研究也形成共证;例如,北京的景观要素与 LST 研究中发现,绿地与 LST 呈负相关关系[56-57];罗赛薇等[32]的提出南昌市绿地最佳研究网格尺度结论与之相似.

4.4　政策建议

基于上述讨论,本研究提出差异化绿地布局策略,即南昌市三环内采用 500m 网格识别小微绿地节点,优先实施立体绿化(如屋顶花园、垂直绿墙)与街道乔木遮阴,通过三维绿量提升缓解热岛集聚效应;同时串联梅岭森林公园、城市湿地等冷源节点,与《南昌市国土空间总体规划(2021−2035)》中“蓝绿交织”的愿景形成政策协同[46,50].此外,热缓解政策制定需关注 GVI−LST 关系的空间非平稳性,差异化配置绿地资源.

5　结论

本研究利用语义分割技术计算 GVI,基于 GEE 平台反演了 2017 年、2019 年和 2021 年 7~9 月南昌市的 LST.采用热点分析、剖面分析和 GWR 模型,分析了南昌市三环内 GVI 及 LST 的时空演变特征及其多尺度关系,得出以下主要结论.

5.1　2017~2021 年间,南昌市 GVI 整体呈下降趋势,其中 60.9%的区域 GVI 降低,但局部 GVI 提升并形成持续绿化优势带,极显著热点占比由 31.6%增至 41.1%.

5.2　2017~2021 年间,南昌市三环内 LST 急剧升高,热岛效应加剧;高温及次高温区域占比从 6.5%升至 25.0%,而低温和次低温区域面积占比从 67.5%降至 42.5%.此外,城市中的“蓝绿空间”,如梅岭、青山湖等区域的局部降温作用突出.

5.3　GVI 对 LST 的影响存在表现出显著空间非平稳性和尺度依赖性,在 500m×500m 尺度下,GWR 模型拟合度最高(R^2 为 0.58、0.65、0.70),GVI 调节 LST 的能力最强.500m×500m 网格尺度为三环线内,研究 GVI 对 LST 的影响的最佳尺度.

参考文献:

[1] WMO. The State of the Global Climate 2023 report [R/OL]. (2024−03−19) [2024−11−01]. https://wmo.int/publication−series/state−of−global−climate−2023.

[2] Kim S W, Brown R D. Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review [J]. Science of The Total Environment, 2021,779(1):146389.

[3] Bartholy J, Pongrácz R. A brief review of health−related issues occurring in urban areas related to global warming of 1.5℃ [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2018,30:123−132.

[4] 周宏轩,濮宏桐,崔璐璐,等.基于视觉指数的城市热环境效应——以徐州市为例 [J]. 应用生态学报, 2022,33(8):2213−2220.
Zhou H X, Pu H T, Cui L L, et al. Urban thermal environment effects based on visual indices: A case study in Xuzhou City, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(8):2213−2220.

[5] Sun X, Tan X, Chen K, et al. Quantifying landscape−metrics impacts on urban green−spaces and water−bodies cooling effect: The study of Nanjing, China [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020,55: 126838.

[6] Xiao XD, Li D, Yan HN, et al. The influence of the spatial characteristics of urban green space on the urban heat island effect in Suzhou Industrial Park [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 40:428−439.

[7] 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(4):41−45.
Xie J F, Cong R C, Wang Y R, et al. Spatiotemporal characteristics of surface temperature and greening role in Tongzhou District, Beijing [J]. Chinese Landscape Architecture, 2021,37(4):41−45.

[8] 焦　敏,周伟奇,钱雨果,等.斑块面积对城市绿地降温效应的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2021,41(23):9154−9163.
Jiao M, Zhou W Q, Qian Y G, et al. Influences of patch size on the cooling capacity of urban greenspace: progresses, problems and perspectives [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(23):9154−9163.

[9] 陈　明,戴　菲.基于形态学空间格局分析的城市绿地对热环境的影响研究 [J]. 生态环境学报, 2021,30(1):125−134.
Chen M, Dai F. The influence of urban green spaces on thermal environment based on morphological spatial pattern analysis [J]. Ecology and Environment Sciences, 2021,30(1):125−134.

[10] 张昌顺,谢高地,鲁春霞,等.北京城市绿地对热岛效应的缓解作用 [J]. 资源科学, 2015,37(6):1156−1165.
Zhang C F, Xie G D, Lu C X, et al. The mitigating effects of different urban green lands on the heat island effect in Beijing [J]. Resources Science, 2015,37(6):1156−1165.

[11] 胡风宁,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, 2023,43(11):4445−4460.
Hu F N, Zhou L. Cooling effect of urban green infrastructure and its impacting factors: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(11): 4445−4460.

[12] Liu X L, Yang Y B, Cao L J, et al. Research on the Influence of Urban Green Space Distribution on the Thermal Environment based on RS

and CFD Simulation [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016,31(6).

[13] Yan Y, Jian W, Wang B, et al. Multi-scale effects of LCZ and urban green infrastructure on diurnal land surface temperature dynamics [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,117:105945.

[14] 苏王新,张刘宽,常 青.基于最优粒度的城市热环境与景观特征耦合分析 [J]. 中国环境科学, 2022,42(2):954-961.
Su W X, Zhang L K, Chang Q. Coupling analysis of urban thermal environment and landscape characteristics based on optimal granularity [J]. China Environmental Science, 2022,42(2):954-961.

[15] 王世豪,孙朝阳,黄 麟,等.城市绿地景观结构对夏季城市热环境的影响 [J/OL]. 生态学报, 2024,(24):1-14[2025-01-02].
Wang A H, Sun Z Y, Huang L, et al. Impacts of urban green spaces structure on summer urban thermal environment [J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2024,(24):1-14[2025-01-02].

[16] 高 翔,董贺轩.街道步行空间绿视率与步行愉悦度的关联研究——基于武汉多类型街道的实证比较 [J]. 西部人居环境学刊, 2023,38(2):52-59.
Gao X, Dong H X. A study on the relationship between green view and walking pleasure in street walking space: An empirical comparison based on multiple types of streets in Wuhan [J]. Journal ofHuman Settlements in West China, 2023,38(2):52-59.

[17] 刘 畅,王一婷,郭晓华,等.基于绿视率的武汉市绿地公平性评价 [J]. 应用生态学报, 2023,34(4):1083-1090.
Liu C, Wang Y T, Guo X H, et al. Equity evaluation of urban green space in the main urban area of Wuhan based on green view index [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023,34(4):1083-1090.

[18] Larkin A, Hystad P. Evaluating street view exposure measures of visible green space for health research [J]. Journal of exposure science & environmental epidemiology, 2019,29(4):447-456.

[19] Assessing street-level urban greenery using Google Street View and a modified green view index [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015,14(3):675-685.

[20] 李苗裔,杨忠豪,薛 峰.基于多源数据的城市街道绿化品质测度与规划设计提升策略——以福州主城区为例 [J]. 风景园林, 2021, 28(2):62-68.
Li M Y, Yang Z H, Xue F. Urban street greenery quality measurement, planning and design promotion strategies based on multi-source data: A case study of Fuzhou's main urban area [J]. Landscape Architecture, 2021,28(2):62-68.

[21] Zhang W, Zeng H. Spatial differentiation characteristics and influencing factors of the green view index in urban areas based on street view images: A case study of Futian District, Shenzhen, China [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2024,93:128219.

[22] 周宏轩,周凤林,崔璐璐,等.城市沿街人工和自然地表组成的热环境效应 [C]//中国城市规划学会.人民城市,规划赋能——2023 中国城市规划年会论文集(08 城市生态规划).中国矿业大学建筑与设计学院, 2023:119-128.
Zhou H X, Zhou F L, Cui L L, et al. Thermal environmental effects of artificial and natural surface compositions along urban streets [C]// Chinese Society for Urban Planning. People-Centred Cities, Planning Empowerment: Proceedings of the 2023 Annual Conference on Chinese Urban Planning (Volume 08: Urban Ecological Planning). School of Architecture and Design, China University of Mining and Technology, 2023:119-128.

[23] Zhou H, Tao G, Yan X, et al. Influences of greening and structures on urban thermal environments: A case study in Xuzhou City, China [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021,66:127386.

[24] 聂艳霞.基于视觉指数的城市热环境影响因素研究 [D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
Nie Y X. Study on the influencing factors of urban thermal environment based on visual index: A case study of Xuzhou City [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.

[25] 陈 亮.中国大城市蓝绿空间的冷岛效应研究 [D]. 武汉:中国科学院大学(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院), 2022.
Chen L. The cold island effect of blue-green space in China's big cities [D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences (Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS), 2022.

[26] 南昌市统计局.南昌市统计年鉴:2017 年 [M]. 北京:中国统计出版社, 2018:140.
Statistics Bureau of Nanchang. Nanchang statistical yearbook: 2017 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018:140.

[27] 南昌市统计局.南昌市统计年鉴:2021 年 [M]. 北京:中国统计出版社, 2022:118.
Statistics Bureau of Nanchang. Nanchang statistical yearbook: 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022:118.

[28] 王鸿雁,车向红,徐辛超,等.利用 DeepLabv3+模型提取分析街景图像绿视率——以北京三环内为例 [J]. 测绘通报, 2024,(3):88-94.
Wang H Y, Che X H, Xu X C, et al. Green visible index extraction and analysis of street view image using DeepLabv3+model: Taking within the Third Ring Road in Beijing as an example [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024,(3):88-94.

[29] Wan Z. M. and Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996,34(4):892-905.

[30] Li X, Gong P, Zhou Y, et al. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data [J]. Environmental Research Letters, 2020,15(9).DOI:10.1088/1748-9326/ab9be3.

[31] Chen X. 2000~2022 年中国河流水系变化矢量数据集 [Z]. 可持续发展大数据国际研究中心, 2024.
Chen Xi. Vector dataset of changes in China's river systems, 2000~2022 [Z]. International Research Centre for Big Data in Sustainable Development, 2024.

[32] 罗赛薇.南昌市城市绿地空间格局对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响研究 [D]. 南昌:江西农业大学, 2024.
Luo S W. Research on the spatial pattern of urban green spacein Nanchang City on the influence of $PM_{2.5}$ concentration [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2024.

[33] 王美雅,徐涵秋,付 伟,等.城市地表水体时空演变及其对热环境的影响 [J]. 地理科学, 2016,36(7):1099-1105.
Wang M Y, Xu H Q, Fu W, et al. Spatiotemporal variation of urban surface water and its influence on urban thermal environment [J]. Geographical Science, 2016,36(7):1099-1105.

[34] 洪 歌,吴雪飞,蔡锐鸿.最佳网格分析尺度下城市绿色基础设施的景观格局对碳汇绩效的影响研究 [J]. 中国园林, 2023,39(3):138-144.
Hong G, Wu X F, Cai R H. Influence of urban green infrastructure landscape pattern on carbon sequestration performance at the optimal grid unit [J]. Chinese Landscape Architecture, 2023,39(3):138-144.

[35] Wu J. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations [J]. Landscape Ecology, 2004,19:125−138.

[36] 杨朝斌,张　亭,胡长涛,等.蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素——以苏州市为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2021,30(3):677−688.
Yang C B, Zhang T, Hu C T, et al. Spatial−temporal characteristics of the cooling island for blue−green space and its driving factors in Suzhou, China [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2021,30(3):677−688.

[37] Semantic understanding of scenes through ADE20K dataset [Z]. Bolei Zhou et al. International Journal on Computer Vision, 2018.

[38] 覃志豪,Zhang MH, Arnon K,等.用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法 [J]. 地理学报, 2001,(4):456−466.
Tan Z H, Zhang M H, Arnon K, et al. Mono−window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM^6 data [J]. Acta Geographica Sinica, 2001,(4):456−466.

[39] Xiong Q, Hong Q, Chen W. Temporal and spatial response of ecological environmental quality to land use transfer in Nanling Mountain Region, China based on RSEI: A case study of Longnan City [J]. Land, 2024,13(5):675.

[40] 夏圣洁,陈慧儒,张钧韦,等.生态用地动态演变与热环境的空间自相关分析——以山西中部城市群为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1032−1040.
Xia S J, Chen H R, Zhang J W, et al. Spatial autocorrelation analysis of ecological land dynamic evolution and thermal environment: A case study of Shanxi central urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1032−1040.

[41] 黄曦涛,张　瑜.西安市城市热岛效应强度定量研究与应用 [J]. 测绘科学, 2021,46(9):144−149.
Huang X T, Zhang Y. Quantitative research and application of urban heat island effect intensity in Xi'an [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021,46(9):144−149.

[42] 叶彩华,刘勇洪,刘伟东,等.城市地表热环境遥感监测指标研究及应用 [J]. 气象科技, 2011,39(1):95−101.
Ye C H, Liu Y H, Liu W D, et al. Research on urban surface heat environment monitoring indexes and its application [J]. Meteorological Science and Technology, 2011,39(1):95−101.

[43] 刘勇洪,房小怡,张　硕,等.京津冀城市群热岛定量评估 [J]. 生态学报, 2017,37(17):5818−5835.
Liu Y H, Fang X Y, Zhang S, et al. Research on quantitative evaluations of heat islands for the Beijing−Tianjin−Hebei Urban Agglomeration [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(17):5818−5835.

[44] 刘宸瑄,王丽群,许　行,等.2001~2021 年中国植被覆盖对夏季城市热岛效应的影响 [J]. 生态学报, 2024,44(24):11020−11034.
Liu C X, Wang L Q, Xu X, et al. The impact of vegetation cover on summer urban heat island effect in China from 2001 to 2021 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(24):11020−11034.

[45] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 1996,28(4):281−298.

[46] 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.
Niu L, Zhang Z F, Peng Z, et al. China's surface urban heat island drivers and its spatial heterogeneity [J]. China Environmental Science, 2022,42(2):945−953.

[47] 许新元,牛　磊.百度街景和 GSENet 模型相结合的兰州市绿视率时空变化分析 [J]. 地球信息科学学报, 2025,27(4):994−1010.
Xu X Y, Niu L.Spatio−temporal analysis of the green view index in Lanzhou City using Baidu street view and GSENet Model integration [J]. Journal of Geo−Information Science, 2025,27(4):994−1010.

[48] 张　赫,张宇童,王　睿,等.多维度城市蔓延对碳排放影响的时空异质性 [J]. 中国环境科学, 2025,45(6):3496−3507.
Zhang H, Zhang Y T, Wang R, et al. The spatiotemporal heterogeneity of the impact of multidimensional urban sprawl on carbon emissions [J]. China Environmental Science, 2025,45(6):3496−3507.

[49] 李芸邑,刘利萍,刘元元.长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 [J]. 环境科学, 2021,42(8):3820−3828.
Li Y Y, Liu L P, Liu Y Y. Spatial distribution pattern and influencing factors of industrial pollution emissions in Yangtze River Economic Belt [J]. Environmental Science, 2021,42(8):3820−3828.

[50] 中国政府网.国务院关于《南昌市国土空间总体规划(2021—2035 年)》的批复 [EB/OL]. (2024−10−26) [2024−12−01]. https://www.gov.cn.
Chinese Government Website. State Council Approval of the Nanchang Territorial Spatial Master Plan (2021-2035) [EB/OL]. (2024−10−26) [2024−12−01]. https://www.gov.cn.

[51] 南昌市人民政府.南昌市城市绿化管理规定(2019 修订) [EB/OL]. (2020−10−27) [2025−01−20]. https://www.nc.gov.cn.
The People's Governmen of Nanchang Municipal. Nanchang urban greening management regulations (2019Revision) [EB/OL]. (2020−10−27) [2025−01−20]. https://www.nc.gov.cn.

[52] 王艳召,王泽根,王继燕,等.近 20 年中国不同季节植被变化及其对气候的瞬时与滞后响应 [J]. 地理与地理信息科学, 2020,36(4):33−40,76.
Wang Y Z, Wang Z G, Wang J Y, et al. Transient and lagged response of seasonal vegetation changes to climate in China during the past two decades [J]. Geography and Geo−information Science, 2020,36(4):33−40,76.

[53] 张任菲,肖　萌,刘志成.京津冀地区景观破碎化的时空异质性及驱动因素研究 [J]. 生态环境学报, 2025,34(3):461−473.
Zhang R F, Xiao M, Liu Z C. Spatio−temporal heterogeneity and driving factors of landscape fragmentation in Beijing−Tianjin−Hebei region [J]. Ecology and Environment Sciences, 2025,34(3):461−473.

[54] Qiao Z, Jia R, Liu J, et al. How do natural factor and human activity affect urban land surface heat environment in China? [J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2023,9:0126.DOI:10.34133/ehs.0126.

[55] Zhao L, Lee X, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands [J]. Nature, 2014,511(7508):216−219.DOI:10.1038/nature13462.

[56] Cao L, Hu H W, Meng X L, et al. Relationships between land surface temperature and key landscape elements in urban area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,30(10):2329−2334.DOI:10.1007/s12583−011−0162−0.

[57] 王宇白,白婷婷,徐　栋,等.基于系统时间序列的城市绿化冷却效应评估研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4859−4867.
Wang Y B, Bai T T, Xu D, et al. Evaluation of urban greening cooling effect based on Spatio−temporal series observation [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4859−4867.

作者简介：高蓓杰(2000−),女,陕西韩城人,东华理工大学硕士研究生,主要从事生态环境遥感研究.gbj5544@163.com.