文章编号:1000-5854(2026)05-0524-17

基于地理探测器的城市局地气候分区热岛强度因素研究

周溪松[1,2]，　张友水[1,2]，　黄庆洪[1,2]

(1.福建师范大学 地理科学学院、碳中和未来技术学院,福建 福州　350117; 2.福建师范大学 地理研究所,福建 福州　350117)

摘　要:高密度城市发展背景下,深入理解街区尺度地表能量平衡时空分异规律,是支撑气候适应性城市规划、缓解热岛效应的科学基础.本文选取福州市主城区,以街区局地气候分区(local climate zone,LCZ)为研究单元,筛选二维和三维影响因子,利用地理探测器量化各要素对昼夜地表城市热岛强度的影响程度,揭示热岛昼夜差异性与空间分异性.结果表明,昼夜热岛效应呈现差异化空间格局,日间受地表覆盖异质性调控呈空间离散特征,夜间受建筑形态参数与热滞留效应共同主导呈空间集聚特征.局地气候分区热环境调控机制昼夜差异显著:紧凑型 LCZ 日间由建筑高度与密度参数主控,夜间依靠植被、水体及天空开阔度协同调控;开阔型 LCZ 昼夜热环境受建筑形态与三维绿量调控;自然型 LCZ 昼夜受植被、水体和天空开阔度调控,水体区依赖周边植被三维结构,裸地区昼夜受建筑高度与天空开阔度支配.各影响因子交互作用普遍表现为双因子增强或非线性增强,交互解释力远高于单因子,说明城市热岛由多要素共同耦合形成.研究结果可为福州市生态建设和城市规划提供理论参考.

关键词:地表温度; 地表城市热岛强度; 局地气候分区; 地理探测器; 三维绿量

中图分类号:K 903; TP 79　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202605001

Study on factors of urban local climate zone heat island intensity based on Geodetector

Zhou Xisong[1,2]，　Zhang Youshui[1,2]，　Huang Qinghong[1,2]

(1.School of Geographical Sciences,School of Carbon Neutrality Future Technology,Fujian Normal University,Fuzhou Fujian　350117,China; 2.Institute of Geography,Fujian Normal University,Fuzhou Fujian　350117,China)

Abstract:In the context of high-density urban development,a thorough understanding of the spatio-temporal differentiation patterns of surface energy balance at the block scale serves as the scientific basis for supporting climate-adaptive urban planning and mitigating urban heat island effect.This study selects the main urban area of Fuzhou City and takes block-scale local climate zones as the research units to reveal the diurnal differences and spatial heterogeneity of urban heat island effect.By screening two-dimensional and three-dimensional influencing factors,Geodetector method is employed to quantify the influence of each factor on daytime and nighttime surface urban heat island intensity.The results show that the daytime and nighttime urban heat island effects exhibit differentiated spatial patterns.The daytime heat island effect is regulated by land surface cover heterogeneity,presenting spatially discrete characteristics; the nighttime effect is jointly dominated by building morphological parameters and the heat retention effect,displaying

收稿日期:2025-04-17; **修回日期**:2026-03-05

基金项目:国家自然科学基金(42271380); 福建省自然科学基金(2025J01620)

作者简介:周溪松(2000-),男,江西鹰潭人,硕士研究生,研究方向为资源与环境遥感.

通信作者:张友水(1974-),男,教授,博士生导师,博士,研究方向为资源与环境遥感.E-mail:yzha5553@163.com

spatially clustered characteristics. The regulatory mechanisms of the thermal environment in local climate zones show significant diurnal differences. In compact LCZ types, the daytime thermal environment is primarily controlled by building height and density parameters, while at night it is synergistically regulated by vegetation, water bodies, and sky view factor. In open LCZ types, the diurnal thermal environment is regulated by building morphology and three-dimensional green volume. Among natural LCZ types, vegetated areas are regulated diurnally by vegetation, water bodies, and sky view factor; water body areas are dependent on the three-dimensional structure of surrounding vegetation; and bare land areas are dominated by building height and sky view factor both day and night. The interactions between influencing factors generally exhibit bi-factor enhancement or nonlinear enhancement, with the interactive explanatory power being far higher than that of individual factors, indicating that the urban heat island is formed through the coupled effects of multiple elements. The research findings can provide theoretical reference for ecological construction and urban planning in Fuzhou City.

Key words: land surface temperature; surface urban heat island intensity; local climate zones; Geodetector; three-dimensional green volume

随着城市化进程加速与城市规模持续扩张，人口集聚使得城市成为人类活动的重要载体[1]. 在此过程中，植被、水体等大量自然地表覆盖被沥青、水泥和混凝土等人工地表覆盖替代. 这些人工地表热容量偏小、吸热能力更强，致使城市地表辐射强度增大，进而改变城市热环境，形成了城市热岛效应(urban heat island，UHI)[2]. 热岛现象不仅改变城市局地气候条件，还会对区域生态系统产生一系列负面影响. 因此，厘清城市热环境形成机理、科学缓解热岛问题，对于构建宜居城市具有重要理论与现实意义.

为揭示城市热环境形成机制，大量研究聚焦于热环境关键驱动因子的辨识. 早期研究侧重二维空间要素与热环境的关联分析，如蓝绿空间格局[3]、不透水面分布[4]、建成区扩张[5-6]等要素对地表温度的影响. 随着研究与认知的深入，研究者发现建筑密度、建筑高度、天空可视因子等三维城市形态指标，同样对热量分布与流通产生深刻影响[7]. 然而，城市空间的高度异质性使得不同区域热环境及其驱动机制存在显著差异. 为实现全球范围的可比性研究，系统整合地表覆盖、建筑形态与材料属性等多维特征，并划分出内部气候响应相对均一的空间单元，局地气候分区(local climate zone，LCZ)分类框架应运而生[8-9]. 该框架将城市地表划分为 10 类建筑类型与 7 类土地覆盖类型，为精细化、标准化研究城市热环境提供了强有力的支撑. 目前，基于 LCZ 的热环境研究已广泛开展，如探讨不同 LCZ 类别地表温度特征及其与各类形态参数的关联[8]等. 然而，现有研究多聚焦城市全域或单日尺度，在街区尺度下，针对不同 LCZ 类别内热岛昼夜分异规律及其差异化驱动机制的深入剖析仍较为薄弱；驱动因子识别多依赖相关分析、回归模型等传统统计方法，这些方法常受限于线性假设与共线性问题，难以有效解析多因子间复杂的非线性交互关系[10-12]. 地理探测器作为空间统计工具，无需线性假设，可同步处理连续型与离散型变量，并能量化单因子解释力及双因子交互作用，为探究城市热环境空间分异的驱动机制提供了新途径[13].

据此，本研究以福州市为研究区，基于街区尺度整合局地气候分区分类体系，选取系列二维与三维影响因子，利用地理探测器的因子探测与交互探测模块，系统分析地表城市热岛强度(surface urban heat island intensity，SUHII)的昼夜分异规律、不同 LCZ 类别下各因子的作用差异及因子间交互效应，以实现揭示 SUHII 的昼夜演变规律、辨析不同 LCZ 内各影响因子的贡献度、量化因子两两交互作用对热岛效应的影响强度等研究目标. 本研究成果可为面向热环境缓解的城市空间规划提供科学依据.

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况

福州市为中国福建省省会，位于 25°15′～26°39′ N、118°08′～120°31′ E，研究区地理位置见图 1.截至 2023 年，福州市常住人口 846.9 万人，城镇化率 73.9%[14]，城市化发展水平较高.福州市属亚热带季风气候，是国内典型的“火炉城市”[15]，区域年平均气温为 20～25 ℃，夏季高温、高湿天气频发；在高强度城市建设与人类活动叠加作用下，城市昼夜热环境空间分异显著，城市热岛效应较为突出[16].本研究依据《福州城市综合交通规划(2020—2035)》中心城区路网规划，将三环以内划定为研究范围.该片区是福州市城市建设最为集聚、人口活动最为密集的核心区域，建筑密度高、不透水地表占比大，城市形态与土地利用结构复杂，集中体现了快速城市化进程下典型建成环境特征[17].三环内城市功能、下垫面类型及人类活动强度空间分异明显，昼夜热环境演化特征突出，选择该区域作为研究区，有助于厘清城市因子对昼夜地表热环境的影响规律，研究结果可为亚热带季风气候区高密度城市热环境管控与国土空间规划提供参考.

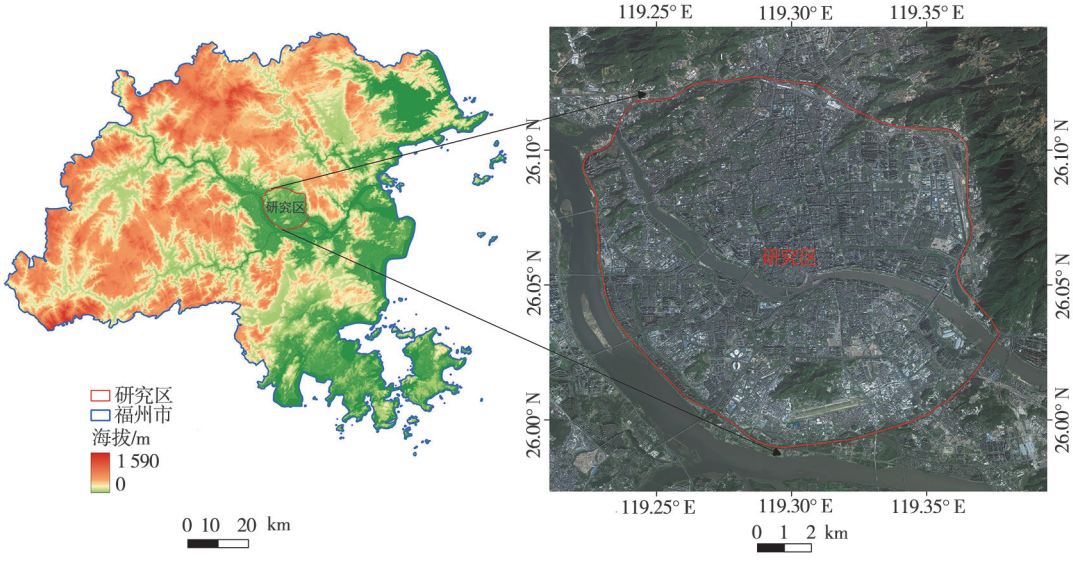


图 1 福州市及研究区位置

Fig.1 Location of Fuzhou City and the study area

1.1.2 数据来源及数据预处理

基于美国地质调查局 Landsat 9 OLI/TIRS 遥感数据，筛选研究区内无云或少云影像(成像时间为 2023 年 7 月 7 日)，利用 ENVI5.2 软件 Band Math 工具开展波段运算，反演得到日间地表温度(land surface temperture，LST)；夜间地表温度数据来源于 ECOSTRESS LST 产品，选取成像时刻为 2023 年 3 月 9 日 21 时 57 分的影像.从欧空局哥白尼数据中心下载 Sentinel-2 Level-2A 数据产品(见图 2，成像时间为 2023 年 8 月 6 日)，通过波段运算得到研究区增强型植被指数(enhanced vegetation index，EVI)、改进的归一化水体指数(modified normalized difference water index，MNDWI)及增强型不透水面指数(enhanced normalized difference impervious surface index，ENDISI).结合 DEM 数据与建筑高度数据，采用 Relief Visualization Toolbox 计算天空开阔度(sky view factor，SVF).利用 Google 卫星影像人工手动勾勒建筑轮廓成像，并提取建筑高度数据，得到含建筑高度的建筑矢量数据.本文从街区尺度解析福州市城市热岛的影响机制，基于开放街道地图(open street map，OSM)道路网数据，选取高速公路、主干道、次干道、三级道路、居住道路等道路要素构建路网数据集，并参照卫星影像对福州市道路矢量数据进行编辑与完善.三维绿量相关数据来源于已发表的三维植被调查与建模成果[18]，该数据集基于 2023 年 7 月样地外业调查与无人机影像获取，包含多种树种树高、冠高及冠径等参数，本研究直接引用该三维绿量数据开展后续分析.各数据具体信息见表 1.

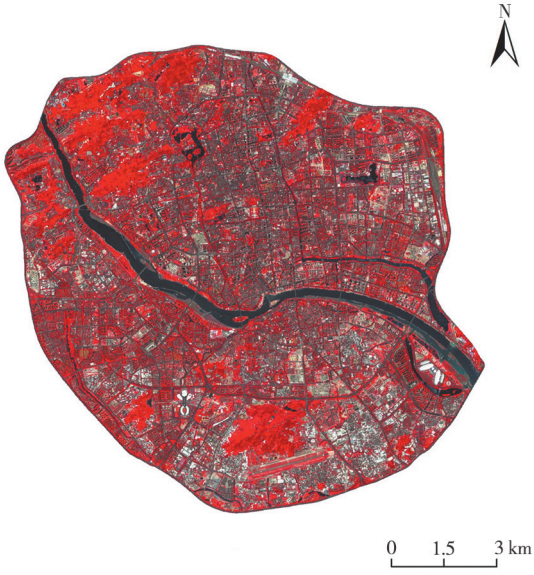


图 2 Sentinel-2 数据彩红外(假彩色)合成影像

Fig.2 Color-infrared(false-color) composite image of Sentinel-2 data

表 1 研究采用数据源信息

Tab.1 Information of data sources used in the study

数据类型	分辨率	用途	来源
Landsat 9 影像	30 m	计算日间地表温度	https://earthexplorer.usgs.gov/
ECOSTRESS LST 产品	70 m	计算夜间地表温度	https://appeears.earthdatacloud.nasa.gov/
Sentinel-2 影像	10 m	计算 EVI、MNDWI、ENDISI	https://browser.dataspace.copernicus.eu/
DEM 数据	12.5 m	结合建筑高度数据计算 SVF	https://search.asf.alaska.edu
建筑高度数据	10 m	将建筑高度值与建筑轮廓数据结合	https://zenodo.org/records/7827315
OSM 数据	矢量数据	构建街区尺度研究单元	https://download.geofabrik.de/asia/china/fujian.html

1.1.3 城市热环境影响因子选取及计算

影响地表城市热岛强度的因素多种多样.针对城市下垫面地表覆盖类型,选取增强型植被指数(EVI)、改进的归一化水体指数(MNDWI)[19]及增强型不透水面指数(ENDISI)[20]3 项指标;根据建筑形态,选取建筑占地面积比率(building surface fraction,BSF)、平均几何高度(height of roughness elements,HRE)、天空开阔度(SVF)[21]、容积率(floor area ratio,FAR)4 项指标.此外,利用已有的三维绿量(three-dimensional green volume,TDGV)数据集,统计绿量投影面积并计算绿量面积比率(vegetation area ratio,VAR),以绿量体积表征三维绿量.根据各指标表征的空间维度特征,将城市热岛影响因子划分为二维因子与三维因子.其中,二维因子主要反映地表要素平面覆盖状况及开发强度特征,包括 EVI、MNDWI、ENDISI、BSF、FAR 及 VAR;三维因子用于刻画建筑与植被的垂直结构与空间形态特征,包括 HRE、SVF 及 TDGV.本研究共选取 9 项城市热环境影响因子,探究各因子对城市热岛的作用强度,以及因子两两交互作用的影响程度,各指数计算公式见表 2,各指数分布见图 3.

表 2　指数计算

Tab.2　Formulas for calculating each indicator

指标	定义	公式
MNDWI	遥感中监测水体，特别是用于区分水体与其余地表覆盖类型	$\mathrm{MNDWI}=\frac{(\mathrm{GREEN}-\mathrm{NIR})}{(\mathrm{GREEN}+\mathrm{NIR})}$
EVI	遥感与地理信息系统中广泛应用的植被指数，旨在改善传统植被指数(NDVI 等)的性能	$\mathrm{EVI}=\frac{2.5(\mathrm{NIR}-\mathrm{RED})}{(\mathrm{NIR}+6\mathrm{RED}-7.5\mathrm{BLUE}+1)}$
ENDISI	遥感中评估城市不透水表面(道路、建筑物等)覆盖程度	$\mathrm{ENDISI}=\frac{\frac{(2\mathrm{BLUE}+\mathrm{SWIR2})}{2}-\frac{(\mathrm{RED}+\mathrm{NIR}+\mathrm{SWIR1})}{3}}{\frac{(2\mathrm{BLUE}+\mathrm{SWIR2})}{2}+\frac{(\mathrm{RED}+\mathrm{NIR}+\mathrm{SWIR1})}{3}}$
BSF	特定区域内，建筑物的垂直投影面积与该区域总面积的比值，反映该区域建筑物覆盖程度	$\mathrm{BSF}_i=\frac{\sum_{j=1}^{m}BS_j}{S_i}$
HRE	粗糙度元素的平均几何高度，通常指在一个特定的地表区域内，各种粗糙元素(建筑物、树木等)相对于某一基准面的平均高度	$\mathrm{HRE}_i=\frac{\sum_{j=1}^{m}BH_j}{m}$
FAR	地块上建筑物总建筑面积与该地块总面积的比值，是城市规划中的重要指标，用于衡量土地的使用强度与开发密度	$\mathrm{FAR}=\frac{\sum_{i=1}^{n}A_iF_i}{\sum_{i=1}^{n}A_i}$
SVF	表示观察点从地面向上看，能够看到的天空面积与理论上可以看到的最大天空面积(没有任何遮挡物时的天空面积)的比值，数值范围为 0～1	$\mathrm{SVF}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}\sin\gamma_i}{n}$
VAR	研究单元内绿地面积与单元面积的比值	$\mathrm{VAR}=\frac{\mathrm{GA}}{\mathrm{BA}}$
TDGV	单位区域内植物茎、叶、枝等器官所占空间体积的总和，反映植被的立体生长状态和生态效能，不仅考虑平面绿化面积，还量化植被在垂直方向上的分布密度和层次结构	基于不同树高-冠高模型估算三维绿量[18]

注：GREEN 表示绿光波段；NIR 表示近红外波段；RED 表示红光波段；BLUE 表示蓝光波段；SWIR1、SWIR2 表示短波近红外光；BS_j 为第 i 个研究单元内第 j 个建筑物面积；m 为第 i 个研究单元建筑物个数；S_i 为第 i 个研究单元的面积；BH_j 为第 i 个研究单元内第 j 个建筑物高度；A_i 为第 i 个建筑物的基底面积；F_i 为第 i 个建筑物的楼层数；n 为用于估计地形地平线垂直仰角的方向数量；γ_i 为地形地平线的仰角；GA 表示研究单元内的绿地面积；BA 表示研究单元面积.

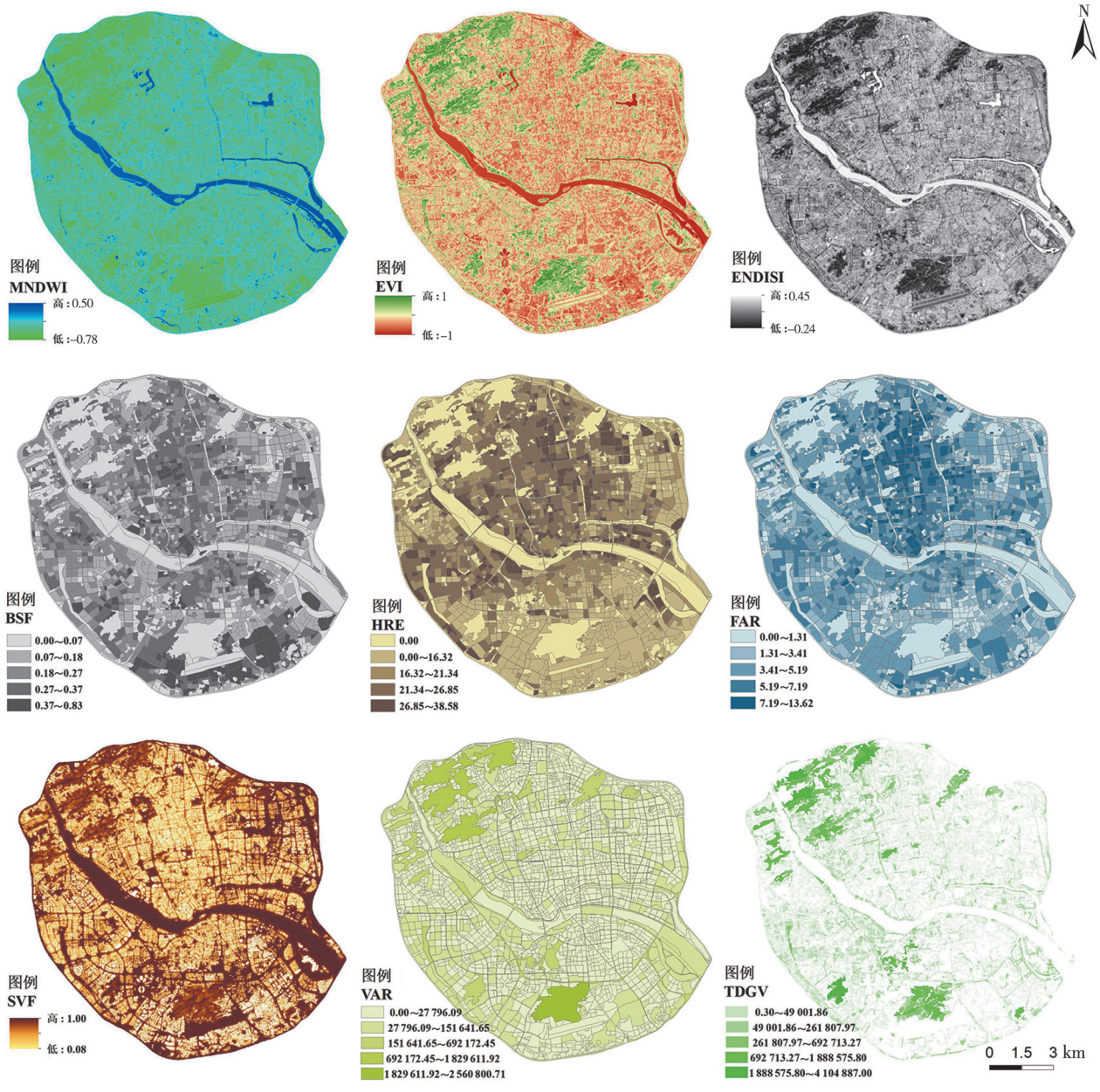


图 3　各指数分布

Fig.3　Distribution of various indices

1.2　研究方法

1.2.1　地表城市热岛强度计算

城市热岛效应是城市化进程改变局地热环境形成的典型地表热力现象，地表城市热岛强度(SUHII)是量化该效应的核心参数[22].传统意义上的“热岛效应”，通常指城区与周边郊县之间的温度差异.本研究针对福州市主城区，采用归一化温差(normalized temperature difference)指标表征地表城市热岛强度，即以归一化后的栅格单元地表温度与全域平均地表温度的差值，识别研究区内部热岛、冷岛空间分布特征，进而开展驱动因子分析，该方法已被大量同类研究验证并广泛应用.日间地表温度基于 Landsat 9 C2L2 数据集反演：在 ENVI5.2 软件 Band Math 工具中输入定标公式 $b_{10}\times0.00341802+149$，对 Landsat 9 C2L2 数据 B10 波段开展辐射定标，将 DN 值换算成开尔文温度；再借助 Band Math 工具输入 B10−273.15 完成开尔文温度向摄氏度换算，得到福州市主城区日间地表温度.同样，对 ECOSTRESS LST 产品数据进行温度换算，得到福州市夜间地表温度.

地表城市热岛强度(SUHII)计算参考文献[22]:首先提取各研究单元地表温度,计算得到各单元平均地表温度$LST_{i,mean}$;随后对所有研究单元的平均地表温度进行归一化处理;最后将计算得到的归一化地表温度减去全域归一化温度平均值,得到各单元 SUHII.

$$LST_{Ni}=\frac{LST_{i,mean}-\min(LST_{1,mean},\cdots,LST_{n,mean})}{\max(LST_{1,mean},\cdots,LST_{n,mean})-\min(LST_{1,mean},\cdots,LST_{n,mean})},i=1,2,3,\ldots,n, \tag{1}$$

$$SUHII_i=LST_{Ni}-\frac{\sum_{i=1}^{n}LST_{Ni}}{n}. \tag{2}$$

式中:LST_{Ni}为第 i 个研究单元归一化后的地表温度;$LST_{i,mean}$为第 i 个研究单元的平均地表温度;n 为研究单元数量;$\max(LST_{1,mean},\cdots,LST_{n,mean})$为所有研究单元平均地表温度最大值;$\min(LST_{1,mean},\cdots,LST_{n,mean})$为所有研究单元平均地表温度最小值.

1.2.2 基于街区尺度的局地气候分区构建

根据 Stewart 等[23]提出的局地气候分区分类体系,将地表分为 17 种类型,其中建筑类下垫面 10 种、自然地表类型 7 种.LCZ 分类可借助地表覆盖状况、结构特征、辐射属性、热力性能以及人类活动特征的标准化参数实现有效划分.本文依托 OSM 道路网数据划分街区尺度研究单元,并以此研究单元计算各类地表形态参数,结合 Google 卫星影像开展研究区 LCZ 分类,包括不透水面比率(impervious surface fraction,ISF)、水体面积比率(water area ratio,WAR)、VAR、BSF、HRE.ISF 用于衡量特定区域内不透水表面占比,不透水表面通常包含屋顶、道路、停车场以及广场等人工铺设、水分难以渗透的硬化地表;WAR 指一定区域内水域面积在该区域总面积中的占比.本研究综合上述各项指标,将福州市主城区划分为 9 类局地气候分区(见表 3),分别为紧凑型高层建筑(LCZ 1)、紧凑型中层建筑(LCZ 2)、紧凑型低层建筑(LCZ 3)、开阔型高层建筑(LCZ 4)、开阔型中层建筑(LCZ 5)、开阔型低层建筑(LCZ 6)、植被覆盖区(LCZ A)、裸地与硬质路面(LCZ E)、水体(LCZ G).

表 3 局地气候分区划分指标阈值

Tab.3 Classification thresholds of indicators for local climate zones

LCZ 类别	BSF	HRE	VAR	ISF	WAR
LCZ 1	0.10～0.50	＞26	＜0.50	＞0.80	0.10～0.60
LCZ 2	0.10～0.70	14～26	＜0.20	＞0.20	＜0.40
LCZ 3	0.10～0.80	＜14	＜0.10	＞0.50	＜0.30
LCZ 4	0.10～0.30	＞26	＜0.60	0.50～0.80	＜0.20
LCZ 5	0.10～0.50	14～26	0.20～0.60	＞0.10	＜0.10
LCZ 6	＜0.60	＜14	0.10～0.60	＞0.40	＜0.20
LCZ A	＜0.10	—	＜0.90	＜0.50	＜0.20
LCZ E	＜0.10	—	＜0.90	＞0.50	＜0.20
LCZ G	＜0.10	—	＜0.40	—	0.20～0.80

1.2.3 地理探测器

地理探测器是探测和利用空间分异性的统计学工具[24],包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测.本文运用因子探测与交互作用探测开展分析,其中因子探测用于量化自变量(建筑密度等影响因子)对因变量(地表城市热岛强度)空间分异的解释力,计算公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}. \tag{3}$$

式中:L 为驱动因子的数量;N_h、N 分别为第 h 层和研究全域的单元数量;σ_h^2、σ^2 分别为因变量在第 h 层和

全域的方差.q 取值范围为[0,1],q 值越大,表示该因子对地表城市热岛强度空间分异的解释力越强,反之则解释力越弱.

交互探测器用于探测影响福州市地表城市热岛强度因子间的交互作用.因子交互类型划分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强 5 类,各交互作用类型及其判断标准见表 4.

表 4　交互作用类型及其判断准则

Tab.4　Types of interactions and their judgment criteria

交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
单因子非线性减弱	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

2　结果分析

2.1　基于街区尺度的局部气候分区空间分布

福州市主城区局地气候分区由建成类(LCZ 1—LCZ 6)和自然类(LCZ A、LCZ E、LCZ G)共同构成,其中建成类为主体,占研究区面积的 66.97%,自然类占 33.03%.建成类中,开阔型建筑区与紧凑型建筑区面积占比基本持平,分别为 49.21%、50.79%.但是两者空间分布格局差异显著:紧凑型高层、中层建筑集中分布在主城区中部,紧凑型低层建筑集中分布在主城区东南部;开阔型建筑则大多集中分布在主城区西南部与西北部(见图 4).

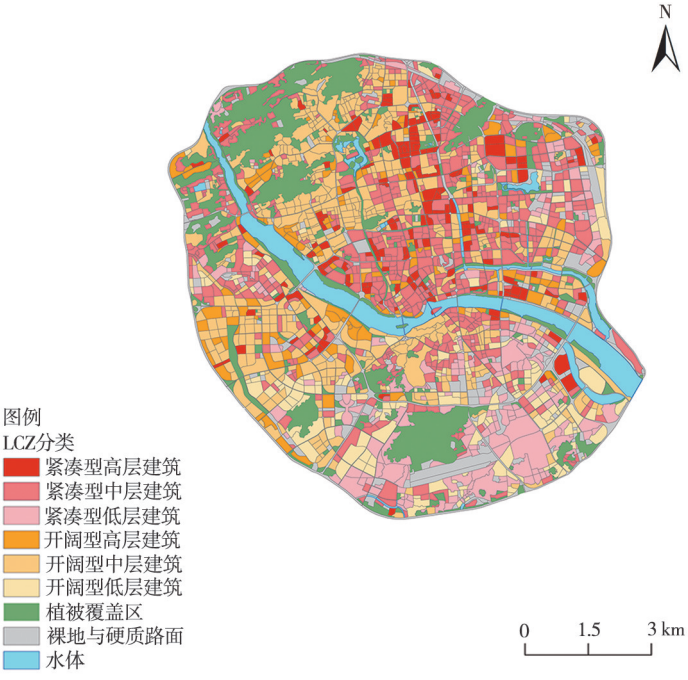


图 4　局地气候分区分类结果

Fig.4　Classification results of local climate zones

2.2　昼夜地表城市热岛强度空间分布

由图 5 可见,昼夜地表城市热岛强度的空间分布格局差异显著.日间,红色、橙色表征的较强热岛区域分布范围较广且较为零散,主要集中在城市中部与南部;浅蓝色、深蓝色表征的低热岛区域主要分布于城市边

缘地带.夜间,红色、橙色表征的高热岛区域空间集聚特征明显,集中分布在城市中部与北部;深蓝色、浅蓝色表征的低热岛区域大范围覆盖城市外围地带.对比昼夜地表城市热岛强度空间分布图可知,日间高热岛区域空间分布较为零散,夜间高热岛区域空间集聚程度更高.

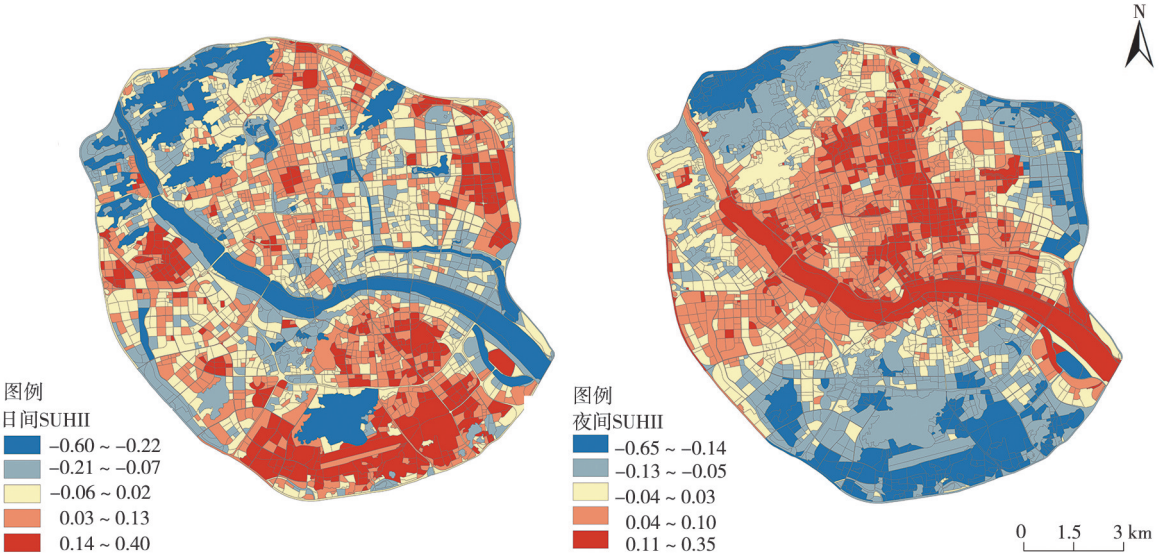


图 5　昼夜地表城市热岛强度分布

Fig.5　Distribution of surface urban heat island intensity in daytime and nighttime

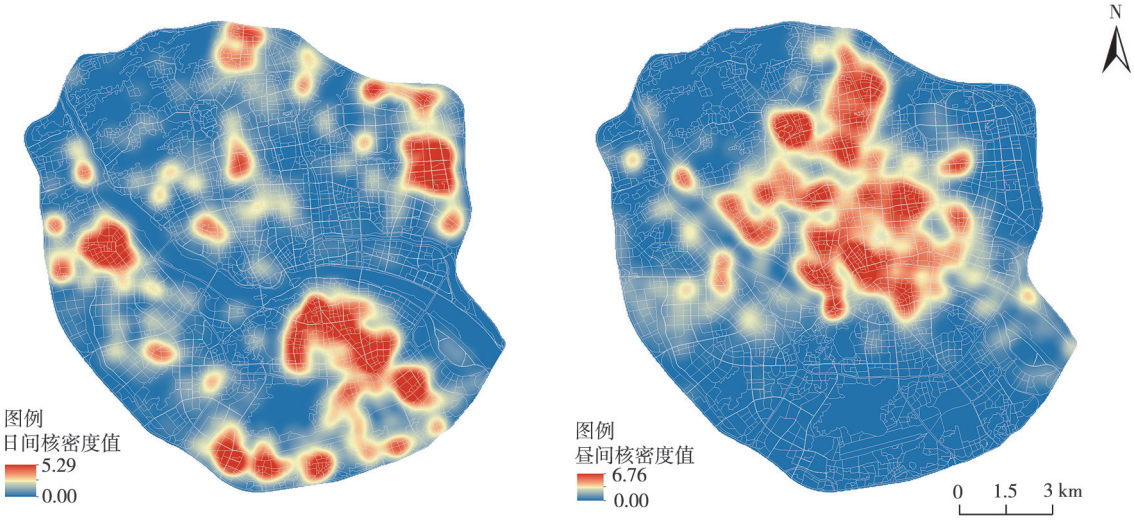


图 6　昼夜地表城市热岛强度核密度图

Fig.6　Kernel density maps of surface urban heat island intensity in daytime and nighttime

城市热岛形成机制存在昼夜能量平衡差异.日间,城市下垫面热容较高、反照率低,具有较强的吸热能力,更易吸收太阳辐射并蓄热升温,进而形成显著热岛效应;夜间,地表白天累积的热量缓慢释放,叠加人为持续排热、城区下垫面散热性能较弱,使得城区气温难以快速下降,热岛效应依旧显著.

为定量表征昼夜热岛高值区的空间集聚特征,本文选取 SUHII 高值区(SUHII＞0)开展核密度分析(见图 6),统计结果见表 5.核密度分析结果表明:日间热岛高集聚区整体呈分散式分布,高集聚区面积为 14.59 km^2,占研究区总面积的 8.39%;核密度阈值为 2.26～5.29,平均核密度为 3.14,表明日间热岛高值区虽局部区域表现突出,但整体空间连续性较弱,呈多斑块离散分布格局.与之相比,夜间热岛高集聚区空间集聚特征显著增强,高集聚区面积增至 23.27 km^2,占研究区总面积的 13.39%,明显高于日间占比;核密度阈值范围为 1.96～6.76,全域峰值达到 6.76(日间 5.29),表明夜间 SUHII 在空间上更易向城市核心区集聚,形成连续性更强的高值集聚区.

表 5　昼夜地表城市热岛高集聚区核密度特征统计结果

Tab.5　Statistical results of kernel density characteristics for high-aggregation zones of surface urban heat island in daytime and nighttime

昼夜时段	高集聚区面积/km^2	高集聚区占比/%	高集聚区阈值	高集聚区平均核密度	核密度峰值
日间	14.59	8.39	2.26～5.29	3.14	5.29
夜间	23.27	13.39	1.96～6.76	2.68	6.76

综合昼夜核密度统计特征可见，日间地表城市热岛强度以分散扩张为主，夜间 SUHII 则呈显著空间收敛集聚特征.该结果从空间集聚尺度与强度层面对昼夜 SUHII 分布差异进行了定量验证，进一步揭示了昼夜热岛在空间组织结构上的分异规律.

2.3　不同 LCZ 地表城市热岛强度对比

图 7 揭示了不同局地气候分区与日间地表城市热岛强度的耦合关系，反映出各类 LCZ 对城市热环境的差异化响应特征.整体来看，不同 LCZ 下垫面热环境响应差异显著且具备明显规律.各类建成 LCZ 的SUHII 排序：高层建筑(LCZ 1、LCZ 4)＜中层建筑(LCZ 2、LCZ 5)＜低层建筑(LCZ 3、LCZ 6).究其原因，高层建筑产生的“破风效应”能够改变原有风向，在建筑物周边形成涡流与“风谷”，增强局地通风，进而降低地表温度[25].紧凑型建成区(LCZ 1、LCZ 2、LCZ 3)平均 SUHII 普遍高于开阔型建成区(LCZ 4、LCZ 5、LCZ 6).紧凑型建筑天空开阔度有限、建筑间距偏小，热量易在局部积聚且扩散受阻，热岛效应更为显著.

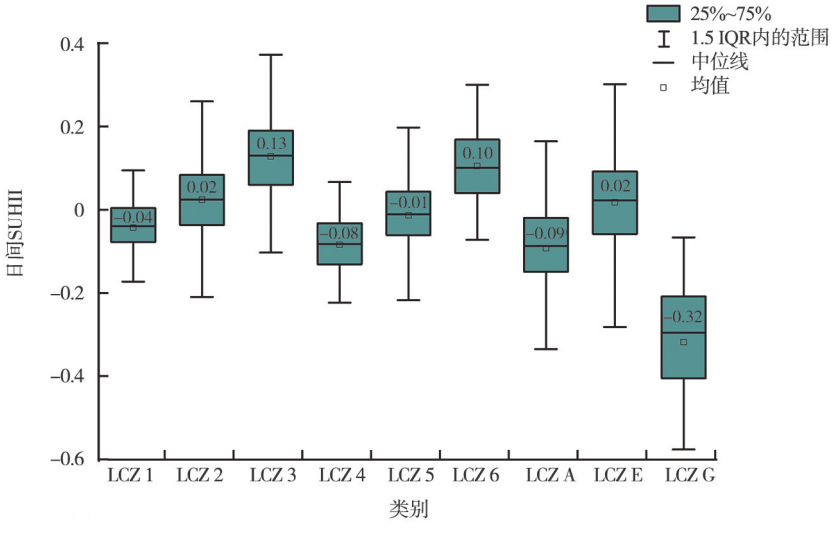


图 7　不同 LCZ 类别日间地表城市热岛强度

Fig.7　Daytime surface urban heat island intensity for different LCZ categories

在自然类局地气候分区中，不同下垫面对城市热环境的调控效应差异显著.LCZ A 平均地表城市热岛强度为负值，且负像元占比更高，表明该类型具有较好的降温能力.植被通过蒸腾作用与遮阴效应降低地表温度，在局地尺度有效缓解热岛效应.相较而言，LCZ E 平均 SUHII 为正值，且为所有类型中最高，说明该类下垫面地表热容量大、热惰性强，同时缺乏蒸发降温机制，易在高温时段积聚热量，形成局地高温核心区.LCZ G整体热岛指标呈负值，表现出显著的冷岛效应，水体较大的比热容与蒸发冷却作用，可在高温环境下减缓热量累积、有效降低周边地表温度.

图 8 揭示了不同局地气候分区与夜间地表城市热岛强度的关联特征，整体来看，不同 LCZ 下垫面对夜间城市热环境的调控效应差异显著，其调控规律与日间存在显著分异.在建成类 LCZ 内，紧凑型建成区(LCZ 1、LCZ 2、LCZ 3)夜间平均 SUHII 普遍高于开阔型建成区(LCZ 4、LCZ 5、LCZ 6)，说明紧凑型建成区夜间热量积聚效应显著.建筑层级对应的 SUHII 排序与日间相反：高层建筑(LCZ 1、LCZ 4)＞中层建筑(LCZ 2、LCZ 5)＞低层建筑(LCZ 3、LCZ 6).究其原因，高层建筑物体量更大、蓄热能力更强，日间蓄积的热量在夜间释放缓慢，易形成热量滞留区，持续抬升局地气温，呈现夜间高热岛集聚特征.自然类 LCZ 夜间热

环境同样呈现明显分异.与日间相反,LCZ G 夜间平均 SUHII 显著高于其余自然下垫面,且多数为正值,说明水体夜间缓慢释放日间储存的热量,热缓冲效果减弱,甚至在局部形成热岛.与之对比,LCZ A、LCZ E 夜间 SUHII 大多为负值,具备一定降温作用.植被覆盖的 LCZ A 依靠林冠通风与辐射冷却,持续发挥夜间调温效应;裸地 LCZ E 因夜间地表辐射冷却速度快、储热能力有限,地表温度降幅显著.

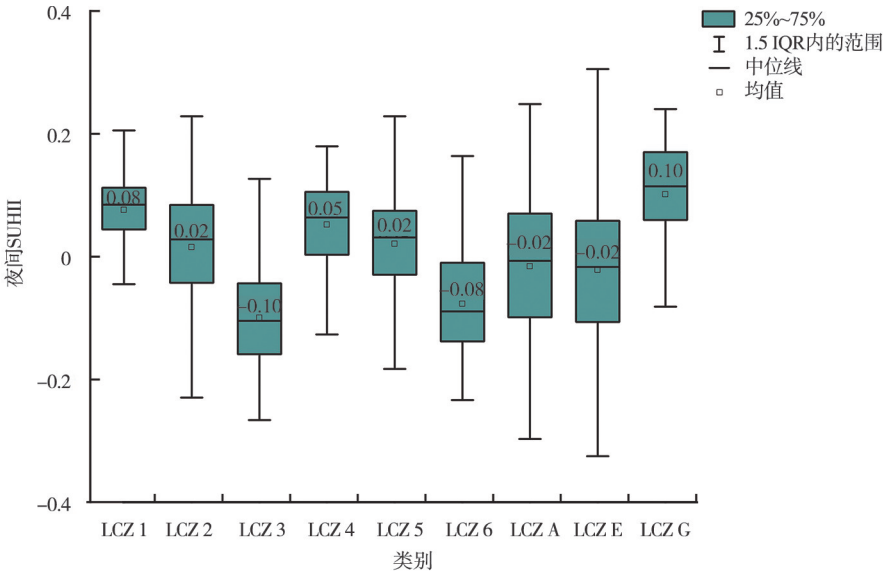


图 8　不同 LCZ 类别夜间地表城市热岛强度

Fig.8　Nighttime surface urban heat island intensity for different LCZ categories

2.4　昼夜地表城市热岛强度影响因子分析

2.4.1　单因子昼夜地表城市热岛强度探测

不同因子对昼夜地表城市热岛强度的影响存在显著差异,结果见图 9.EVI、ENDISI、VAR、BSF 对日间 SUHII 的贡献度显著高于夜间,TDGV、MNDWI、HRE 对 SUHII 的贡献度昼夜差异较小,SVF、FAR 对夜间 SUHII 的影响程度高于日间.上述结果说明,日间 SUHII 主要受街区尺度地表覆盖类型调控,夜间 SUHII 更多取决于街区开敞空间条件.

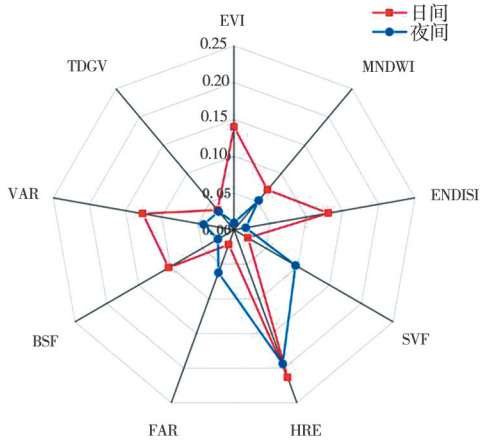


图 9　不同因子对昼夜地表城市热岛强度的影响程度对比

Fig.9　Comparison of influences of different factors for daytime and nighttime surface urban heat island intensity

2.4.2　昼夜地表城市热岛强度交互探测

福州市昼夜地表城市热岛的驱动因子存在显著分异.因子交互探测结果(见表 6、表 7)显示,双因子增强(蓝色标识)、非线性增强(红色标识)是因子交互的主要类型,样本中未出现非线性减弱、独立作用模式.该结

果表明，地表城市热岛强度受多因子交互作用影响，各因子交互作用对 SUHII 的影响效果，相比于单因子独立作用均存在一定程度的增强.

表 6　日间地表城市热岛强度因子交互探测结果

Tab.6　Interaction detection results of factors for daytime SUHII

交互因子	EVI	MNDWI	ENDISI	SVF	HRE	FAR	BSF	VAR	TDGV
EVI	0.139 8								
MNDWI	0.241 2	0.070 9							
ENDISI	0.160 2	0.221 7	0.130 2						
SVF	0.185 5	0.096 9	0.190 0	0.021 9					
HRE	0.323 6	0.291 6	0.330 8	0.254 6	0.213 2				
FAR	0.187 4	0.097 2	0.187 3	0.054 7	0.257 0	0.021 4			
BSF	0.190 0	0.158 3	0.183 8	0.183 6	0.283 5	0.211 5	0.102 7		
VAR	0.168 3	0.202 5	0.166 8	0.157 0	0.279 4	0.161 9	0.191 0	0.126 3	
TDGV	0.160 8	0.111 8	0.147 9	0.073 7	0.252 5	0.094 0	0.168 8	0.142 9	0.035 1

注：表内数值为 q 值；红色代表非线性增强；蓝色代表双因子增强.

表 7　夜间地表城市热岛强度因子交互探测结果

Tab.7　Interaction detection results of factors for nighttime SUHII

交互因子	EVI	MNDWI	ENDISI	SVF	HRE	FAR	BSF	VAR	TDGV
EVI	0.009 6								
MNDWI	0.080 9	0.052 1							
ENDISI	0.050 9	0.061 0	0.016 1						
SVF	0.115 7	0.146 2	0.116 3	0.096 7					
HRE	0.218 6	0.250 9	0.226 9	0.235 7	0.193 6				
FAR	0.086 6	0.107 8	0.082 5	0.126 9	0.207 4	0.062 0			
BSF	0.034 6	0.085 8	0.046 0	0.181 9	0.209 0	0.153 0	0.025 3		
VAR	0.078 0	0.126 8	0.112 8	0.136 4	0.206 7	0.109 4	0.060 4	0.042 1	
TDGV	0.054 5	0.101 2	0.069 7	0.118 1	0.214 5	0.096 8	0.058 2	0.065 4	0.032 4

注：表内数值为 q 值；红色代表非线性增强；蓝色代表双因子增强.

基于地理探测器模型的交互分析结果表明，地表城市热岛效应的影响机制存在显著昼夜分异特征.日间热环境下，HRE 与 MNDWI、SVF、FAR、TDGV 交互呈非线性增强特征（q 值依次为0.291 6、0.254 6、0.257 0、0.252 5），交互解释力显著高于单因子解释力.HRE 与 EVI、ENDISI、BSF、VAR 则表现为双因子增强模式（q 值依次为0.323 6、0.330 8、0.283 5、0.279 4），各因子间存在明显的协同互补效应.这表明日间地表热岛强度主要受建筑三维形态特征（HRE）与地表覆盖组分（EVI、ENDISI、MNDWI、BSF）耦合驱动.

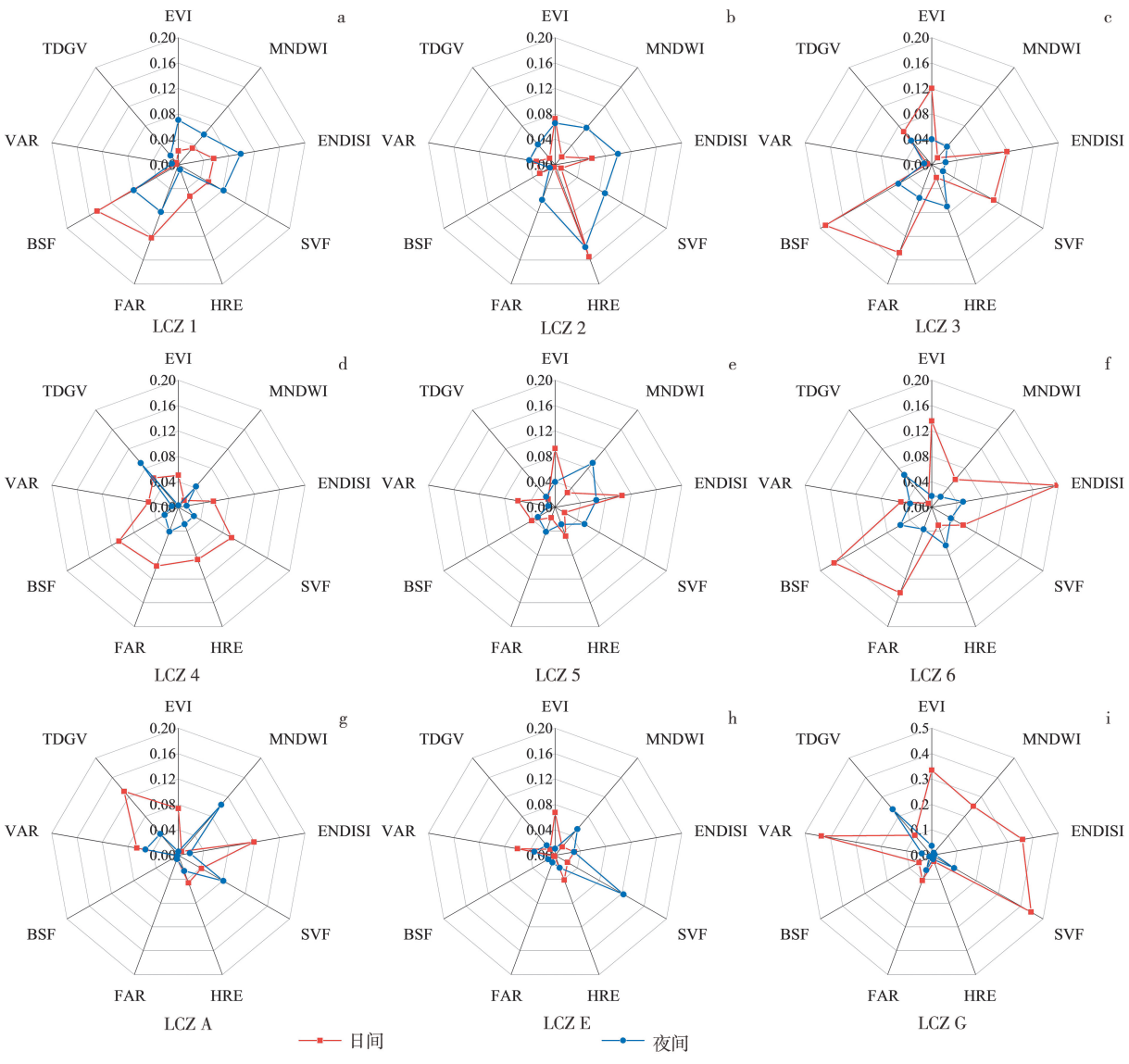
夜间热岛方面，HRE 与 EVI、MNDWI、ENDISI、FAR 交互同样呈非线性增强特征（q 值依次为0.218 6、0.250 9、0.226 9、0.207 4），交互解释力均高于单因子解释力.HRE 与 SVF、BSF、VAR、TDGV 交互表现为双因子增强模式（q 值依次为0.235 7、0.209 0、0.206 7、0.214 5），参数间存在明显的协同互补关系.研究发现，夜间热环境演变主要由建筑垂直结构（HRE）与 MNDWI、EVI、ENDISI、TDGV 协同调控.

综合来看，日间以建筑形态（HRE、BSF、FAR）与地表覆盖（EVI、MNDWI、ENDISI）协同作用为主，夜间则更多依托建筑垂直结构（HRE）与 MNDWI、EVI、ENDISI、TDGV 交互作用.双因子增强反映因子间协同互补特征，非线性增强体现要素间更强的耦合效应，揭示了复杂的能量交互机制.该发现可为城市热环境调

控提供重要的理论依据，表明地表热岛缓解方案中需优先考虑建筑高度与各类地表覆被的空间配置关系.

2.4.3　不同 LCZ 城市热岛因子探测

由图 10 可知，不同局部气候分区内地表热岛驱动因子贡献度存在明显分异.由表 8 可知，各分区影响因子对地表热岛的贡献程度存在差异.结合因子探测结果，本研究将 LCZ 划分为紧凑型（LCZ 1、LCZ 2、LCZ 3）、开阔型（LCZ 4、LCZ 5、LCZ 6）和自然型（LCZ A、LCZ E、LCZ G）三大类，分区解析各类因子的影响差异性.



a～i.依次为 LCZ 1、LCZ 2、LCZ 3、LCZ 4、LCZ 5、LCZ 6、LCZ A、LCZ E、LCZ G.

图 10　不同 LCZ 类型地表热岛影响因子昼夜贡献度

Fig.10　Contribution of impact factors to surface urban heat island for different LCZ types in daytime and nighttime

1）紧凑型

LCZ 1 中，BSF、FAR、HRE 是日间地表城市热岛强度的主要显著影响因子；夜间，SUHII 主要由 EVI、MNDWI、ENDISI、SVF 等因子共同调控.LCZ 2 中，HRE 因子在垂直方向上对 SUHII 的影响昼夜均尤为显著，表明建筑高度对城市热环境具有重要作用.LCZ 3 中，ENDISI、BSF、FAR 等因子共同显著影响日间 SUHII，说明人工建筑对城市热环境的相对重要性；夜间，ENDISI、HRE 对 SUHII 的贡献率有所提升，其余因子贡献率则明显减弱.

2）开阔型

LCZ 4 中，BSF、FAR、HRE、SVF 在日间对地表城市热岛强度具有重要影响；夜间，TDGV 对 SUHII 的贡献更为突出.LCZ 5 中，TDGV 在日间对 SUHII 的影响不显著，其余因子均能对昼夜 SUHII 发挥调节作用，其中日间影响最突出的是 ENDISI，夜间影响最突出的则是 MNDWI.LCZ 6 中，BSF、FAR、ENDISI 能够显著影响日间 SUHII，同时建筑周围植被生长情况（EVI）也起到一定作用；而 HRE、TDGV 则在垂直方向上对城市夜间热环境产生一定影响.

3）自然型

LCZ A 中，EVI、VAR、TDGV、ENDISI 是影响日间地表城市热岛强度的主要因子；夜间，MNDWI、SVF、TDGV 对 SUHII 的影响更为重要.LCZ E 中，日间 SUHII 主要受 EVI、VAR、HRE 的显著影响；夜间，SVF 在城市热环境中起主导作用.LCZ G 中，日间 SUHII 主要受周边植被覆盖（EVI、VAR）状况、人工建筑开发情况（ENDISI）及空间开阔程度的影响；夜间，垂直方向植被生长状况（TDGV）对城市热环境具有显著作用.

表 8　不同局地气候分区下各因子昼夜的影响程度及显著性

Tab.8　Influences and significance of factors for daytime and nighttime under different local climate zones

类别	昼夜时段	EVI	MNDWI	ENDISI	SVF	HRE	FAR	BSF	VAR	TDGV
LCZ 1	日间	0.022	0.034	0.056*	0.054**	0.053**	0.122**	0.146**	0.004	0.004
	夜间	0.070**	0.062**	0.099**	0.081**	0.008	0.079**	0.080**	0.010	0.019
LCZ 2	日间	0.073**	0.016	0.058**	0.011*	0.154**	0.004	0.027**	0.030**	0.013**
	夜间	0.065**	0.076**	0.099**	0.090**	0.138**	0.059**	0.009*	0.041**	0.042**
LCZ 3	日间	0.120**	0.014	0.119**	0.111**	0.021	0.147**	0.191**	0.007	0.068**
	夜间	0.040	0.037	0.022	0.020	0.070**	0.055**	0.060**	0.012	0.050**
LCZ 4	日间	0.051*	0.014	0.055*	0.096**	0.088**	0.099**	0.106**	0.047*	0.060*
	夜间	0.003	0.043*	0.013	0.028	0.028	0.041	0.024	0.010	0.091**
LCZ 5	日间	0.092**	0.030**	0.106**	0.017**	0.048**	0.017**	0.042**	0.058**	0.017
	夜间	0.040**	0.091**	0.065**	0.053**	0.029**	0.041**	0.031**	0.011*	0.021**
LCZ 6	日间	0.136**	0.057*	0.198**	0.056**	0.030	0.143**	0.175**	0.049*	0.008
	夜间	0.018	0.022	0.049*	0.034*	0.064**	0.037*	0.056*	0.034	0.067**
LCZ A	日间	0.074**	0.008	0.120**	0.042*	0.046*	0.006	0.002	0.066**	0.131**
	夜间	0.006	0.104**	0.018	0.081**	0.026	0.007	0.002	0.052**	0.044*
LCZ E	日间	0.067**	0.017	0.031**	0.022**	0.042*	0.002	0.002	0.060**	0.012
	夜间	0.010	0.054**	0.030**	0.123**	0.021	0.012	0.013	0.033**	0.020**
LCZ G	日间	0.335**	0.252*	0.359**	0.446**	0.026	0.106	0.057	0.436**	0.102
	夜间	0.038	0.013	0.012	0.100	0.016	0.062	0.010	0.039	0.236**

注：**.$P<0.01$；*.$P<0.05$；其余表示不显著.

3　讨论与结论

以往研究大多基于二维城市形态因子开展城市热环境相关分析，近年来，针对三维城市形态因子的研究日益增多.本研究整合二维城市与三维城市形态因子，对城市热环境进行因子探测与交互作用分析，揭示各类影响因子在昼夜条件下的空间异质性特征.通过局地气候分区划分，对比不同 LCZ 昼夜因子影响差异，阐明不同 LCZ 内多维城市形态因子对 SUHII 的综合作用，并量化各因子交互作用的贡献度.研究结果可为区域制定地表热岛缓解策略提供理论依据.

3.1 讨 论

3.1.1 昼夜地表城市热岛空间分布差异

研究发现,福州市地表城市热岛在昼夜间呈现显著的空间分布差异.日间强热岛区呈分散状态,主要分布于多个局部热源密集区域;夜间则表现为集中分布,热岛范围显著扩大.这种变化主要受昼夜地表热岛形成机理差异调控:日间热岛效应多与太阳辐射和地表能量吸收有关,夜间热岛效应则更多受到地表热量滞留与辐射散失过程的影响.

3.1.2 不同 LCZ 类型地表城市热岛强度特征差异

不同局地气候分区在地表城市热岛强度上存在显著差异.在建筑类 LCZ(LCZ 1—LCZ 6)中,中高层建筑在夜间表现出更强的热岛强度,而低层建筑则呈现昼强夜弱的特征,说明建筑高度与密度对夜间热量蓄积有较大影响.在自然类 LCZ(LCZ A、LCZ E、LCZ G)中,水体昼夜温差表现最为明显,日间地表温度较低,夜间反而表现出较高地表热岛强度,反映出水体热容量大、夜间缓慢释放热量的特征;植被区昼夜均表现为热岛缓解效应,体现植被良好的降温作用.

3.1.3 昼夜地表城市热岛驱动因子差异性分析

因子探测结果显示,地表城市热岛强度的主导因子昼夜间存在明显分异.日间 SUHII 主要受 EVI、BSF、ENDISI、VAR 影响,说明地表覆盖状况(植被减少、不透水面扩张等)在地表热岛形成中起主导作用;夜间 SUHII 则更易受 SVF、FAR 调控,体现建筑空间形态(建筑密度、天空开阔度等)对夜间热量滞留与散热能力的关键作用.

3.1.4 多因子交互机制与不同 LCZ 类型响应特征

交互作用探测结果显示,所有变量间的交互类型均为双因子增强或非线性增强类型,未发现独立作用或减弱作用.各因子交互作用的 q 值均显著高于单因子的 q 值,说明地表城市热岛效应的形成并非由单一因子主导,而是多因素耦合驱动的结果.进一步结合局地气候分区类型分析发现,不同 LCZ 对因子交互作用的响应存在差异.在紧凑型 LCZ 中,日间 HRE 与建筑形态因子(BSF、FAR)交互作用最为显著,夜间则转变为 EVI、MNDWI 与 SVF 主导;在开阔型 LCZ 中,日间地表热岛效应主要受建筑形态参数控制,夜间则以 TDGV 调节为主;在自然型 LCZ 中,LCZ A 日间主要依靠 EVI 缓解热岛效应,夜间则转为 MNDWI 与 SVF 主导;LCZ G 昼夜均依赖于周边植被条件,夜间垂直植被的调节作用尤为关键.

3.2 结 论

1) 昼夜地表热岛效应差异显著.日间地表热岛呈分散分布,主要受地表覆盖状况(植被减少、不透水面扩张等)主导,关键因子包括 EVI、ENDISI、VAR、BSF;夜间地表热岛集中分布,受建筑形态(FAR、SVF 等)与热量滞留效应共同调控,核心因子为 SVF、FAR、HRE.

2) 局地气候分区驱动因子存在昼夜分异.在紧凑型 LCZ(LCZ 1、LCZ 2、LCZ 3)中,日间以建筑高度与密度为主导,夜间主控因子转变为植被、水体及通风条件.在开阔型 LCZ(LCZ 4、LCZ 5、LCZ 6)中,日间依赖建筑形态参数,夜间依赖三维绿量调节热量滞留.在自然型 LCZ(LCZ A、LCZ E、LCZ G)中,LCZ A 日间植被降温效果显著,夜间水体与天空开阔度起主导作用;LCZ G 昼夜均依赖周边植被,夜间垂直植被作用更为关键;LCZ E 日间受建筑高度影响,夜间由 SVF 调控散热过程.

3) 因子交互作用加剧地表热岛效应.所有因子交互作用均表现为双因子增强或非线性增强,无独立或减弱现象.交互作用解释力显著高于单因子作用,表明地表热岛形成是多因子协同作用的结果,如 HRE、EVI、ENDISI 与 TDGV 存在明显耦合效应.

本研究突破了传统二维形态分析的局限,整合了三维城市形态因子,揭示了地表热岛多尺度驱动机制;基于 LCZ 分类提出差异化调控策略,为亚热带沿海城市热环境优化提供科学依据.研究仍存在一定局限性,后续可进一步开展多因子协同作用对地表城市热岛强度影响的深入分析.

参考文献:

[1] Khor N J K.World cities report 2022:envisaging the future of cities[M].Nairobi:United Nations Human Settlements Programme(UN-Habitat),2022.

[2] Souch C, Grimmond S. Applied climatology: urban climate[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2006, 30(2): 270-279. DOI: 10.1191/0309133306pp484pr.

[3] 宋菊芳, 江雪妮, 郭贞妮, 等. 城市蓝绿空间特征参数与地表温度的关联量化分析[J]. 中国城市林业, 2023, 21(1): 20-26. DOI: 10.12169/zgcsly.2021.03.29.0003.
Song Jufang, Jiang Xueni, Guo Zhenni, et al. Quantitative analysis of the correlation between urban blue-green space characteristics parameters and land surface temperature[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2023, 21(1): 20-26.

[4] 王嘉丽, 冯婧珂, 杨元征, 等. 南宁市主城区不透水面与热环境效应的空间关系研究[J]. 生态环境学报, 2023, 32(3): 525-534. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.03.010.
Wang Jiali, Feng Jingke, Yang Yuanzheng, et al. Research on spatial relations between impervious surfaces and the urban thermal environment in the central metropolitan area of Nanning City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(3): 525-534.

[5] Wang R X, Min J, Li Y C, et al. Analysis on seasonal variation and influencing mechanism of land surface thermal environment: a case study of Chongqing[J]. Remote Sensing, 2022, 14(9): 2022. DOI: 10.3390/rs14092022.

[6] Saha M L, Kafy A A, Bakshi A, et al. Modelling microscale impacts assessment of urban expansion on seasonal surface urban heat island intensity using neural network algorithms[J]. Energy and Buildings, 2022, 275: 112452. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112452.

[7] Li H F, Li Y N, Wang T, et al. Quantifying 3D building form effects on urban land surface temperature and modeling seasonal correlation patterns[J]. Building and Environment, 2021, 204: 108132. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108132.

[8] 杨梅焕, 姚明昊, 王涛, 等. 基于局地气候区的西安市城市热环境变化及其影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1644-1653. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.09.011.
Yang Meihuan, Yao Minghao, Wang Tao, et al. Analysis of urban thermal environment change and its influencing factors in Xi'an based on local climate zone[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023, 32(9): 1644-1653.

[9] Stewart I D. Redefining the urban heat island[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2011. DOI: 10.14288/1.0072360.

[10] 张旸, 胡德勇, 陈姗姗. 北京城区不透水地表盖度变化及对地表温度的影响[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(11): 1504-1513.
Zhang Yang, Hu Deyong, Chen Shanshan. Influence of impervious surface change on land surface temperature in Beijing[J]. Journal of Geo-Information Science, 2017, 19(11): 1504-1513.

[11] 孙芹芹, 吴志峰, 谭建军. 不同土地利用类型的城市热环境效应研究: 以广州市为例[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(4): 67-70.
Sun Qinqin, Wu Zhifeng, Tan Jianjun. The relationship between urban heat island and land use/cover changes in Guangzhou City[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2010, 22(4): 67-70.

[12] 宋鑫博, 黄鹤, 郭军, 等. 城市形态对夏季热环境影响研究: 以天津中心城区为例[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2165-2174. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.11.007.
Song Xinbo, Huang He, Guo Jun, et al. Research on the impact of urban morphology on thermal environment in summer: a case of Tianjin central city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(11): 2165-2174.

[13] 孙喆. 高密度城区形态要素对热环境的影响作用: 以北京市五环内区域为例[J]. 生态环境学报, 2020, 29(10): 2020-2027. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2020.10.012.
Sun Zhe. Impact of urban morphology factors on thermal environment in high density urban areas: a case of Beijing within 5th ring road[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(10): 2020-2027.

[14] 福州市统计局. 福州统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2025.

[15] 林中立, 徐涵秋. 近 20 年来新旧"火炉城市"热岛状况对比研究[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 521-530. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.3.0521.
Lin Zhongli, Xu Hanqiu. Comparative study on the urban heat island effect in "stove cities" during the last 20 years[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(3): 521-530.

[16] 刘晟龙, 谢慧黎, 陈凌秀, 等. 城市公园及周边景观格局对冷岛效应的影响: 以福建省福州市为例[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 296-305. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.031.
Liu Shenglong, Xie Huili, Chen Lingxiu, et al. Influence of urban parks and surrounding landscape patterns on cold island

effect:a case study of Fuzhou City,Fujian Province[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2025,45(1):296-305.

[17] 欧惠,戴文远,黄万里,等.盆地型城市建设用地扩展与空间形态演变:以福州市中心城区为例[J].地域研究与开发,2020,39(3):70-75.
Ou Hui,Dai Wenyuan,Huang Wanli,et al.Construction land expansion and spatial form evolution in basin-based cities:a case study of Fuzhou central city[J].Areal Research and Development,2020,39(3):70-75.

[18] 王雅琪,张友水,张佳琪.福州市三维景观对地表温度的影响分析[J].海南师范大学学报(自然科学版),2024,37(4):497-506.DOI:10.12051/j.issn.1674-4942.2024.04.013.
Wang Yaqi,Zhang Youshui,Zhang Jiaqi.Analysis of the influence of three-dimensional landscape on land surface temperature in Fuzhou[J].Journal of Hainan Normal University(Natural Science),2024,37(4):497-506.

[19] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.
Xu Hanqiu.A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J].National Remote Sensing Bulletin,2005,9(5):589-595.

[20] 穆亚超,颉耀文,张玲玲,等.一种新的增强型不透水面指数[J].测绘科学,2018,43(2):83-87.DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2018.02.015.
Mu Yachao,Xie Yaowen,Zhang Lingling,et al.An enhanced normalized difference impervious surface index[J].Science of Surveying and Mapping,2018,43(2):83-87.

[21] 刘勇洪,徐永明,张方敏,等.城市地表通风潜力研究技术方法与应用:以北京和广州中心城为例[J].规划师,2019,35(10):32-40.DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2019.10.005.
Liu Yonghong,Xu Yongming,Zhang Fangmin,et al.Research and application of urban surface ventilation potential:cases of Beijing and Guangzhou[J].Planners,2019,35(10):32-40.

[22] Zhou M S,Wang R,Guo Y Y.How urban spatial characteristics impact surface urban heat island in subtropical high-density cities based on LCZs:a case study of Macau[J].Sustainable Cities and Society,2024,112:105587.DOI:10.1016/j.scs.2024.105587.

[23] Stewart I D,Oke T R.Local climate zones for urban temperature studies[J].Bulletin of the American Meteorological Society,2012,93(12):1879-1900.DOI:10.1175/bams-d-11-00019.1.

[24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.DOI:10.11821/dlxb201701010.
Wang Jinfeng,Xu Chengdong.Geodetector:principle and prospective[J].Acta Geographica Sinica,2017,72(1):116-134.

[25] 林中立,徐涵秋.基于局地气候分区体系的福州城市热环境研究[J].地球信息科学学报,2022,24(1):189-200.DOI:10.12082/dqxxkx.2022.210669.
Lin Zhongli,Xu Hanqiu.A study of urban thermal environmental of Fuzhou based on "local climate zones"[J].Journal of Geo-Information Science,2022,24(1):189-200.

(责任编辑　柴　键)