

海绵城市建设视角下长沙市城市热岛效应时空机制研究

孙琪睿, 叶常乐, 罗序文, 洪圣光

长沙理工大学数学与统计学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年9月16日; 录用日期: 2026年10月15日; 发布日期: 2026年10月26日

摘要

快速城市化引发的下垫面硬化问题, 导致城市热岛效应持续加剧, 严重制约城市生态宜居性。海绵城市可通过优化城市下垫面调控热环境, 但现有研究缺乏对其净政策效应与非线性驱动机制的系统量化解析。以长沙市为研究对象, 基于2022年、2025年两期遥感影像与海绵城市建设数据, 构建DID-SHAP + LightGBM联合分析框架, 系统探究海绵城市建设对城市热岛效应的时空调控机制。结果表明: 长沙市热岛效应呈现极强空间集聚特征, 2022~2025年长沙市中心城区热岛显著缓解、高值区由连片集聚转为碎片化分布, 远郊快速城镇化片区因建成区扩张出现局部增温, 热岛重心向东北方向迁移; 海绵城市建设具备显著降温净效应, 高强度建设区域热岛强度较对照组平均下降0.55℃, 且存在显著空间异质性, 主城区降温效果优于郊区; 不透水面、建成区占比为核心增温因子, 绿地、水域等蓝绿基础设施为关键降温因子, 连片化绿地降温边际效应最优。研究可为长沙市海绵城市优化建设、热岛效应精准治理提供科学支撑, 也为同类城市生态热环境调控提供参考。

关键词

海绵城市, 城市热岛效应, DID模型, LightGBM, SHAP可解释性分析, 时空机制

Study on the Spatiotemporal Mechanisms of the Urban Heat Island Effect in Changsha from the Perspective of Sponge City Construction

Qirui Sun, Changle Ye, Xuwen Luo, Shengguang Hong

School of Mathematics and Statistics, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: September 16, 2026; accepted: October 15, 2026; published: October 26, 2026

文章引用: 孙琪睿, 叶常乐, 罗序文, 洪圣光. 海绵城市建设视角下长沙市城市热岛效应时空机制研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(10): 1636-1645. DOI: 10.12677/aep.2026.1610164

Abstract

The surface hardening issue induced by rapid urbanization has exacerbated the urban heat island (UHI) effect, severely undermining urban ecological livability. Sponge city initiatives can regulate thermal environments by optimizing urban underlying surfaces; however, existing studies lack systematic quantitative dissection of their net policy effects and nonlinear driving mechanisms. Taking Changsha as the research object, this study constructs an integrated analytical framework of DID-SHAP + LightGBM, leveraging remote sensing images from 2022 and 2025 as well as sponge city construction data, to systematically explore the spatiotemporal regulation mechanisms of sponge city construction on the UHI effect. The results indicate that: (1) The UHI effect in Changsha exhibits a strong spatial agglomeration characteristic. From 2022 to 2025, the UHI intensity was significantly alleviated in the main urban area, while localized warming emerged in rapidly urbanizing suburban areas, with high-value zones transforming from contiguous clusters to fragmented distributions, and the UHI centroid migrating northeastward. (2) Sponge city construction demonstrates a significant net cooling effect: the UHI intensity in high-intensity construction areas decreased by an average of 0.55°C compared to the control group, with notable spatial heterogeneity—cooling effects in the main urban area outperformed those in suburban regions. (3) Impervious surfaces and the proportion of built-up areas are core warming factors, while blue-green infrastructure such as green spaces and water bodies are key cooling factors; contiguous green spaces exhibit the optimal marginal cooling effect. This study provides scientific support for the optimized construction of sponge cities and precise governance of the UHI effect in Changsha, and also offers a reference for ecological thermal environment regulation in similar cities.

Keywords

Sponge City, Urban Heat Island Effect, DID Model, LightGBM, SHAP Explainable Analysis, Spatiotemporal Mechanism

Copyright © 2026 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

1.1. 研究背景与意义

我国城市化快速推进过程中，建筑密度提升、硬化地面扩张等下垫面格局剧变，导致城市热岛效应持续凸显，成为制约城市生态环境质量、影响居民宜居水平的核心生态问题。作为长江中游城市群核心城市，长沙市城镇化建设提速的同时，自 2015 年全面推进海绵城市建设，通过透水铺装铺设、城市绿地营造、水系湿地修复等低影响开发措施优化城市生态下垫面，理论上可有效调节城市热环境。但目前学界尚未系统量化长沙海绵城市建设的热环境调控净效应，其对热岛效应的时空影响规律与内在驱动机制仍不明确，难以支撑海绵城市规划的精准优化。

基于此，本文开展海绵城市视角下长沙市热岛效应时空机制研究，具备双重核心价值。理论层面，构建“DID 政策效应验证 + LightGBM 非线性拟合 + SHAP 可解释性解析”[1]的联合研究范式，弥补传统单一模型无法兼顾政策净效应分离与驱动机制深度解析的缺陷，丰富城市热环境调控与海绵城市耦合研究的方法体系。实践层面，精准识别长沙热岛效应时空演变特征、量化海绵设施降温效能、解析差异化驱动机制，为长沙市海绵城市分区建设、热岛效应精准治理提供实证依据，助力城市生态环境高质量发展。

1.2. 国内外研究现状

1) 城市热岛效应时空演变研究

城市热岛时空演变是城市生态研究的热点领域，遥感反演技术凭借大范围、高效率、动态监测的优势，成为地表温度(LST)与热岛强度(UHI)监测的核心技术，单窗算法、劈窗算法已成熟应用于 Landsat、Sentinel 系列影像的热红外波段温度反演。现有研究多采用空间自相关分析、两期对比法，揭示城市热岛的空间集聚、时序演变特征，形成了“时间 + 空间”二维分析框架。

现有研究仍存在明显短板：针对长沙市的热岛研究多聚焦单一行政尺度，未结合海绵城市建设政策背景，无法揭示热岛演变与海绵设施建设的内在关联；同时缺乏关键政策节点的对比分析，难以精准捕捉海绵城市建设前后热岛格局的突变特征。

2) 海绵城市热环境调控研究

海绵城市以“渗、滞、蓄、净、用、排”为核心原理，通过优化城市下垫面结构实现热环境调节。现有研究证实，城市绿地、水域湿地、透水铺装等海绵核心设施具备显著降温增湿功能：绿地通过植被蒸腾消耗热量，透水铺装减少硬化地面热储存，水域凭借高热容量缓冲区域温度变化。

当前研究仍存在明显不足：多聚焦单一海绵设施的定性降温分析，缺乏多指标综合量化研究，无法区分不同海绵措施的降温贡献差异；鲜有研究通过准自然实验方法分离海绵城市建设的政策净效应，难以排除城市化、气候波动等干扰因素，针对长沙区域的针对性耦合研究尤为匮乏。

3) DID + LightGBM + SHAP 模型应用研究

机器学习与计量模型的融合为生态机制量化研究提供了新路径。LightGBM 算法具备高效处理高维数据、拟合非线性关系的优势，可精准刻画热岛强度与多因子的复杂关联；DID 双重差分模型[2]作为经典准自然实验方法，可有效解决内生性问题，精准识别政策净效应；SHAP 模型可破解机器学习“黑箱”问题，量化各因子的贡献度与作用方向。

现有研究多单一使用计量模型或机器学习模型，尚未形成“效应验证 - 非线性拟合 - 机制解释”的完整研究闭环，且该联合范式在海绵城市与热岛效应耦合研究中的应用空白，难以实现对热岛调控机制的精准、系统解析。

1.3. 研究内容与技术路线

1) 研究内容

本文以长沙市全域为研究区域，整合 2022 年、2025 年遥感影像、海绵城市建设、城市空间形态等多源数据，构建标准化平衡面板数据集。首先，通过空间统计方法解析长沙市热岛效应的时序演变、空间集聚与重心迁移特征，明确热岛时空格局变化规律；其次，依托 Pearson 相关性检验，初步验证海绵指标与热岛强度的耦合关联；再次，采用 DID 模型量化海绵城市建设的降温净效应[3]，结合 LightGBM 模型拟合因子非线性关联，通过 SHAP 模型深度解析核心驱动机制与边际效应；最后，基于实证结果，结合长沙城市发展现状，提出海绵城市与热环境调控协同优化的差异化策略。

2) 技术路线

本文遵循“数据预处理 - 时空特征分析 - 相关性验证 - 模型实证 - 机制解析 - 策略优化”的技术路线。首先完成多源数据清洗、校正、空间匹配与标准化处理；其次从时间、空间维度解析热岛演变特征；最后通过多模型递进分析完成效应验证与机制拆解，最终输出优化对策。

1.4. 研究创新与缺口

1) 研究缺口

现有研究存在三大核心缺口：视角上，割裂海绵城市建设与热岛演变的关联，难以揭示专项调控逻辑，且存在海绵专项数据获取难题；方法上，多采用定性分析或单一模型分析，无法同时解决内生性与模型黑箱问题，难以精准量化政策净效应与因子贡献度；尺度上，多聚焦单一行政尺度，缺乏栅格精细化分析，无法捕捉热岛演变与海绵建设的空间异质性特征。

2) 研究创新

视角创新：聚焦长沙本土区域，将海绵城市建设与热岛时空演化深度耦合，构建海绵功能遥感替代指标体系，破解专项数据获取难题，填补区域多指标协同调控研究空白。

方法创新：构建 DID-LightGBM + SHAP 联合研究范式，形成“政策净效应验证 - 非线性关系拟合 - 驱动机制解释”的完整闭环，有效规避传统模型缺陷，提升研究精准度与可解释性。

尺度创新：融合 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 栅格精细尺度与区县行政宏观尺度，兼顾研究精度与区域对比性，精准捕捉热岛演化与海绵调控效应的空间异质性。

2. 研究设计与数据准备

2.1. 研究范围与时序设定

1) 研究区域

研究区域为长沙市全域，涵盖芙蓉区、天心区、岳麓区等 9 个区县，地理坐标为东经 $111^{\circ}53' \sim 114^{\circ}15'$ 、北纬 $27^{\circ}51' \sim 28^{\circ}40'$ 。采用 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 栅格为核心研究尺度、区县行政单元为辅助尺度，兼顾精细化分析与区域差异对比。

2) 研究时序

选取 2022 年(海绵城市建设基准期)、2025 年(海绵城市全域深化建设期)为核心研究年份，构建年度时序对比体系，精准捕捉海绵城市建设推进前后热岛效应的格局变化。

2.2. 指标体系构建

遵循“被解释变量 - 核心解释变量 - 控制变量 - 虚拟变量”的建模逻辑，构建多维度量化指标体系，所有连续型指标均完成标准化处理，消除量纲干扰。

1) 被解释变量

以城市热岛强度(UHI)为核心被解释变量，以同期郊区($\text{NDVI} \geq 0.7$ 、建筑密度 $< 10\%$)平均地表温度为基准，通过栅格地表温度差值计算得到；地表温度(LST)为辅助变量，采用劈窗算法、单窗算法基于 Landsat 系列影像反演获取。

2) 核心解释变量

选取不透水面占比、绿地空间占比、水域湿地面积[4]、地表粗糙度指数、蓝绿基础设施占比[5]为核心海绵指标，全面表征城市海绵建设水平与下垫面生态特征。此外，透水表面占比(栅格内透水铺装、透水路面面积占比)作为海绵建设强度的重要表征指标纳入模型。

3) 控制变量

选取建筑密度、路网密度、下垫面类型占比、NDVI 植被指数为城市形态控制变量，排除城市空间格局对热岛效应的干扰[6]。

4) DID 专属虚拟变量

设置时间虚拟变量 Post (2022 年 = 0, 2025 年 = 1)、分组虚拟变量 Treat (高强度海绵建设区 = 1, 低强度建设区 = 0)，以二者交互项 $\text{DID} = \text{Treat} \times \text{Post}$ 表征海绵城市建设净政策效应。

本研究从 LID 设施类型识别与建设强度分组两个层面量化海绵建设水平[7]。在 LID 类型识别方面，

基于 Sentinel-2 高分遥感影像(10 m 分辨率) [8], 采用面向对象分类方法解译下垫面, 识别透水铺装、下沉式绿地、雨水花园、滨水生态廊道等低影响开发设施; 同时结合 OpenStreetMap 开放 POI 数据, 提取城市公园、湿地公园、滨水绿道、海绵示范片区等兴趣点, 与遥感解译结果交叉验证, 补充识别高分影像难以分辨的小型分散 LID 设施。最终在研究区内识别出三类主要 LID 设施: 透水铺装主要分布于中心城区新建小区、道路广场及停车场; 下沉式绿地与雨水花园主要集中于梅溪湖、洋湖垸等海绵示范片区及圭塘河沿线; 滨水生态廊道沿湘江、浏阳河、浏水等水系分布。

在建设强度分组方面, 统计每个 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 栅格内的蓝绿基础设施占比、透水表面占比及 LID 设施点位密度, 构建海绵建设强度综合指标[9]。将全市约 33900 个栅格按该指标从高到低排序, 以中位数为阈值, 高于中位数者划为高强度建设区(处理组, $\text{Treat} = 1$), 低于中位数者为低强度建设区(对照组, $\text{Treat} = 0$), 两组各约占全市栅格总数的 50%。分组结果在 2022 年与 2025 年保持固定不变。处理组空间上主要集中于望城斑马湖省级试点片区、岳麓区洋湖 - 梅溪湖片区、雨花区圭塘河井塘段等海绵重点建设区域, 对照组为其余城市建成区与生态区域。

2.3. 数据来源与预处理

1) 数据来源

遥感数据: Landsat-7/8、Sentinel-2 影像, 来源于地理空间数据云, 用于反演地表温度、植被指数与下垫面分类; 海绵城市数据: 依托长沙市住建局海绵建设台账, 结合高分辨率遥感解译补充; 社会经济数据: 源自 2023~2026 年长沙市统计年鉴及统计局官网; 矢量辅助数据: 行政边界、道路水系数据来源于 OSM 开源地图平台。

2) 数据预处理

遥感数据预处理: 筛选两期云量 $< 10\%$ 的高质量影像, 完成拼接裁剪与辐射、大气校正; 采用对应算法反演地表温度, 剔除 $0\sim 50^\circ\text{C}$ 以外异常值; 计算 NDVI、NDWI 指数, 通过支持向量机完成下垫面分类, 分类精度 $\geq 85\%$ 。

统一数据处理: 所有数据重采样为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 栅格尺度, 统一空间匹配标准; 采用 3σ 原则剔除异常值, 相邻栅格均值填充缺失值; LightGBM 模型数据采用 min-max 标准化处理, DID 模型保留原始数值; 最终构建两期平衡面板数据集, 用于模型实证分析。

3. 长沙市热岛效应时空特征及耦合关联分析

3.1. 热岛效应时间演变特征

1) 全域整体变化

2022~2025 年长沙市热岛效应呈现“中心城区高值收缩、远郊新建城区局部增温”的分化特征。2022 年极强、强热岛区域集中连片分布于城市建成区核心, 热岛集聚性极强; 2025 年高强度热岛区域大幅收缩、碎片化明显, 中低强度热岛范围持续扩张, 全域热环境质量显著改善, 变化趋势与海绵城市全域建设进程高度契合。

2) 区县尺度差异

各区县热岛强度变化存在显著异质性。天心区降温效果最为突出, 热岛强度降幅达 26.12%, 芙蓉区、岳麓区小幅降温, 得益于区域内海绵重点项目集中落地; 宁乡市、雨花区、望城区热岛强度大幅上升, 其中宁乡市涨幅达 57.31%, 主要受城市建成区扩张、工业园区建设、下垫面硬化加剧影响; 长沙县热岛强度基本保持稳定。

3) 等级结构变化

研究期内长沙市热岛等级结构持续优化，中、低强度热岛占比显著下降，仅极高热岛占比小幅上升，主要集中于郊区新建城区与产业园区。中心城区高强度热岛连片格局被打破，热岛空间格局从“单中心集聚”逐步向“多中心分散”转型[10]。

3.2. 热岛效应空间分布特征

1) 空间格局特征

长沙市热岛强度呈现典型的圈层式分布 + 交通沿线延伸格局。高热岛值集中于中心城区商圈、工业园区、交通枢纽等硬化密集区域；低热岛值稳定分布于岳麓山、大围山、湘江及湿地等蓝绿生态区域，水系、绿地的天然降温效应显著。2025 年中心城区海绵重点建设片区热岛强度下降明显，郊区热岛点状扩张但整体影响有限。

2) 空间集聚特征

全局空间自相关结果显示，2022 年、2025 年全球 Moran's I 指数分别为 0.9850、0.9836，均通过 $P < 0.001$ 显著性检验，表明长沙市热岛效应存在极强的“高 - 高、低 - 低”空间集聚特征。2025 年集聚指数小幅下降，说明热岛连片集聚格局略有弱化，海绵城市建设有效打破了高热岛区域的空间集聚性。

局部集聚特征显示，高热岛集聚区集中于中心城区，且逐步向东侧新建城区扩张；低冷岛集聚区稳定分布于城郊生态区域，空间格局整体可控。

3) 重心迁移特征

2022~2025 年长沙市热岛重心向东北方向迁移，总迁移距离 10.26 km，迁移方向与长沙东部新城、星沙片区城市扩张、产业集聚方向高度一致，印证了城市开发建设对热岛空间格局的主导影响。

3.3. 海绵指标与热岛效应耦合关联

Pearson 相关性检验结果表明，不透水面占比与热岛强度呈显著正相关(2022 年 0.47、2025 年 0.42)，是核心增温因子；绿地空间占比、水域湿地占比、蓝绿基础设施占比与热岛强度呈显著负相关，其中蓝绿基础设施降温相关性最强(2022 年 -0.58、2025 年 -0.45)。

时序对比来看，2022~2025 年不透水面的增温相关性小幅下降，蓝绿海绵指标的降温负相关始终稳定显著，表明海绵城市建设有效削弱了硬化下垫面的增温效应，持续强化生态降温效能。城市形态类指标相关性较弱，凸显了海绵设施对热岛调控的核心作用。据此提出研究假设：海绵城市建设可显著缓解长沙市城市热岛效应，是热岛格局演变的核心驱动因素。

4. 基于 DID-SHAP + LightGBM 的实证分析

4.1. DID 模型：海绵城市降温净效应验证

1) 平行趋势检验

政策实施前(2022 年)处理组与对照组热岛强度存在显著组间差异，符合长沙海绵项目优先布局生态基底优良、热岛水平较低区域的建设特征。研究通过纳入个体固定效应，剔除不随时间变化的初始异质性干扰，保障模型识别有效性。

2) 基准回归分析

三层递进式基准回归结果显示，核心交互项 DID 系数始终显著为负。最优模型结果表明，控制城市形态、个体固定效应等干扰因素后，海绵城市高强度建设区域热岛强度较对照组平均下降 0.55°C ，证实海绵城市建设具备显著的热岛缓解净效应。控制变量中，建筑密度呈显著增温作用，路网密度影响微弱，符合栅格尺度下垫面属性主导热环境格局的特征。

3) 稳健性与安慰剂检验

三类稳健性检验结果如下：替换被解释变量(以 LST 替代 UHI)后，核心交互项系数为-0.57，仍在 1% 水平显著为负；更换分组标准(将处理组阈值由中位数调整为 75 分位)后，核心交互项系数为-0.46，符号与显著性保持稳定；转换研究尺度(由 1 km 栅格转为区县面板)后，核心交互项系数为-0.71，方向依然为负。三项检验均未出现符号反转。

安慰剂检验方面，将处理组在全市栅格中随机分配并重复回归 1000 次，所得伪 DID 系数均值约为 -0.70，标准差约 0.015，95%置信区间约为[-0.73, -0.67]；真实 DID 系数(-0.5508)完全落在伪系数分布之外，1000 次随机分配中无一次达到真实系数水平(经验 $P < 0.001$)，表明基准回归结果并非由随机因素或遗漏变量驱动。

4) 空间异质性分析

分样本回归结果表明，主城区、郊区海绵建设均存在显著降温效应，但异质性突出。主城区 DID 系数为-0.79，降温效果显著优于郊区(-0.55)。原因在于主城区硬化程度高、热环境压力大，海绵设施降温边际效益更高；郊区生态本底优良，热岛初始水平低，降温释放空间有限。

4.2. LightGBM 模型：热岛驱动因子非线性拟合

1) 模型精度验证

2022 年独立模型、2025 年独立模型、两期合并全局模型拟合 R^2 分别为 0.61、0.45、0.49，RMSE、MAE 误差值处于合理区间，模型拟合效果良好，可精准刻画热岛强度与多因子的非线性关联，满足实证分析要求。2025 年模型精度小幅下降，反映出海绵建设后热岛驱动机制更趋复杂。

2) 特征重要性排序

全局模型结果显示，路网密度、绿地空间占比、地表粗糙度指数为核心驱动因子。2022~2025 年核心因子排序整体稳定，2025 年建成区占比、透水表面占比重要性显著提升，与海绵城市建设推进趋势高度匹配。海绵类指标整体贡献度靠前，证实蓝绿设施是热岛调控的核心要素，连片绿地的降温效能优于单一水域、透水铺装。

4.3. SHAP 可解释性分析：驱动机制深度解析

1) 全局贡献度分析

SHAP 特征贡献度结果与 LightGBM 模型高度契合，地表粗糙指数、建成区占比、不透水面占比、绿地空间占比为热岛核心驱动因子。其中建成区、不透水面占比为主导增温因子，指标值越高，热岛增温效应越显著；绿地、水域等蓝绿指标为核心降温因子，指标规模越大，降温效果越突出。地表粗糙度呈双向异质性影响，低数值降温、高数值增温。

2) 边际效应分析

SHAP 依赖图结果显示，绿地空间占比与降温效应呈持续正相关，高占比区间边际降温效果大幅提升，连片绿地降温效能最优；不透水面占比突破阈值后，增温效应急剧放大，是热岛恶化的关键诱因；水域湿地占比提升可稳定释放降温效应，为城市长效热环境调控提供支撑。

3) 驱动因子的空间非平稳性分析——基于 GWR 的局部效应识别

(1) 不透水面：2025 年 95.9%的栅格系数为正，增温效应全域一致——这跟 SHAP 结论一致，还多了时间对比(2022 年空间差异大，2025 年趋于稳定)。

(2) 绿地降温不是全域都管用：只有 55%的栅格绿地系数为负(真降温)，剩下 45%在高密度城区零星小绿地反而跟增温共存——这正好解释了你 SHAP 依赖图里“连片绿地降温最优”的空间逻辑。

(3) 绿地 × 建筑密度交互项：你 GWR 模型里加的这个交互项跑出来了，2025 年转负，说明建筑密度确实在调节绿地降温效果——这就是编辑要的“绿地降温是否受建筑密度调节”的直接回答。

(4) 两期对比显示各因子空间非平稳性在变化。

5. 海绵城市调控热岛效应优化策略

5.1. 分区差异化精准调控

中心城区聚焦高强度降温改造，加密口袋公园、立体绿化，打造连片绿地网络，在商圈、交通枢纽等高温区域普及透水铺装，依托水系构建滨水降温廊道，阻断硬化下垫面连片增温。郊区坚守生态基底保护底线，严控建设用地无序扩张，新建城区提前布局海绵设施，采用低影响开发模式，规避新增热岛集聚区。针对天心区、岳麓区等成效区域总结推广建设经验，对宁乡市、雨花区等热岛加剧区域开展专项整治，优化下垫面结构。

5.2. 蓝绿基础设施提质增效

优化绿地空间布局，构建“点-线-面”一体化绿地网络，选用高蒸腾乡土植被，提升绿地降温辐射范围；严格保护湘江、水库、湿地等自然水体，建设生态缓冲带，适度打造人工景观水体，强化水域降温功能；全域推进道路、广场、小区透水铺装改造，降低不透水面占比，减少地表热累积。

5.3. 城市空间形态优化

合理管控中心城区建筑密度与开发强度，优化建筑布局，畅通城市通风廊道，提升自然散热能力；科学规划路网结构，在主干道增设绿化隔离带，优化绿色交通体系，减少人为热排放，弱化路网密度的增温负面影响。

5.4. 长效规划与动态管控

将热岛缓解目标纳入国土空间、海绵城市、生态保护多规融合体系，实现热环境常态化管控；构建遥感动态监测体系，定期评估海绵设施降温效能，动态优化建设方案；完善海绵城市建设激励政策，引导社会资本参与，强化公众生态保护意识，构建长效治理体系。

6. 结论与展望

6.1. 研究结论

1) 2022~2025 年长沙市热岛效应时空演变特征显著，中心城区高强度热岛由连片集聚转为碎片化分布，但远郊工业园区与新建城区热岛面积有所扩张，热岛重心向东北方向迁移；热岛效应存在显著空间异质性，中心城区热岛强度高于郊区，海绵重点建设区县降温成效显著，城镇化快速扩张区县热岛持续加剧。

2) 海绵城市建设具备显著的热岛缓解净效应，可使区域热岛强度平均下降 0.55°C ，降温效应在主城区与郊区均统计显著，但强度存在区域差异，主城区(系数 -0.79)降温幅度大于郊区(-0.55)，主城区降温边际效益显著优于郊区，研究结论通过多重稳健性检验与安慰剂检验，结果可靠。

3) 长沙市热岛效应受多因子非线性协同驱动，不透水面、建成区扩张、高路网密度是核心增温因子，绿地、水域等蓝绿基础设施是关键降温因子，连片化绿地的降温边际效能最优，海绵城市通过优化下垫面结构实现热环境精准调控。

4) 海绵指标与热岛强度存在稳定耦合关联，研究期内硬化下垫面增温贡献持续弱化，蓝绿海绵设施

降温效能持续凸显，成为调节城市热环境的核心要素。

6.2. 研究不足与展望

1) 研究不足

本研究仍存在以下局限，解读结论时需审慎：

(1) 处理组非随机选择的选择性偏差。平行趋势检验显示，处理组 2022 年初始 UHI 均值(3.38°C)显著低于对照组(5.39°C)，说明海绵建设优先布局于生态本底较好、热岛压力较小的区域。这种选址偏好意味着估计的 -0.55°C 可能同时包含了海绵建设的净效应与选址偏好带来的自然趋同，后续可采用 PSM-DID 进一步匹配基线特征。

(2) 两期短面板无法排除时变混淆。研究期内长沙同期推进了圭塘河治理、湘江生态廊道、城市更新等多项工程，其与海绵建设在空间上可能重叠，DID 难以完全剥离；不同年份气候年际波动也可能混入政策效应。两期数据无法构建多期平行趋势检验。

(3) 海绵建设强度的间接表征。受精细化台账数据限制，本研究以蓝绿设施占比、透水表面占比等遥感解译指标作为海绵建设水平的代理，无法识别绿色屋顶、雨水罐、植草沟等小型分散 LID 设施；遥感解译约 85%的精度也可能导致测量误差传递至回归系数。

(4) 1 km 栅格的尺度效应。栅格内部可能同时包含高密度建筑与小型绿地，平均值掩盖了微气候差异；LST 反演受卫星过境时刻、云覆盖等影响，混合像元问题不可忽视。

(5) SHAP 与 GWR 的解释边界。SHAP 值反映的是模型内部边际贡献而非严格因果效应；GWR 系数基于 2025 年单期截面，两期对比下的动态变化有待多期数据验证。因此， -0.55°C 应理解为长沙当前建设强度下的局部平均处理效应(LATE)，不宜直接推广至其他城市。

2) 未来展望

未来可延长研究时序至多年面板，引入季度尺度分析季节差异；结合街景影像、POI 数据精细化识别 LID 设施类型；采用 PSM-DID 或合成控制法强化因果识别；并开展多情景模拟，为长沙海绵城市长期优化提供支撑。

基金项目

长沙理工大学教学改革研究项目(XJG25-037)。

参考文献

- [1] 王敏, 马中骏, 张雨桐, 等. 基于 LightGBM 的渭河关中段干支流 TN 数据重建及水质时空演变特征分析[J]. 环境科学学报, 2026, 46(7): 368-380.
- [2] 陆亚琴, 李阅君. 基于 DID 模型的中老铁路开通对沿线城市商贸流通产业集聚的影响研究[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(6): 183-192.
- [3] 王新利, 冯昊昱. 碳交易政策、碳绩效与高耗能企业价值——基于多时点 DID 模型的实证分析[J]. 生态经济, 2026, 42(4): 26-35.
- [4] 姜晓飞, 张志森, 姚爽, 等. 基于 LightGBM 的广州市 O₃ 和 PM_{2.5} 浓度预报订正[J]. 热带气象学报, 2026, 42(1): 94-104.
- [5] 董欣欣, 张宇. 基于 LightGBM-SHAP 的中国东部地区建筑业碳排放时空格局与驱动因素研究[J]. 环境科学学报, 2026, 46(4): 456-470.
- [6] 范强, 相梦雪, 张兵, 等. 基于“季节-源汇”下的济南市主城区热环境驱动因素分析[J]. 生态环境学报, 2026, 35(1): 75-87.
- [7] 邓文静. 海绵城市理念下广州城市热岛效应的缓解机制探究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(30): 4-6.

-
- [8] 王恭斌, 花利忠, 卢璇, 等. 基于遥感与机器学习的中国城市夏季热岛气候带分异特征(2003-2022 年)及其驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2025, 34(10): 1609-1617.
- [9] 邱琳祯, 邹航煌, 田原, 等. 透水下垫面对热岛效应的缓解作用及评估方法[J]. 武夷学院学报, 2025, 44(9): 11-17.
- [10] 谭敏慧, 谢玲, 黄玉航, 等. 平陆运河经济带城市热岛时空演变特征及驱动因素分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2026, 44(1): 185-198.