

呼和浩特市主城区夏季地表城市热岛强度昼夜差异及其统计关联

黄易铎, 雷 军

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2026年4月13日; 录用日期: 2026年6月11日; 发布日期: 2026年6月24日

摘 要

以呼和浩特市主城区为研究对象, 基于2013~2023年夏季TRIMS LST数据, 结合GUB动态边界、GAIA建成区数据、MNDWI及ERA5-Land派生的相对湿度(RH)和风速(WS)数据, 分析地表城市热岛强度(SUHII)的昼夜年际变化、边界外扩梯度特征及其与建成环境和背景因子的统计关系。结果表明: 2013~2023年主城区夏季白天SUHII均值为1.7779, 变化范围为0.3867~3.0729; 夜间均值为2.4887, 变化范围为1.9135~3.2499, 夜间均值高于白天且变化相对更稳定。白天SUHII线性趋势较弱, 整体以年际波动为主; 夜间SUHII表现为弱下降趋势。沿主城区边界外扩0~10 km梯度带, 白天和夜间SUHII均随距离增加而明显衰减, 其中1~5 km范围内变化最为显著, 表现出较典型的“中心较强、外围减弱”空间结构; 相比之下, MNDWI沿梯度带变化幅度较小。年度尺度相关分析表明, 白天SUHII与RH和ISA ratio (不透水面比例)的相关程度相对较高但未达显著, 夜间SUHII与景观格局指标, 尤其是AI, 呈较明确负相关。总体上, 呼和浩特市主城区夏季SUHII具有明显昼夜差异, 不同环境因子与SUHII的统计关联在昼夜尺度上存在差异, 相关结果可为北方半干旱城市热环境监测与精细化调控提供参考。

关键词

呼和浩特市, 地表城市热岛强度, 昼夜差异

Day-Night Differences and Statistical Associations of Summer Surface Urban Heat Island Intensity in the Main Urban Area of Hohhot, China

Yiduo Huang, Jun Lei

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

Received: April 13, 2026; accepted: June 11, 2026; published: June 24, 2026

Abstract

Taking the main urban area of Hohhot as the study area, this study analyzed the interannual day-night variations of surface urban heat island intensity (SUHII), its outward gradient pattern, and its statistical associations with built environment and background factors based on summer TRIMS LST data from 2013 to 2023, combined with GUB dynamic urban boundaries, GAIA built-up area data, MNDWI, and ERA5-Land-derived relative humidity (RH) and wind speed (WS). The results showed that the mean daytime SUHII was 1.7779, ranging from 0.3867 to 3.0729, whereas the mean nighttime SUHII was 2.4887, ranging from 1.9135 to 3.2499. Nighttime SUHII was higher than daytime SUHII and showed relatively more stable interannual variation. Daytime SUHII exhibited no evident linear trend and was mainly characterized by interannual fluctuations, while nighttime SUHII showed a weak decreasing trend. Along the 0~10 km outward gradient from the main urban boundary, both daytime and nighttime SUHII decreased significantly with increasing distance, with the most pronounced changes occurring within 1~5 km, indicating a typical spatial structure of stronger heat island intensity in the urban core and weaker intensity toward the periphery. In contrast, MNDWI varied only slightly along the gradient. Correlation analysis at the annual scale indicated that daytime SUHII was relatively more related to RH and ISA ratio, although these relationships were not statistically significant, whereas nighttime SUHII showed clearer negative correlations with landscape pattern metrics, especially AI. Overall, the summer SUHII in Hohhot exhibits evident day-night differences, and the statistical associations between SUHII and environmental factors differ between daytime and nighttime. These results provide a reference for thermal environment monitoring and refined regulation in semi-arid cities of northern China.

Keywords

Hohhot City, Surface Urban Heat Island Intensity, Day-Night Difference

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

城市热环境是城市化进程中的重要生态环境问题。随着建成区扩张、不透水面增加及地表景观格局调整,城市地表能量平衡、水热交换和热量存储过程发生改变,进而导致地表温度升高和热岛效应增强[1]-[3]。相较于气温热岛,地表热岛更易借助遥感数据进行连续监测,因此已成为城市气候与城市生态研究的重要内容[1][4]。对于北方半干旱城市而言,受下垫面增温效应、水分条件约束及背景气候波动共同影响,地表热环境在昼夜尺度上往往表现出更明显的差异[2][5][6]。

已有研究表明,城市热环境变化不仅与建成区扩张有关,也与建成环境的空间组织方式、地表湿润背景及背景气象条件密切相关[2][3][7]。不透水面比例增加通常会增强地表吸热与蓄热能力,水体、植被及较高湿润度则具有一定降温和缓冲作用;同时,建成区景观格局的聚集程度、边界复杂度和斑块破碎程度变化,也可能影响热环境的空间配置[3][6][8]。相对湿度和风速等背景气象因子在年际尺度上亦会对城市热环境产生一定影响[3][7]。总体来看,现有研究已在热岛空间格局识别、地表覆盖差异比较及景观格局响应等方面取得较多成果,但在研究单元设定、昼夜差异比较以及多类型因子联合分析方面仍有进一步深化空间[1]-[3]。

呼和浩特市地处北方半干旱地区, 近年来主城区建成环境持续调整, 热环境演变具有一定代表性。已有研究多关注地表温度时空分布、一般热岛格局识别或景观格局与热环境的对应关系, 但对动态主城区边界约束下地表城市热岛强度(surface urban heat island intensity, SUHII)昼夜差异、主城区向外围的梯度衰减, 以及建成环境、水体背景和背景气象条件之间统计关系的综合比较仍显不足。特别是, 在研究单元选择上, 若直接采用年际变化明显的建成区边界进行热环境主统计, 容易削弱年际比较的可比性; 若忽略建成区扩张信息, 又难以反映城市形态演变背景。因此, 有必要在热环境主分析边界与建成环境辅助边界之间建立较清晰的分工框架[9] [10]。

基于此, 本文以呼和浩特市为研究对象, 选取 2013~2023 年夏季为研究时段, 在区分 GUB 主分析边界与 GAIA 辅助边界用途的基础上, 重点探讨以下问题: (1) 2013~2023 年夏季主城区白天和夜间 SUHII 的年际变化特征; (2) 主城区边界外扩梯度上 SUHII 与 MNDWI 的空间变化规律; (3) 主城区年度尺度上建成环境比例、景观格局、水体背景及背景气象条件与 SUHII 的统计关联差异。

2. 研究区与数据来源

2.1. 研究区概况

呼和浩特市位于内蒙古自治区中部, 属典型的北方半干旱地区。受区域自然背景、城市建设活动及下垫面差异共同影响, 其夏季地表热环境具有较明显的空间异质性和昼夜差异。近年来, 随着主城区建成环境持续调整, 不透水面比例、景观格局及地表湿润背景均发生一定变化, 为开展城市热环境时序分析提供了基础。为兼顾空间展示与统计分析的不同需求, 本文区分全域展示范围与主城区统计范围: 呼和浩特市全域用于 SUHII 空间分布展示, 主城区作为年度统计、梯度分析和相关分析的核心研究单元。考虑到研究期内主城区空间范围存在阶段性变化, 本文选取 GUB 2015 和 GUB 2018 两期边界作为 SUHII 主分析边界, 其中 2013~2016 年采用 GUB 2015, 2017~2023 年采用 GUB 2018, 以增强年际比较中研究单元的一致性。GUB 是基于 GAIA 数据构建的多时相全球城市边界数据, 适用于城市边界识别及城市化影响研究。

2.2. 数据来源

本文所用数据主要包括 TRIMS LST (中国陆域及周边逐日 1 km 全天候地表温度数据集)、GUB 城市边界数据、GAIA 年度建成区数据、景观指数数据、MNDWI (改进的归一化差异水体指数)年度栅格以及 ERA5-Land 派生的相对湿度(RH)和风速(WS)数据。其中, TRIMS LST 为逐日 1 km 全天候地表温度数据集[4]; GUB 数据用于确定主城区主分析边界[9]; GAIA 年度建成区数据用于提取主城区不透水面比例 (ISA ratio) [10]; MNDWI 年度栅格和 ERA5-Land 数据均通过 Google Earth Engine (GEE)平台获取、处理和导出[11] [12]。本文基于 TRIMS LST 夏季白天和夜间地表温度进一步计算 SUHII, 并用于主城区和梯度带尺度统计分析; 同时结合景观指数和 MNDWI 分别表征建成环境变化特征与地表湿润背景, 并利用 ERA5-Land 派生的 RH 和 WS 表征背景气象条件。为保证多源数据在空间统计中的一致性, 本文统一以年度 SUHII 栅格作为参考网格, 对相关变量进行空间对齐、裁剪和掩膜统计。TRIMS LST 具有全天候、1 km 分辨率和长时间序列等特点[4], GUB 适用于城市边界识别及城市化影响研究[9], ERA5-Land 能够提供陆面水热过程的一致性时空信息[11]。

在边界数据使用上, 本文对 GUB 与 GAIA 进行功能区分: GUB 动态边界用于 SUHII 主城区统计和梯度带构建, 以建立相对稳定的热环境主分析单元; GAIA 数据主要用于建成区扩张和景观演变描述, 以补充表征研究期内城市形态变化特征。两类数据在研究中相互补充, 但不混合作为同一统计边界, 以减少不同空间支撑单元混用对结果解释的干扰。研究所用主要数据及用途见表 1。

Table 1. Main data sources and their purposes**表 1.** 研究所用主要数据及用途

数据类型	时间范围	主要指标	主要用途
TRIMS LST	2013~2023 年	白天地表温度、夜间地表温度	SUHII 计算、全域空间分布展示、主城区统计、梯度带统计
GAIA 年度建成区栅格	2013~2023 年	ISA ratio (不透水面比例)	主城区年度建成环境统计
GAIA 多期建成区边界	2013、2018、2023 年	建成区扩张范围	建成区扩张与景观演变补充分析
景观指数数据	2013~2023 年	AI (聚集度)、LSI (边界复杂度)、PD (斑块密度)	主城区景观格局年际变化分析
MNDWI 栅格	2013~2023 年	MNDWI	主城区及梯度带湿润背景统计
ERA5 背景气象数据	2013~2023 年	RH、WS	背景气象条件统计分析

3. 数据预处理与分析方法

3.1. 数据预处理

由于多源遥感数据分辨率差异较大(从 30 米到 1 公里),通过将其全部重采样至最粗的 1 公里分辨率,以避免引入任何不确定性或偏差。通过这种方式,最大限度地降低了使用不同分辨率数据源对分析有效性的影响。同时为保证多源数据在空间统计中的一致性,本文对数据统一坐标系,空间对齐、裁剪和掩膜统计,以保证不同变量开展后续统计分析。

3.2. SUHII 计算与主分析边界设定

本文所用 SUHII 基于 TRIMS LST 夏季白天和夜间地表温度计算得到。参考等面积多圈缓冲区方法 [13],本文在城市主分析边界外构建 12 个等面积缓冲带,每个缓冲带面积为城市市区面积的 1/2,并以最外侧第 10~12 缓冲带作为乡村参考区。设 $p \in \{\text{day, night}\}$ 表示昼夜条件,则乡村参考温度定义为第 10、11 和 12 缓冲带平均地表温度的中位数:

$$T_{f,p} = \text{median}(T_{10,p}, T_{11,p}, T_{12,p}) \quad (1)$$

第 i 个圈层相对于乡村参考区的温度差定义为:

$$\Delta T_{i,p} = T_{i,p} - T_{f,p}, \quad i = 0, 1, \dots, 12 \quad (2)$$

其中, $i = 0$ 表示城市主分析区。由此, SUHII 可表示为:

$$\text{SUHII}_{p,y} = \bar{T}_{u,p,y}(B_y) - T_{f,p,y} = \Delta T_{0,p,y} \quad (3)$$

式中, $\bar{T}_{u,p,y}(B_y)$ 表示年份 y 在主分析边界 B_y 内的平均地表温度, $T_{f,p,y}$ 表示相应年份和昼夜条件下的乡村参考温度。主分析边界沿用参考研究基于 GUB 的动态边界思路,并结合本文研究时段采用分段边界策略,即 2013~2016 年使用 GUB 2015, 2017~2023 年使用 GUB 2018; 其中 GUB 用于 SUHII 主城区统计和梯度带构建, GAIA 仅用于不透水面比例提取及建成区扩张与景观格局变化的辅助分析。

3.3. 主城区年度统计与趋势分析

在主城区年度尺度上,本文分别提取白天和夜间 SUHII 均值,以及 ISA ratio、MNDWI、RH、WS 和景观指数等变量的年度统计结果,构建 2013~2023 年主城区年度统计表。在此基础上,对各变量的年际变化特征进行描述,并采用线性拟合方法识别其变化方向与相对变化幅度。

考虑到研究期仅包含 11 个年度样本, 本文趋势分析主要用于刻画变量在研究期内的总体变化方向和相对变化特征, 而不作为长期稳定趋势的唯一判据。对白天和夜间 SUHII, 重点比较其年际波动、均值差异及趋势方向; 对建成环境、湿润背景和背景气象变量, 则重点分析其与 SUHII 年际变化在方向和幅度上的对应关系。

3.4. 梯度带与补充空间分析

以对应年份的 GUB 主分析边界为基础, 向外构建 0~10 km 梯度带, 并按 1 km 间隔划分环带单元。分别统计各环带内白天和夜间 SUHII 及 MNDWI 的平均值, 用于分析主城区热环境及湿润背景沿边界外扩方向的变化特征。梯度带分析主要用于识别热环境由主城区向外围的衰减规律, 并比较昼夜条件下空间梯度变化的差异。

3.5. 相关分析

在主城区年度尺度上, 本文采用 Pearson 相关分析和 Spearman 秩相关分析比较 SUHII 与 ISA ratio、MNDWI、RH、WS 及景观格局指标之间的统计关系。考虑到研究期仅包含 11 个年度样本, 相关分析结果主要用于识别变量间统计关联的方向、强弱及显著性特征, 而不作严格因果推断。

4. 结果与分析

4.1. 主城区白天和夜间 SUHII 年际变化特征

基于 GUB 分段动态主城区边界的年度统计结果, 2013~2023 年呼和浩特市主城区夏季白天 SUHII 均值为 1.7779, 变化范围为 0.3867~3.0729; 夜间 SUHII 均值为 2.4887, 变化范围为 1.9135~3.2499。总体上, 夜间 SUHII 均值高于白天, 且波动范围相对较小, 表明主城区夏季热环境在夜间具有更强的持续性。其年际变化见图 1, 统计摘要见表 2。

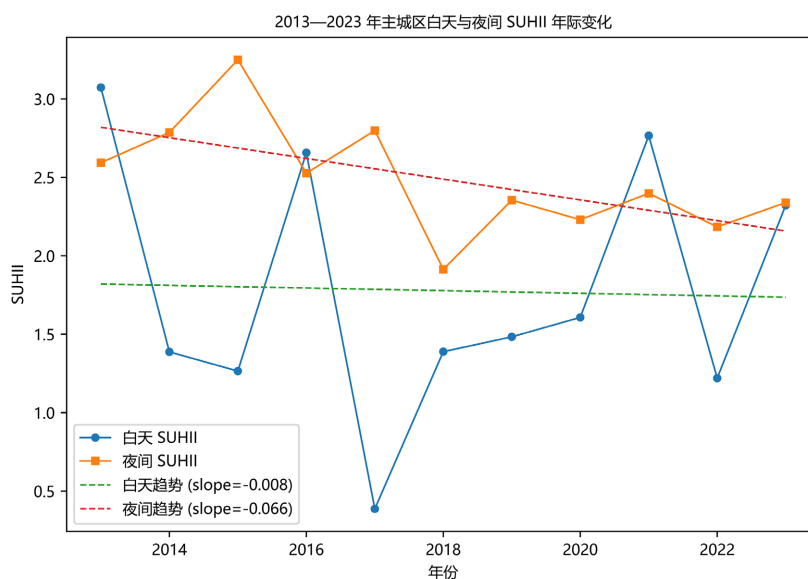
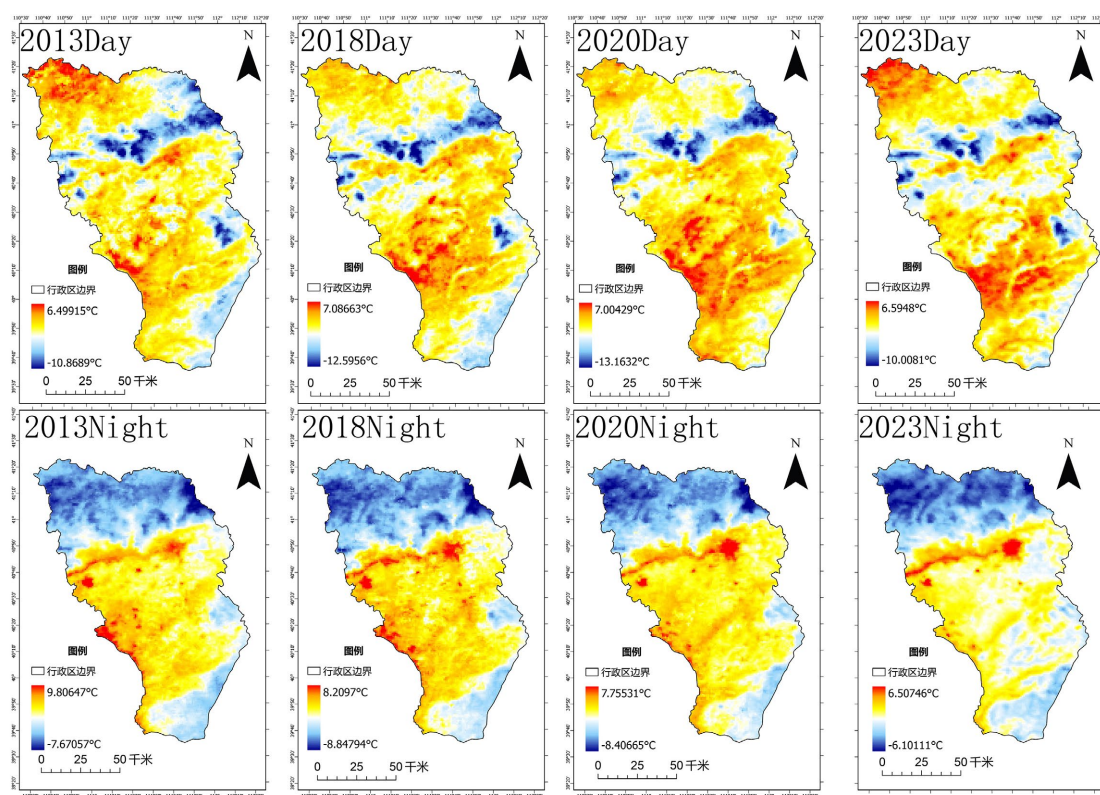


Figure 1. Interannual variations of daytime and nighttime SUHII in the main urban area from 2013 to 2023
图 1. 2013~2023 年主城区白天与夜间 SUHII 年际变化

线性拟合结果表明, 白天 SUHII 趋势斜率为 -0.0084 , $R^2 = 0.0012$, $p = 0.9206$, 说明研究期内白天 SUHII 未表现出明显线性变化, 整体以年际波动为主。2013 年白天 SUHII 为 3.0729, 2017 年降至 0.3867,

2021年回升至2.7662,至2023年为2.3218,波动特征较为明显。夜间SUHII趋势斜率为 -0.0661 , $R^2 = 0.3654$, $p = 0.0488$,表现为弱下降趋势,并达到边缘显著水平。其值由2013年的2.5935波动升至2015年的3.2499,随后总体下降,至2023年为2.3394。

综合来看,2013~2023年呼和浩特市主城区夏季SUHII表现出较明显的昼夜差异:白天以波动变化为主,夜间则相对稳定并呈弱下降趋势。结合全域SUHII栅格可见,较高值区总体集中于建成环境连续分布区域,部分年份在主城区及近邻区域出现局部强化现象,典型年份空间格局见图2。



注:该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为审图号:GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改。下同。

Figure 2. Spatial distribution of daytime and nighttime SUHII in Hohhot during typical summers

图 2. 典型年份呼和浩特市夏季白天与夜间 SUHII 空间分布

Table 2. Summary of interannual variations in daytime and nighttime SUHII in the main urban area of Hohhot, 2013~2023

表 2. 2013~2023 年主城区白天与夜间 SUHII 年际变化摘要

指标	白天 SUHII	夜间 SUHII
最小值	0.3867	1.9135
最大值	3.0729	3.2499
均值	1.7779	2.4887
2013 年	3.0729	2.5935
2023 年	2.3218	2.3394
斜率	-0.0084	-0.0661
R^2	0.0012	0.3654
p 值	0.9206	0.0488

4.2. 主城区 ISA Ratio、景观指数、MNDWI、RH 和 WS 的变化特征

2013~2023 年, 主城区 ISA ratio 由 0.7102 增至 0.7743, 趋势斜率为 0.0014, $R^2=0.0207$, $p=0.6731$, 表明研究期内不透水面比例总体呈小幅上升, 但线性趋势不显著。相比之下, 景观格局指标变化更为一致: AI 由 80.0490 增至 83.4722, 趋势斜率为 0.2969, $R^2=0.8706$, $p<0.001$; LSI 由 154.3981 增至 166.3463, 趋势斜率为 1.3583, $R^2=0.8164$, $p=0.0001$; PD 由 0.5365 增至 0.5893, 趋势斜率为 0.0068, $R^2=0.6923$, $p=0.0015$ 。上述结果表明, 研究期内主城区建成环境变化不仅表现为面积比例变化, 也体现为景观格局持续调整。变化趋势见图 3, 统计结果见表 3。

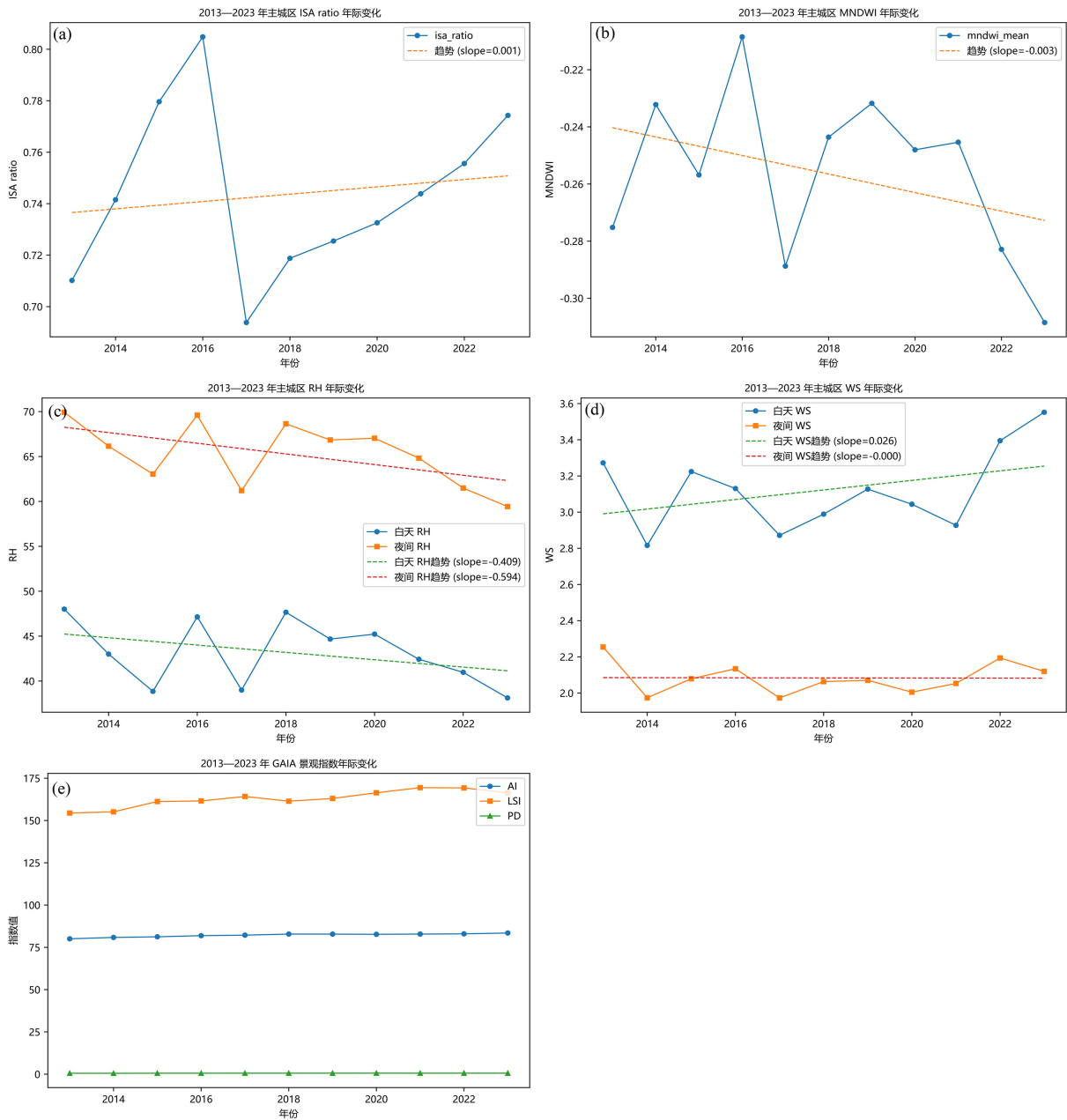


Figure 3. Interannual variations of main environmental variables in the main urban area from 2013 to 2023

图 3. 2013~2023 年主城区主要环境变量年际变化

湿润背景和背景气象条件整体上表现为一定程度的减弱或波动。MNDWI 由-0.2752 下降至-0.3085, 趋势斜率为-0.0032, $R^2 = 0.1338$, $p = 0.2686$, 说明湿润背景总体呈轻微减弱趋势。白天 RH 由 48.0075 下降至 38.1242, 夜间 RH 由 69.9265 下降至 59.4315, 其中夜间 RH 的下降幅度相对更大; 白天 WS 由 3.2722 增至 3.5520, 而夜间 WS 由 2.2545 降至 2.1197, 整体变化幅度较小。总体来看, 研究期内主城区环境背景表现为不透水面比例和景观格局指标上升、湿润背景和相对湿度下降、风速变化相对平缓, 这为后续分析 SUHII 与相关变量之间的统计关系提供了背景依据。

Table 3. Summary of variations in main environmental variables in the main urban area from 2013 to 2023

表 3. 2013~2023 年主城区主要环境变量变化摘要

指标	2013 年	2023 年	斜率	R^2	p 值
ISA ratio	0.7102	0.7743	0.0014	0.0207	0.6731
MNDWI	-0.2752	-0.3085	-0.0032	0.1338	0.2686
RH (白天)	48.0075	38.1242	-0.4088	0.1385	0.2598
RH (夜间)	69.9265	59.4315	-0.5937	0.3022	0.0798
WS (白天)	3.2722	3.5520	0.0264	0.1502	0.2389
WS (夜间)	2.2545	2.1197	-0.0003	0.0001	0.9731
AI	80.0490	83.4722	0.2969	0.8706	<0.001
LSI	154.3981	166.3463	1.3583	0.8164	0.0001
PD	0.5365	0.5893	0.0068	0.6923	0.0015

4.3. 主城区外扩梯度带 SUHII 与 MNDWI 的空间变化规律

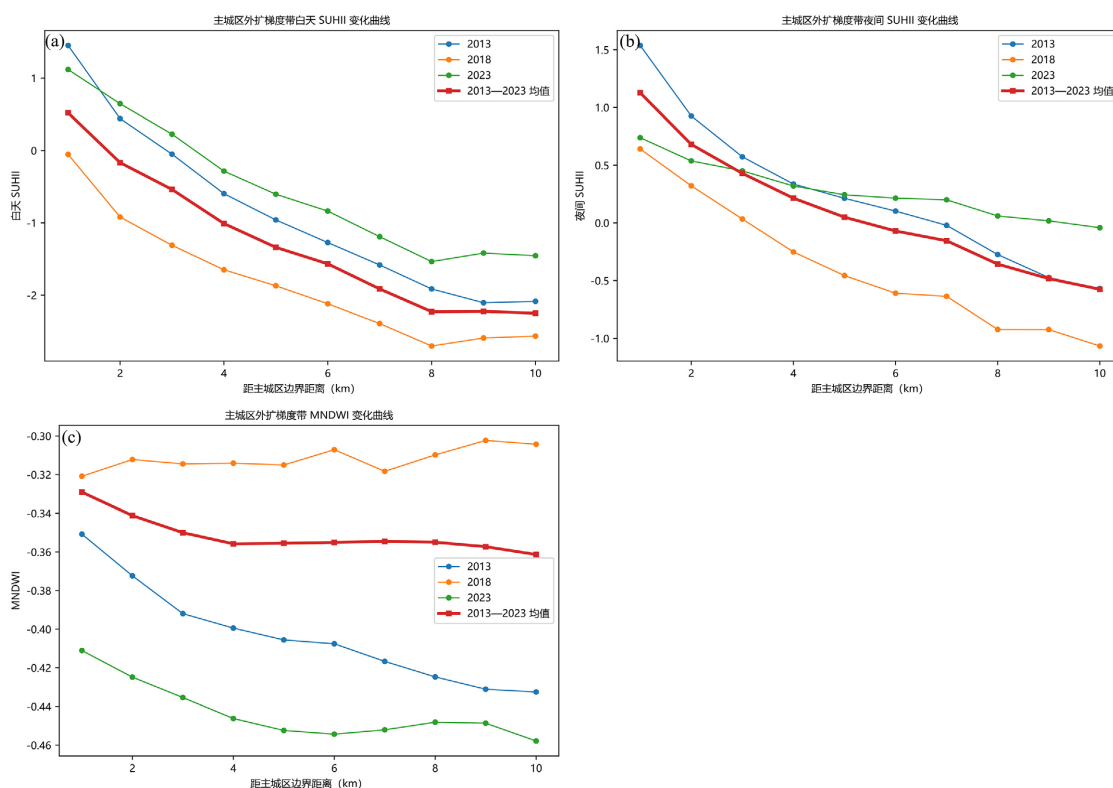


Figure 4. Variation curves of daytime and nighttime SUHII along the 0~10 km outward buffer zones from the main urban area
图 4. 主城区外扩 0~10 km 梯度带白天与夜间 SUHII 变化曲线

基于 GUB 分段动态主城区边界构建的 0~10 km 外扩梯度带结果表明, 主城区热环境沿边界外扩方向呈明显衰减。按 2013~2023 年多年平均值计算, 白天 SUHII 由距边界 1 km 环带的 0.5200 下降至 10 km 环带的-2.2486, 夜间 SUHII 则由 1.1271 下降至-0.5751。总体上, 白天和夜间 SUHII 均随距边界距离增加而持续减弱, 其中 1~5 km 范围内下降最为明显, 之后衰减趋于平缓, 表明主城区热岛效应主要集中于边界附近及其邻近区域。其变化过程见图 4, 统计摘要见表 4。

与 SUHII 相比, MNDWI 在梯度带上的变化较为平缓, 其均值由 1 km 环带的-0.3291 变化至 10 km 环带的-0.3613, 中间各环带仅表现为小幅波动。说明在主城区边界外扩过程中, 热环境衰减特征较为清晰, 而湿润背景变化相对有限, 二者存在一定空间对应, 但并未表现出简单的反向变化关系。昼夜比较表明, 夜间 SUHII 在近距环带内保持较高正值, 且下降过程较为连续; 白天 SUHII 则更早转入负值区间, 说明白天热环境向外围衰减更快, 夜间则具有更强的延续性。总体而言, 主城区热环境表现出较典型的“中心较强、外围减弱”空间结构。

Table 4. Summary of average values in the outward buffer zones from the main urban area during 2013~2023

表 4. 2013~2023 年主城区外扩梯度带平均值摘要

距边界距离/km	白天 SUHII	夜间 SUHII	MNDWI
1	0.5200	1.1271	-0.3291
2	-0.0597	0.8106	-0.3412
3	-0.4931	0.5724	-0.3482
4	-0.8762	0.3441	-0.3517
5	-1.2105	0.1310	-0.3529
6	-1.4858	-0.0707	-0.3552
7	-1.7248	-0.2427	-0.3557
8	-1.9261	-0.3856	-0.3569
9	-2.0927	-0.4986	-0.3573
10	-2.2486	-0.5751	-0.3613

4.4. 主城区尺度上 SUHII 与景观格局、水体和背景气象因子的统计关系

相关分析结果表明, 在主城区年度尺度上, 白天 SUHII 与各环境变量之间的统计关系整体较弱。其与 RH 和 ISA ratio 的相关系数在各变量中相对较高, 但均未达到显著水平; 与 MNDWI、WS 及景观格局指标的相关程度更低, 说明白天 SUHII 的年际变化与单一环境因子之间尚未形成稳定的统计对应关系。相比之下, 夜间 SUHII 与景观格局指标的关系更为明确, 其中与 AI 的 Pearson 和 Spearman 相关系数分别为-0.6377 和-0.7727, 均达到显著水平; 与 PD 的 Spearman 相关也达到显著水平, 表明夜间 SUHII 与景观格局变化, 尤其是 AI, 存在较明确的负向统计关联。总体来看, 主城区年度尺度上不同环境因子与 SUHII 的统计关系存在昼夜差异: 白天 SUHII 与背景气象条件和建成环境比例的相关程度相对较高, 但统计显著性不足; 夜间 SUHII 与景观格局指标的相关性更为突出。考虑到研究期仅包含 11 个年度样本, 本文结果主要反映变量之间的统计关联特征, 而不作严格因果解释。相关分析结果见表 5。

Table 5. Correlation analysis results between SUHII and main environmental variables in the main urban area

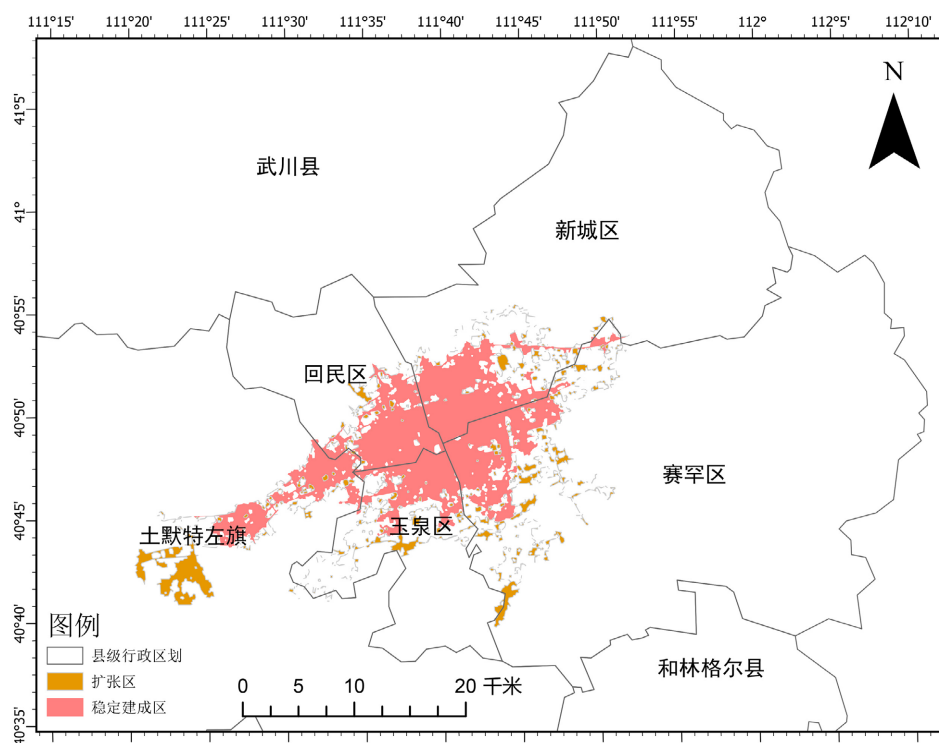
表 5. 主城区 SUHII 与主要环境变量相关分析结果

因变量	自变量	Pearson r	Pearson p	Spearman r	Spearman p
白天 SUHII	ISA ratio	0.3331	0.3169	0.1091	0.7495
白天 SUHII	MNDWI	0.1551	0.6488	0.2364	0.4841

续表

白天 SUHII	RH (白天)	0.4390	0.1767	0.4818	0.1334
白天 SUHII	WS (白天)	0.3094	0.3545	0.2273	0.5015
白天 SUHII	AI	-0.1921	0.5715	-0.0909	0.7904
白天 SUHII	LSI	-0.1332	0.6963	-0.0273	0.9366
白天 SUHII	PD	-0.1628	0.6324	-0.0455	0.8944
夜间 SUHII	ISA ratio	0.1805	0.5954	0.0273	0.9366
夜间 SUHII	MNDWI	-0.0119	0.9722	-0.0273	0.9366
夜间 SUHII	RH (夜间)	-0.1987	0.5580	-0.1091	0.7495
夜间 SUHII	WS (夜间)	-0.1660	0.6258	-0.1818	0.5926
夜间 SUHII	AI	-0.6377	0.0348	-0.7727	0.0053
夜间 SUHII	LSI	-0.3997	0.2232	-0.4818	0.1334
夜间 SUHII	PD	-0.5794	0.0617	-0.7455	0.0085

4.5. GAIA 多期建成区扩张与景观演变补充分析



2013—2023 年呼和浩特市建成区扩张对比

Figure 5. Comparison of built-up area expansion in Hohhot from 2013 to 2023

图 5. 2013~2023 年呼和浩特市建成区扩张对比

基于 GAIA 多期建成区边界叠置结果可见, 2013~2023 年呼和浩特市建成区总体呈持续扩张态势。2013~2018 年期间, 稳定建成区面积为 202.1135 km², 扩张区面积为 140.8594 km², 减少区面积仅为 0.2816 km²; 2018~2023 年期间, 稳定建成区面积为 341.8377 km², 扩张区面积为 47.5182 km², 减少区面积为 1.1353 km²; 若从 2013~2023 年整体比较, 稳定建成区面积为 202.2036 km², 扩张区面积达到 187.1522

km², 而减少区面积仅为 0.1915 km²。说明研究期内建成区扩张是总体趋势, 且前一阶段扩张幅度明显高于后一阶段。相关结果见图 5, 统计摘要见表 6。

结合景观指数结果可见, AI、LSI 和 PD 在研究期内均呈上升趋势, 表明建成区在持续扩张的同时, 其空间聚集程度、边界复杂度和斑块密度也在同步变化。总体来看, GAIA 多期建成区结果主要从建成环境演变角度为主城区热环境变化提供背景补充, 而不直接替代 SUHII 主统计边界。

Table 6. Summary of changes in multi-period GAIA built-up areas

表 6. GAIA 多期建成区变化摘要

时段	稳定建成区/km ²	扩张区/km ²	减少区/km ²
2013~2018 年	202.1135	140.8594	0.2816
2018~2023 年	341.8377	47.5182	1.1353
2013~2023 年	202.2036	187.1522	0.1915

5. 结论与讨论

5.1. 结论

(1) 2013~2023 年, 呼和浩特市主城区夏季 SUHII 呈现明显昼夜差异, 白天在 0.3867~3.0729 之间波动, 整体线性趋势较弱, 夜间在 1.9135~3.2499 之间变化并呈弱下降趋势; 总体上, 夜间 SUHII 均值高于白天, 表明主城区热环境在夜间具有更强持续性。

(2) 主城区外扩 0~10 km 梯度带上, 白天和夜间 SUHII 均随距边界距离增加而明显衰减, 其中 1~5 km 范围内变化最为显著, 体现出较典型的“中心较强、外围减弱”空间结构; 相比之下, MNDWI 在梯度带上的变化幅度较小, 说明湿润背景沿梯度带变化较为平缓。

(3) 主城区年度尺度统计表明, 白天 SUHII 与 RH 和 ISA ratio 在各变量中表现出相对较高的相关程度, 但统计显著性不足; 夜间 SUHII 与景观格局指标尤其是 AI 的负向关联更为明确。总体而言, 不同环境因子与 SUHII 的统计关联在昼夜尺度上存在差异, 但不宜据此作严格因果解释。

5.2. 讨论与研究局限性

本文结果表明, 2013~2023 年呼和浩特市主城区夏季夜间 SUHII 整体高于白天, 且白天波动更大。该特征与干旱 - 半干旱城市热环境研究的基本认识总体一致, 即白天地表热环境更易受裸地、稀疏植被及水分条件变化影响, 而夜间热环境则更易受不透水面蓄热释热和城市下垫面散热条件影响。北方干旱 - 半干旱区多城市研究以及海湾地区、印度半干旱城市的相关研究均表明, 干旱背景下城市热岛昼夜差异较为显著, 部分城市还可表现出白天地表冷岛与夜间热岛并存的现象[14]-[16]。因此, 本文所揭示的“夜间较强、白天波动较大”的热环境特征, 具有一定的区域背景合理性。

在因子解释方面, 本文中 ISA ratio 与 SUHII 的统计关联相对更为直接, 而夜间 SUHII 与 AI 的负相关则需谨慎理解。已有半干旱城市研究表明, 紧凑型建成环境与开敞型建成环境在热环境响应上存在差异, 说明城市形态确会影响热环境, 但这种影响具有明显的尺度依赖性。本文采用主城区年度均值与年尺度景观指数进行比较, 样本量仅 11 年, 因此 AI 的负相关更宜被视为特定边界、特定时期和多因素共同变化下的经验关系, 而不宜上升为稳定机制。相较之下, MNDWI、RH 等湿润背景因子与 SUHII 的对应关系, 与干旱 - 半干旱城市研究中关于水分和下垫面差异对热环境具有重要调节作用的认识更为一致 [14]。

本研究仍存在一定局限。其一, 主城区统计采用 GUB 2015 和 GUB 2018 的分段边界, 虽有助于提高

年际比较的可比性, 但边界设定本身仍会影响 SUHII 估计; 已有针对干旱城市的研究指出, 不同城乡定义会显著改变 SUHII 数值, 甚至可能导致部分城市白天 SUHII 正负号发生变化[17]。其二, 本文基于 TRIMS LST 计算的 SUHII 属于地表热岛表征, 并不等同于近地气温热岛; 已有研究表明, 地表温度与气温热岛在强度和时序上并不完全一致, LST 往往更敏感于下垫面热属性差异[18]。其三, 本文仅纳入 AI、PD 和 LSI 等少量二维景观指标, 尚未进一步考虑建筑高度、路网形态、人为热排放及更细尺度空间异质性, 因此全文结论更适宜限定为年度尺度上的统计关联与比较, 而不宜作更强的因果推断。

基金项目

内蒙古师范大学自主科研项目结余经费专项《内蒙古道路生态环境影响多尺度对比研究(KJJYZX2026015)》支持。

参考文献

- [1] Zhao, L., Fan, X. and Hong, T. (2025) Urban Heat Island Effect: Remote Sensing Monitoring and Assessment—Methods, Applications, and Future Directions. *Atmosphere*, **16**, Article 791. <https://doi.org/10.3390/atmos16070791>
- [2] Wang, J., Lu, L., Zhou, X., Huang, G. and Chen, Z. (2025) Spatio-Temporal Patterns and Drivers of the Urban Heat Island Effect in Arid and Semi-Arid Regions of Northern China. *Remote Sensing*, **17**, Article 1339. <https://doi.org/10.3390/rs17081339>
- [3] Yuan, Y., Li, C., Geng, X., Yu, Z., Fan, Z. and Wang, X. (2022) Natural-Anthropogenic Environment Interactively Causes the Surface Urban Heat Island Intensity Variations in Global Climate Zones. *Environment International*, **170**, Article 107574. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107574>
- [4] Tang, W., Zhou, J., Ma, J., Wang, Z., Ding, L., Zhang, X., et al. (2024) TRIMS LST: A Daily 1 Km All-Weather Land Surface Temperature Dataset for China's Landmass and Surrounding Areas (2000-2022). *Earth System Science Data*, **16**, 387-419. <https://doi.org/10.5194/essd-16-387-2024>
- [5] Han, L., Lu, L., Fu, P., Ren, C., Cai, M. and Li, Q. (2023) Exploring the Seasonality of Surface Urban Heat Islands Using Enhanced Land Surface Temperature in a Semi-Arid City. *Urban Climate*, **49**, Article 101455. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101455>
- [6] Ibsen, P.C., Jenerette, G.D., Dell, T., Bagstad, K.J. and Diffendorfer, J.E. (2022) Urban Landcover Differentially Drives Day and Nighttime Air Temperature across a Semi-Arid City. *Science of The Total Environment*, **829**, Article 154589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154589>
- [7] She, Y., Liu, Z., Zhan, W., Lai, J. and Huang, F. (2022) Strong Regulation of Daily Variations in Nighttime Surface Urban Heat Islands by Meteorological Variables across Global Cities. *Environmental Research Letters*, **17**, Article 014049. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4630>
- [8] Zhang, Y., Wang, Y., Ding, N. and Yang, X. (2022) Spatial Pattern Impact of Impervious Surface Density on Urban Heat Island Effect: A Case Study in Xuzhou, China. *Land*, **11**, Article 2135. <https://doi.org/10.3390/land11122135>
- [9] Li, X., Gong, P., Zhou, Y., Wang, J., Bai, Y., Chen, B., et al. (2020) Mapping Global Urban Boundaries from the Global Artificial Impervious Area (GAIA) Data. *Environmental Research Letters*, **15**, Article 094044. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9be3>
- [10] Gong, P., Li, X., Wang, J., Bai, Y., Chen, B., Hu, T., et al. (2020) Annual Maps of Global Artificial Impervious Area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, **236**, Article 111510. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111510>
- [11] Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., et al. (2021) ERA5-Land: A State-of-the-Art Global Reanalysis Dataset for Land Applications. *Earth System Science Data*, **13**, 4349-4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- [12] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, **202**, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- [13] Wang, Y., Wang, H., Yao, F., Stouffs, R. and Wu, J. (2024) An Integrated Framework for Jointly Assessing Spatiotemporal Dynamics of Surface Urban Heat Island Intensity and Footprint: China, 2003-2020. *Sustainable Cities and Society*, **112**, Article 105601. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105601>
- [14] Wang, J., Lu, L., Zhou, X., Huang, G. and Chen, Z. (2025) Spatio-Temporal Patterns and Drivers of the Urban Heat

- Island Effect in Arid and Semi-Arid Regions of Northern China. *Remote Sensing*, **17**, Article 1339. <https://doi.org/10.3390/rs17081339>
- [15] Abulibdeh, A., Mani, K., AL-Shabi, M., *et al.* (2021) Analysis of Urban Heat Island Characteristics and Mitigation Strategies for Eight Arid and Semi-Arid Gulf Region Cities. *Environmental Earth Sciences*, **80**, Article No. 164. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09540-7>
- [16] Bala, R., Prasad, R. and Pratap Yadav, V. (2020) A Comparative Analysis of Day and Night Land Surface Temperature in Two Semi-Arid Cities Using Satellite Images Sampled in Different Seasons. *Advances in Space Research*, **66**, 412-425. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.009>
- [17] Liu, Z., Ye, R., Yang, Q., Hu, T., Liu, Y., Chakraborty, T., *et al.* (2024) Identification of Surface Urban Heat versus Cool Islands for Arid Cities Depends on the Choice of Urban and Rural Definitions. *Science of The Total Environment*, **951**, Article 175631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175631>
- [18] Pena Acosta, M., Vahdatikhaki, F., Santos, J. and Dorée, A.G. (2023) A Comparative Analysis of Surface and Canopy Layer Urban Heat Island at the Micro Level Using a Data-Driven Approach. *Sustainable Cities and Society*, **99**, Article 104944. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104944>