

冬季城市热岛效应的时空演变与驱动机制研究

韩璐瑶, 罗华旭, 马 尚

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2026年1月14日; 录用日期: 2026年2月7日; 发布日期: 2026年2月24日

摘 要

在全球气候变化与快速城市化背景下, 城市热岛效应已成为严峻的环境问题。现有研究多集中于春、夏、秋季, 对冬季热岛效应的时空特征、驱动机制及其对大规模人为干预的响应认知不足。本研究以典型海滨城市青岛为例, 基于2013~2024年冬季Landsat遥感影像, 反演地表温度, 计算城市热岛强度(UHII), 并结合归一化植被指数(NDVI)、归一化建筑指数(NDBI)、归一化裸土指数(NDBaI)和改进的归一化差异水体指数(MNDWI), 系统分析了快速城市化及海绵城市建设背景下冬季热岛效应的时空演变规律及其驱动因素。结果表明: (1) 2013~2024年间, 研究区内不透水面持续扩张, 自然地表萎缩, 土地利用变化显著; (2) 冬季城市热岛强度空间分异明显, 其等级分布格局由2013年以4级UHII为主的“单峰”分布, 转变为2020年以3级与5级为主的“双峰”结构, 并持续至2024年, 反映了冬季热环境空间异质性的加剧; (3) 线性回归分析表明, NDBI和NDBaI与UHII呈稳定正相关。MNDWI呈负相关, 而植被与UHII呈正相关, 这与植被夏季的降温效应相反, 揭示了冬季植被生理活动休眠、反照率较低可能导致的增温作用。本研究强调了冬季城市热岛效应的独特性与复杂性, 有助于指导对城市环境治理中的科学决策具有一定的指导作用。

关键词

冬季城市热岛强度, 时空演变, 驱动机制

Research on the Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanisms of the Urban Heat Island Effect in Winter

Luyao Han, Huaxu Luo, Shang Ma

College of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: January 14, 2026; accepted: February 7, 2026; published: February 24, 2026

Abstract

Against the backdrop of global climate change and rapid urbanization, the urban heat island effect has emerged as a severe environmental issue. Existing research predominantly focuses on spring, summer, and autumn, with insufficient understanding of the spatiotemporal characteristics, driving mechanisms, and responses to large-scale human interventions of winter heat islands. Taking the coastal city of Qingdao as a case study, this research utilizes winter Landsat remote sensing imagery from 2013 to 2024 to derive surface temperatures and calculate the Urban Heat Island Intensity (UHII). By integrating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Building Index (NDBI), Normalized Difference Bare Land Index (NDBaI), and Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), systematically analyzed the spatiotemporal evolution patterns and driving factors of winter heat island effects under rapid urbanization and sponge city construction. Results indicate: (1) From 2013 to 2024, impervious surfaces continuously expanded while natural surfaces shrank, reflecting significant land use changes in the study area; (2) Winter urban heat island intensity exhibited pronounced spatial differentiation. Its hierarchical distribution pattern shifted from a “single-peak” distribution dominated by Level 4 UHII in 2013 to a “double-peak” structure characterized by Levels 3 and 5 in 2020, persisting through 2024. This reflects intensified spatial heterogeneity in the winter thermal environment. (3) Linear regression analysis revealed stable positive correlations between NDBI and NDBaI with UHII, MNDWI exhibits a negative correlation, while vegetation shows a positive correlation with UHII. This contrasts with vegetation’s cooling effect in summer, revealing that winter vegetation’s physiological dormancy and lower albedo may contribute to warming. This study highlights the distinctiveness and complexity of the urban heat island effect during winter, thereby providing valuable guidance for scientific decision-making in urban environmental governance.

Keywords

Winter Urban Heat Island Intensity, Spatiotemporal Evolution, Driving Mechanisms

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

在全球气候变化与城市化进程不断加速的双重背景下，城市热岛效应已成为最突出的城市环境问题之一[1]。它不仅显著加剧夏季高温热浪风险，影响居民健康与能源消耗，更对城市生态系统的稳定性产生深远影响。

在地表温度反演、热岛空间格局及其与土地利用/覆被变化关联等领域，已有研究一致指出，城市化速度与城市热岛效应(UHI)强度之间存在显著正相关[2]。例如，研究人员[3]通过整合景观组成、建筑特征和人为影响，研究了城市化因素与人际指数(UHI)之间的关系，强调了城市结构在塑造热环境中的关键作用；同时，一系列源自多光谱遥感的地表参数指数被广泛用于研究 LST 与城市地表特征之间的关系[4]，归一化植被指数(NDVI)表征植被覆盖与生理活动，NDVI 越高表示植被的概率越高[5]；归一化建筑指数(NDBI)有效反映人工建筑和不透水面的范围，高 NDBI 值通常表示城市开发密集的地区[6]；归一化裸土指数(NDBaI)有效反映裸地区域，随后裸地可以细分为初级裸地、次级裸地和耕地[7]；基于反射的近红外辐射和可见绿光，改进的归一化差异水体指数(MNDWI)对水体非常敏感，则能更精准地提取水体信息[8]。

目前市热岛的研究存在明显的季节偏向性,大量成果集中于春、夏、秋三季,尤其是热岛强度最为显著的夏季[9]。相比之下,冬季城市热岛效应的时空特征、形成机制及其环境气候影响关注不足。其次,尽管越来越多的城市正在实施如“海绵城市”等基于自然的解决方案来调控城市水循环与热环境,但针对此类大规模人为干预措施长期、定量化的实证研究仍较为缺乏,特别是对热岛格局的持续性影响。因此,本研究讨论以下核心问题:(1)在快速城市化及海绵城市建设的背景下,冬季UHII的时空分布特征是什么?(2)UHII的时空演变及其驱动机制是什么?

本研究基于热红外遥感反演的地表温度是量化UHI空间格局最直接的物理量。解析城市热岛的空间异质性的驱动因素(NDVI、NDBI、NDBaI、MNDWI)。厘清地表温度与这些关键地表参数之间的定量关系,解构冬季热岛效应的调控机制。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

青岛市位于山东半岛南部(35°35'N~37°09'N, 119°30'E~121°00'E),东、南濒临黄海湾(图1)。地势东高西低,南北两侧微微隆起,中间低凹,构成典型的海滨丘陵地貌。青岛市地处北温带季风区,属于温带季风气候,具有明显的海洋性特征:空气湿润,雨量充沛,温度适中,四季分明。春季气温回升缓慢;夏季湿热多雨,但无酷暑;秋季天高气爽,降水少,蒸发强;冬季风大温低,持续时间较长,全市年平均气温为12.2℃,年平均降水量为775.6mm,其中暴雨主要集中于6~9月,年均发生2~3次。青岛是山东省最大的贸易、金融、信息中心,是中国东海岸的经济中心和国际港口。

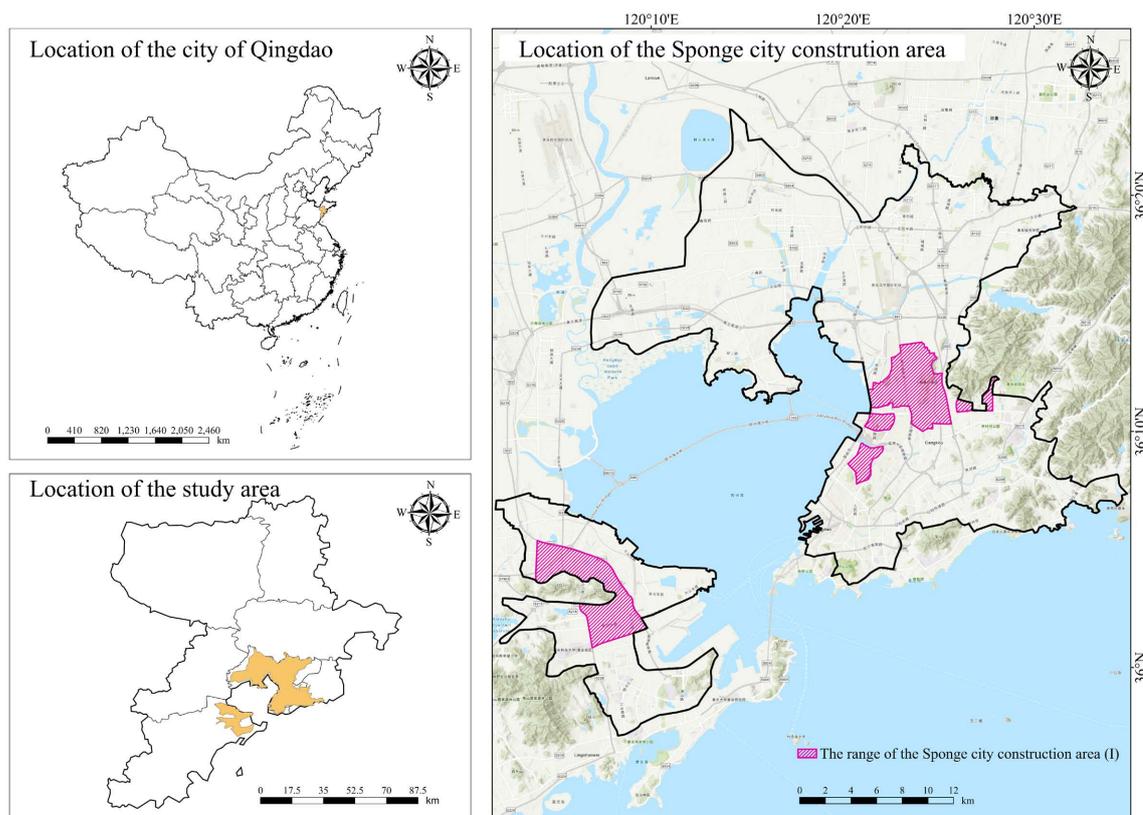


Figure 1. Overview of the study area
图 1. 研究区范围

2.2. 数据来源

本研究用于地表温度反演的 Landsat 数据来源于美国地质调查局(USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), 免费获取。该遥感影像产品基于单通道算法反演获得, 其绝对定位精度为 ± 1.0 K, 并且分辨率均被重采样到 30 m (表 1)。对于无法获得匹配数据的年份, 利用相邻年份云覆盖率在 10% 以下的数据替代。

Table 1. Parameters of remote sensing image

表 1. 遥感影像参数

Get Data (UTC)	Satellite Image ID	Sensor	Path/Row
2013/12/1	LC81200352013335LGN01	OLI_TIRS	120/035
2020/12/4	LC81200352020339LGN00	OLI_TIRS	120/035
2024/12/15	LC81200352024350LGN00	OLI_TIRS	120/035

本研究除了使用遥感数据外, 研究区域的边界矢量数据还来自于《青岛市海绵城市专项规划(2016~2030)说明书》[10]。地表特性参数(NDVI、NDBI、NDBaI、MNDWI)是基于 ENVI5.3 平台, 通过上述 Landsat 数据中的遥感影像计算得出的。

2.3. 研究方法

2.3.1. 地表温度计算

依据 USGS 地表温度产品的使用说明[11], 本研究基于下述公式对温度产品进行转换:

$$LST = (0.00341802 \times B_{TIRS} + 149.0) - 273.15 \quad (1)$$

其中, B_{TIRS} 为原始 LST 产品数据(单位为 K), LST 为转换后的地表温度(单位为 $^{\circ}\text{C}$)。

2.3.2. 地表特性计算

计算了五个遥感指标 NDVI、NDBI、NDBaI、MNDWI, 以表征本研究的城市地表。这 4 个参数计算方式如下:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (2)$$

$$NDBI = \frac{R_{MIR} - R_{NIR}}{R_{MIR} + R_{NIR}} \quad (3)$$

$$NDBaI = \frac{D_{MIR} - D_{TIR}}{D_{MIR} + D_{TIR}} \quad (4)$$

$$MNDWI = \frac{R_{GREEN} - R_{MIR}}{R_{GREEN} + R_{MIR}} \quad (5)$$

其中, R_{NIR} 是近红外波段的反射率; R_{RED} 和 R_{GREEN} 分别代表红色和绿色波段的反射率; R_{MIR} 表示中红外的反射率; D 代表对应频段的数字数值(DN), D_{TIR} 表示 TM/波段 6 或者波段 10。

2.3.3. 土地利用分类划分及验证

本研究使用 K-Means 的非监督分类方法进行青岛市土地利用分类。遥感数据的光学波段合成, Landsat

8 中的波段 3、波段 4 和波段 5, 被用于土地利用分类。形成四种土地覆盖类型: 水域、低 NDVI 区(LNDVI, 包括城市、道路、工业区、裸地、农村住宅区和低植被覆盖区)、中 NDVI 区(MNDVI, 包括草地、耕地、灌木和稀疏植被覆盖区)和高 NDVI 区(HNDVI, 包括植被区)。

为定量评估本研究的土地利用分类结果精度, 本研究采用了基于混淆矩阵的统计分析方法。在每张图像中创建 500 个随机样本点, 使用 Google Earth 的高分辨率历史图像作用参考数据, 通过目视解译确保了地面真实值的可靠性。随后将分类结果与参考数据逐一比对, 构建混淆矩阵。最后, 基于该矩阵计算总体分类精度(OA)、Kappa 系数、各类别的生产者精度和用户精度等核心指标, 以全面反映分类图的整体可靠性、类别间的一致性, 以及各类别的分类质量。

2.3.4. 城市热岛强度计算

城市热岛效应(UHI)是城市与周边自然/农村环境间的温差表征, 其强度(UHII)而非绝对地表温度(LST), 是进行多时期对比的适宜指标。因此, 本研究遵循传统方法, 采用基于高 NDVI 区域(HNDVI)的 UHII 进行时序分析, 计算公式如下:

$$UHII = T_{oa} - T_{mH} \quad (6)$$

其中, T_{OA} 是其他区域的地表温度, T_{mH} 是 HNDVI 的平均地表温度。

2.3.5. 统计分析

相关性分析是确定不同变量之间的重要方法。本研究在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格尺度下, 通过线性拟合评估了土地利用指数与地表温度(LST)之间的相关性。计算公式如下:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

其中, x_i 是自变量的值; y_i 是因变量的值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别是样本 x_i 和 y_i 的均值。

3. 结果分析与讨论

3.1. 2013~2024 年土地利用时空变化

对土地利用分类结果进行的精度检验表明, 分类数据与实际地物具有高度一致性。各年份的总体分类精度(OA)均高于 0.90, Kappa 系数大于 0.86, 这些指标高于推荐阈值, 表明分类结果具有可信度和可靠性, 完全满足后续分析与应用的要求[12]。

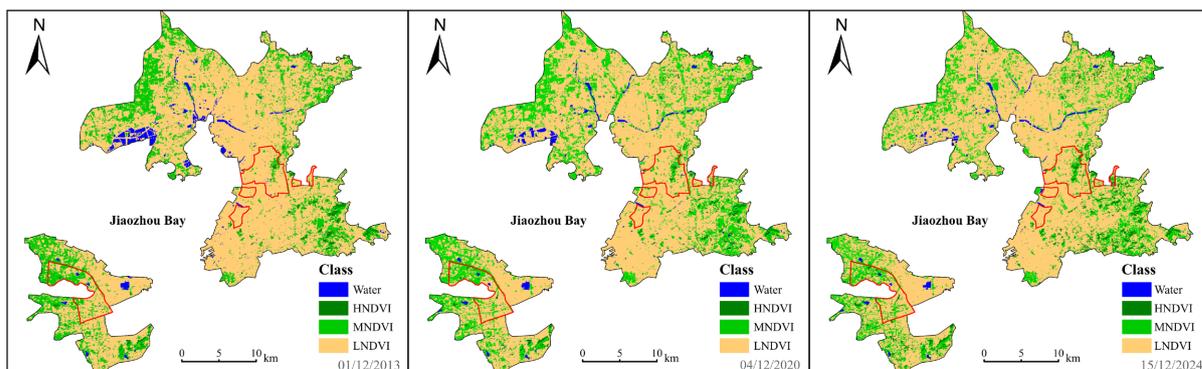


Figure 2. Land use classification in Qingdao from 2013 to 2024

图 2. 2013~2024 年青岛市土地利用分类

图 2 表明冬季青岛市 2013~2024 年土地利用类型发生了显著变化。研究区内 LNDVI 的面积增大, 而 MNDVI 和 水体面积呈减小趋势, 这直观反映了快速城市化进程中不透水面扩张与自然地表萎缩的特征。MNDVI 主要集中在研究区北部、东部和南部, 其他位置零散分布。2013 年至 2024 年间 LNDVI 的占地比例较大, 研究区内城市化程度高, 2024 年的 LNDVI 的占地面积大于 2013 年。而研究区内水体面积减小, 主要表现在胶州湾北部的养殖中心。另外, 研究区域内在 2018 年完成海绵城市建设, LNDVI 中 散乱镶嵌的 MNDVI 用地类型的碎片化增多, 这些碎片很有可能对应着雨水花园、下沉式绿地等海绵化 设施。

3.2. 2013~2024 年地表温度与城市热岛的时空演变

图 3 表明, 地表温度(LST)的高值区主要分布在 LNDVI 区域。该区域地表类型以建筑密集区、工厂、 道路等不透水表面为主, 植被覆盖稀疏, 且集中了大量的人为热排放。与之相反, LST 的低值区则显著 分布于水体或 HNDVI 区域。这一空间分布模式与既有研究的结论相一致[13] [14]。

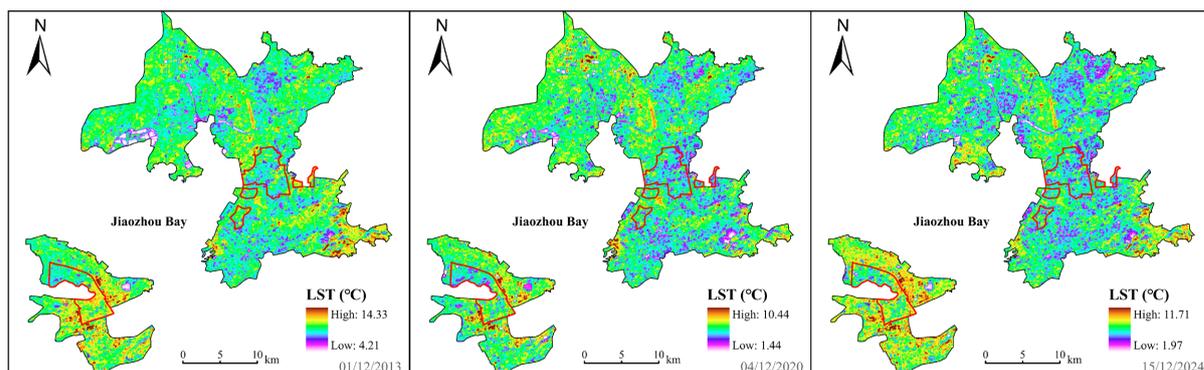


Figure 3. Spatial distributions of the LST in December from 2013 to 2024

图 3. 2013~2024 年 12 月地表温度空间分布

为消除背景气候波动对 LST 的影响, 本研究基于 2013 年、2020 年和 2024 年的 Landsat 影像反演结果, 引入城市热岛强度(UHII)作为核心指标。UHII 通过计算城市区域与 HNDVI 之间的温差, 这一方法 能够有效剥离出区域气候背景导致的热环境变化, 从而客观地分析城市化主导的热环境空间格局及动态 演变特征。后续分析将聚焦于 UHII 的时空演变及其驱动机制。

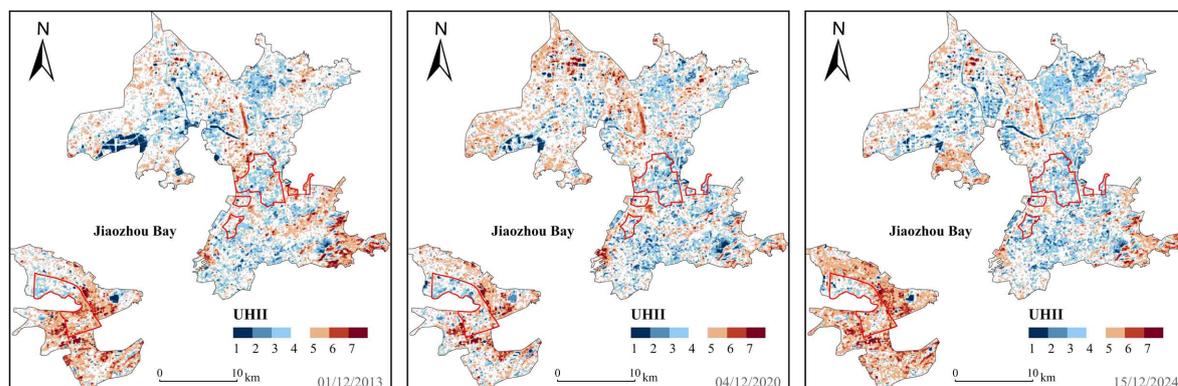


Figure 4. Spatial distributions of the UHII in December from 2013 to 2024

图 4. 2013~2024 年 12 月热岛强度(UHII)空间分布

图 4 表示研究区冬季 UHII 的空间分布。在 2013 年, 研究区高 UHII 等级集中分布于西南部和东部工业区。UHII 低等级区则主要与胶州湾北部水产养殖基地和三条主要水系的空间范围重合。至 2020 年, 随着青岛市的城市开发持续推进和海绵城市建设的完成, 在北部出现高 UHII 等级汇聚, 且原先由水体形成的低温冷岛范围缩减。此外, 研究区南部的冷岛现象加剧。到 2024 年, 胶州湾东部区域的 UHII 向冷岛方向移动趋势, UHII 等级低值占比增大; 西部区域热岛范围明显扩张。

Table 2. Percentage of area covered by urban heat island intensity (UHII) levels

表 2. 冬季热岛强度(UHII)等级的面积占比

UHII 等级	2013 年(%)	2020 年(%)	2024 年(%)
1	1.59	0.80	0.40
2	3.72	6.11	5.18
3	23.90	24.57	27.89
4	43.56	37.72	37.85
5	20.72	24.70	21.12
6	5.44	4.91	6.64
7	1.06	1.20	0.93
合计	100	100	100

表 2 冬季热岛强度(UHII)等级的面积占比表示研究区 UHII 的空间格局在 2013~2024 年间发生了显著的结构变化。这种变化首先体现在其等级分布从“单峰”到“双峰”值的转变。具体而言, 在 2013 年, UHII 等级分布呈现以 4 级 UHII 为主导的“单峰”结构, 其面积占比为 43.56%。然而, 至 2020 年, 这一格局转变为 3 级 UHII 和 5 级 UHII 并重的“双峰”结构, 两者的面积占比分别为 24.57%和 24.7%, 而原先的 4 级 UHII 的面积占比则下降至 37.72%。到 2024 年, 4 级 UHII 面积占比显著上升至 27.89%, 超过了 5 级 UHII 的面积, 标志着热岛格局以 3 级 UHII 为核心, 同时 4 级 UHII 广泛分布的新形态。这种转变表明, 城市热环境的空间分异加剧, 冬季整体的 UHII 等级呈现出向更低等级迁移的明显趋势。

UHII 的演变呈现出鲜明的阶段性特征, 数据分析揭示其发展经历了两个独立阶段: 2013~2020 年为剧烈变化, UHII 各等级占比变化显著, 主导格局从“单峰”转变为“双峰”; 2020~2024 年为 UHII 等级深化, 表现为 3 级 UHII 占比的继续大幅上升和其他等级的微调, 趋于结构稳定与内部调整。这种阶段性特征与城市发展的周期密切相关, 前一阶段对应大规模城市扩张与土地利用剧变和海绵城市建设示范区完成, 后一阶段则反映了既有建成区热化境与海绵化措施深化作用下的持续演变与再平衡。

3.3. 2013~2024 年地表特性参数与 UHII 的相关性分析

图 5 可知, 线性回归分析表明, 在 1 km 尺度下冬季不同地表特性参数对 UHII 的影响方向和强度存在显著差异。NDBI 与 NDBaI 与 UHII 呈正相关, 表明不透水面和裸土覆盖的增加会加剧冬季城市热岛效应; MNDWI 与 UHII 呈负相关, 证实了水体的降温作用; NDVI 与 UHII 的正相关关系, 这与常规认知中植被通过蒸腾作用降低地表温度的结论相悖, 暗示在冬季植被的降温机制可能失效或受其他因素主导。

图 5 表明, 冬季所有地表参数与 UHII 的线性模型呈现较低的 R^2 , 表明其解释力处于较低水平。。这表明, 任何单一地表参数都无法充分解释冬季 UHII 的空间变异, 城市热岛是下垫面属性、城市形态、人为热排放及冬季特性气象条件等多重因素复杂交互的结果。这一发现与多项研究结论相符, 即城市热岛的形成机制复杂, 需要多因子综合分析。

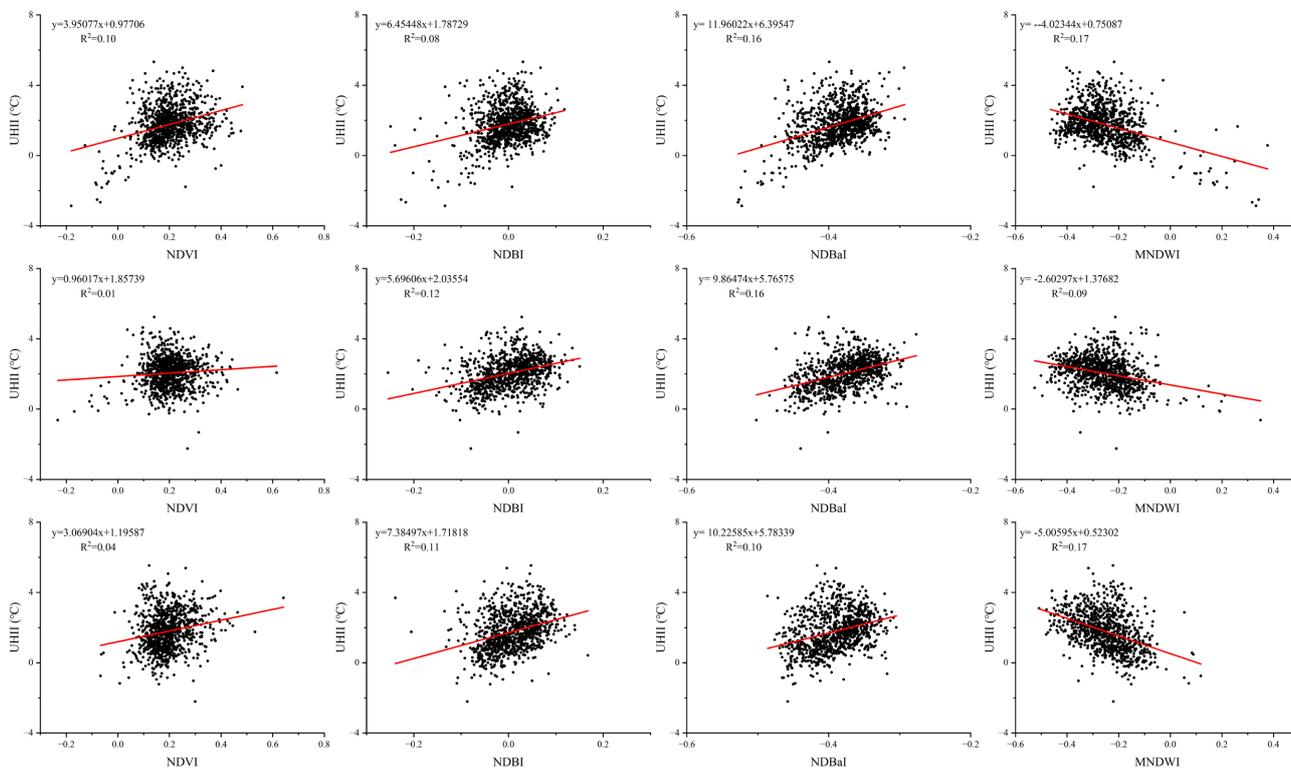


Figure 5. Linear fitting relationships between surface characteristics parameters (NDVI, NDBI, NDBaI, and MNDWI) and UHII in December from 2013 to 2024

图 5. 2013~2024 年 12 月地表特性参数(NDVI、NDBI、NDBaI、MNDWI)与热岛强度(UHII)线性拟合

NDVI 与 UHII 呈现正相关关系，这与植被通常具有降温作用的普遍认知相悖。这可能与研究区冬季植被(多为落叶植被或草坪)处于休眠期，蒸腾降温效应较弱，与夏季的环境影响机制完全不同有关。并且，冬季较低的太阳高度角可能导致植被因其低反照率特性反而吸收了更多的太阳辐射。

NDBI 与 UHII 的正相关关系始终保持稳定，则不透水面的扩张与 UHII 升高呈正相关，建筑用地是地表温度升高的主要因素之一，与既有文献形成一致共识。2024 年 NDBI 与 UHII 之间的斜率大于 2013 年，这表明尽管采取了海绵城市措施以改善下垫面，但城市整体的不透水面扩张仍然是热岛的基础性驱动力。

NDBaI 与 UHII 拟合直线斜率为正值且数值最高(2013 年：11.96，2020 年：9.86，2024 年：10.23)，这表明裸土或低植被覆盖的地表对加剧冬季热岛效应的驱动作用最强。其 R² 值在 2013 和 2020 年达到 0.16，是所有指数中最高的，这说明在冬季，裸露地表是解释 UHII 空间分异的一个相对重要的因子。这可能因为冬季土壤干燥、反照率较低，在晴朗天气下，地表吸热升温迅速。

MNDWI 与 UHII 的拟合直线斜率始终为负值(2013 年：-4.02，2020 年：-2.60，2024 年：-5.01)，清晰证实了水体在冬季仍具有降低 UHII 的作用。其斜率变化间接反映了海绵城市建设在通过修复水系、建设湿地公园等措施，可能经过一段适应期后有效地巩固并增强了水体的气候调节功能。

4. 小结

本研究基于 Landsat 卫星影像的地表温度数据，利用 K-means 方法，结合城市热岛强度的定义，开展青岛城市热岛格局及其驱动机制的研究。结果表明：1) 2013~2024 年间，青岛城市内不透水地表显著扩张，自然地表面萎缩；城市热岛空间格局分异现象加剧，城市热岛强度向低等级迁移趋势显著，尤其是

在 2018 年海绵城市建设完成后。2) 2013~2024 年间, 青岛冬季热岛驱动因子具有特殊性, 具有明显的季节性特征, 植被生态功能“休眠”的冬季, 裸土和水体下垫面的热力属性差异为影响热岛空间分异的关键因素。3) 多因子复杂交互的系统性, 单一的驱动因子对 UHII 变异的解释力(R^2)均较低, 冬季城市热岛现象是由于下垫面属性、城市形态、人为热排放以及冬季特定气象条件等多种因素的复杂交互作用而产生的。

参考文献

- [1] Oke, T.R. (1995) The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. In: Cermak, J.E., Davenport, A.G., Plate, E.J. and Viegas, D.X., Eds., *Wind Climate in Cities*, Springer, 81-107. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_5
- [2] Wang, J., Zhou, W. and Zhao, W. (2023) Higher UHI Intensity, Higher Urban Temperature? A Synthetical Analysis of Urban Heat Environment in Urban Megaregion. *Remote Sensing*, **15**, Article 5696. <https://doi.org/10.3390/rs15245696>
- [3] Wang, Q., Wang, X., Meng, Y., Zhou, Y. and Wang, H. (2023) Exploring the Impact of Urban Features on the Spatial Variation of Land Surface Temperature within the Diurnal Cycle. *Sustainable Cities and Society*, **91**, Article 104432. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104432>
- [4] Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M. and Vejre, H. (2020) Critical Review on the Cooling Effect of Urban Blue-Green Space: A Threshold-Size Perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, **49**, Article 126630. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>
- [5] Xu, Y., Yang, Y., Chen, X. and Liu, Y. (2022) Bibliometric Analysis of Global NDVI Research Trends from 1985 to 2021. *Remote Sensing*, **14**, Article 3967. <https://doi.org/10.3390/rs14163967>
- [6] Zha, Y., Gao, J. and Ni, S. (2003) Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, 583-594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- [7] Hongmei, Z. and Xiaoling, C. (2005) Use of Normalized Difference Bareness Index in Quickly Mapping Bare Areas from TM/ETM+. Proceedings. 2005 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seoul, 29-29 July 2005, 1666-1668.
- [8] Xu, H. (2007) Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, **27**, 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- [9] Zhang, H., Kang, M., Guan, Z., Zhou, R., Zhao, A., Wu, W., *et al.* (2024) Assessing the Role of Urban Green Infrastructure in Mitigating Summertime Urban Heat Island (UHI) Effect in Metropolitan Shanghai, China. *Sustainable Cities and Society*, **112**, Article 105605. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105605>
- [10] 郭梓淳. 基于海绵城市理论分析青岛市试点建设[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(01 城市安全与防灾规划). 重庆: 重庆大学, 2023: 363-376.
- [11] U.S. Geological Survey (2024) Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide, LSDS-1619, Version 6.0. U.S. Department of the Interior.
- [12] Chen, X. and Zhang, Y. (2017) Impacts of Urban Surface Characteristics on Spatiotemporal Pattern of Land Surface Temperature in Kunming of China. *Sustainable Cities and Society*, **32**, 87-99. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.03.013>
- [13] 张熙涛, 周德成. 典型生态城市 1990-2020 年地表热环境的时空演变及其预测[J]. *环境科学*, 2025, 46(8): 5196-5205.
- [14] Ullah, W., Ahmad, K., Ullah, S., Tahir, A.A., Javed, M.F., Nazir, A., *et al.* (2023) Analysis of the Relationship among Land Surface Temperature (LST), Land Use Land Cover (LULC), and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with Topographic Elements in the Lower Himalayan Region. *Heliyon*, **9**, e13322. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13322>