

沈阳市城郊热岛效应演变特征分析

邱晨杰, 林 闯, 吕继飞, 李坤杰, 熊 焱*

辽宁科技大学理学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年2月8日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年3月5日

摘 要

城市热岛效应是城市化进程中的典型环境问题。本文以典型的北方工业与中心城市沈阳市为研究对象, 基于2016年至2024年的气象、生态与人为活动等多源数据, 综合运用热岛强度计算、Spearman相关分析、移动平均法、滞后效应模型及综合指数构建等方法, 系统分析热岛效应演变的多因素驱动特征。研究结果表明: 沈阳市热岛强度年际波动显著(0.038°C~0.714°C); 月均日照时长($\rho = 0.450$)与空气质量综合指数($\rho = 0.350$)是加剧热岛效应的主要因素, 月均风速($\rho = -0.300$)为关键缓解因素; 生态因素具有显著滞后与累积效应, 地表水资源滞后一年的相关性由-0.183升至-0.738; 人为活动指标与热岛强度呈弱负相关($\rho = -0.150$), 反映生态补偿的部分抵消作用; 构建的综合热岛压力指数($\rho = 0.550$)有效地揭示了气象因素实时变化与生态因素长期缓释的协同作用机制, 为北方工业城市热岛效应治理与生态规划提供量化依据。

关键词

热岛效应, 沈阳市, 演变特征, 滞后效应

Analysis of the Evolution Characteristics of the Urban Heat Island Effect in the Suburbs of Shenyang

Chenjie Qiu, Chuang Lin, Jifei Lyu, Kunjie Li, Yan Xiong*

School of Science, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: February 8, 2026; accepted: February 24, 2026; published: March 5, 2026

Abstract

The urban heat island effect is a typical environmental problem in the process of urbanization. Taking Shenyang, a typical northern industrial and central city, as the research object, this paper systematically analyzes the multi-factor driving characteristics of the evolution of the heat island effect by

*通讯作者。

文章引用: 邱晨杰, 林闯, 吕继飞, 李坤杰, 熊焱. 沈阳市城郊热岛效应演变特征分析[J]. 地理科学研究, 2026, 15(2): 147-159. DOI: 10.12677/gser.2026.152016

comprehensively using methods such as heat island intensity calculation, Spearman correlation analysis, moving average method, lag effect model and comprehensive index construction, based on multi-source data including meteorology, ecology and human activities from 2016 to 2024. The results show that the annual fluctuation of heat island intensity in Shenyang is significant ($0.038^{\circ}\text{C}\sim 0.714^{\circ}\text{C}$); the monthly average sunshine duration ($\rho = 0.450$) and the comprehensive air quality index ($\rho = 0.350$) are the main factors exacerbating the heat island effect, while the monthly average wind speed ($\rho = -0.300$) is the key mitigating factor. Ecological factors have significant lag and cumulative effects, with the correlation of surface water resources lagging one year rising from -0.183 to -0.738 . The indicators of human activities show a weak negative correlation with the heat island intensity ($\rho = -0.150$), reflecting the partial offsetting effect of ecological compensation. The constructed comprehensive heat island pressure index ($\rho = 0.550$) effectively reveals the synergistic mechanism between the real-time changes of meteorological factors and the long-term slow release of ecological factors, providing a quantitative basis for the governance and ecological planning of the heat island effect in northern industrial cities.

Keywords

Urban Heat Island Effect, Shenyang City, Evolution Characteristics, Lag Effect

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

城市热岛效应(Urban Heat Island Effect)是城市气温显著高于周边郊区的热环境胁迫现象,也是城市化进程中常见的气候环境问题[1]。伴随全球城市化扩张,城区与郊区间的温差日益显著,热岛强度已成为评价城市生态环境质量的关键指标之一[2][3]。高温天气在加剧城市能耗的同时,也对居民健康构成威胁,因此缓解热岛效应对于改善城市人居环境具有重要意义[4]。国内相关研究已积累丰富成果。高俊雅等运用 Sen 与 Mann-Kendall 趋势分析方法,在哈尔滨市气温数据及高温区分布基础上揭示了该市热岛效应的时空演变特征[5];童陆亿等通过地理加权回归模型,探讨了青岛市热岛效应与多因素的相关性[3];张泽秀等则利用 Landsat 影像与单窗算法反演地表温度,系统分析了太原市热岛效应的空间格局与强度特征[6]。然而,现有研究多聚焦于我国东部地区及大中型城市,针对东北地区处于快速工业化转型期的老工业基地城市的系统研究尚显不足,且多限于气象因素分析,未能充分揭示此类城市在工业减排、生态修复与能源结构转型多重任务叠加背景下,热岛效应形成的复杂驱动机制。

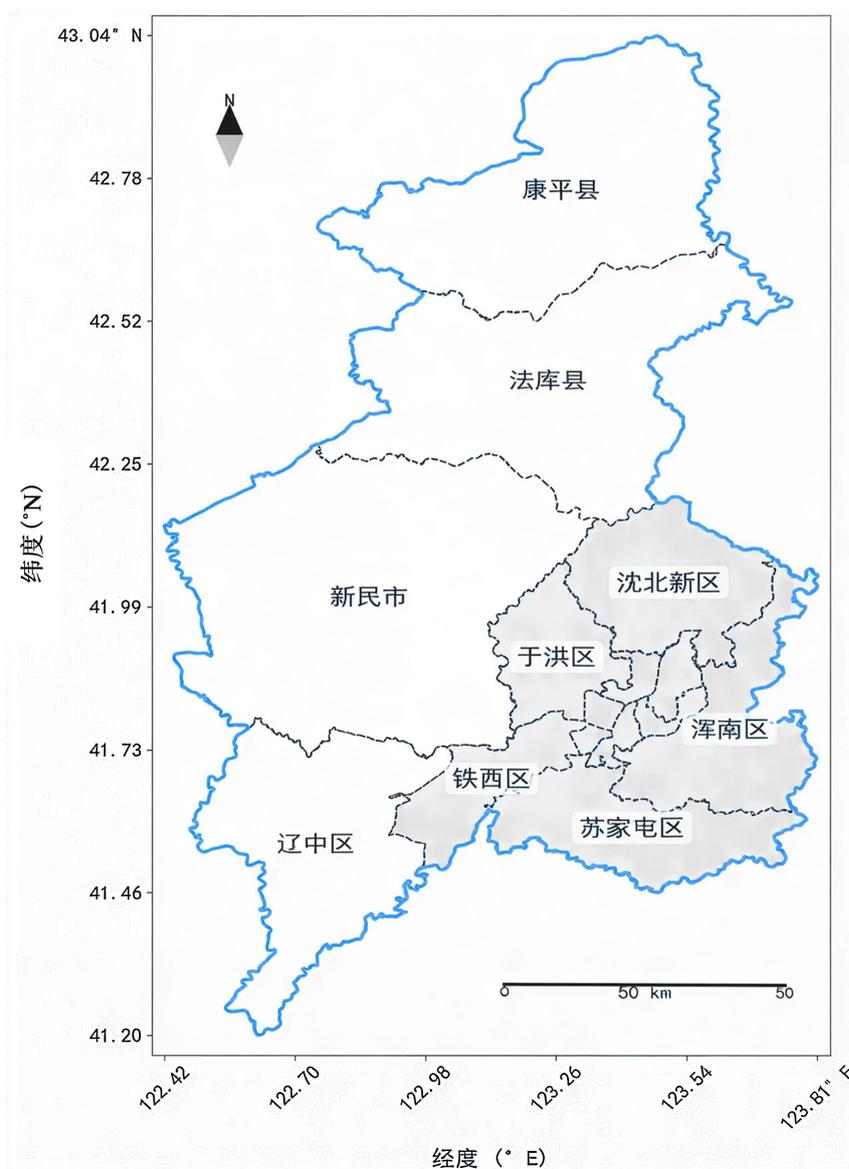
沈阳市作为辽宁省东北地区重要的经济、文化和工业中心,工业基础雄厚,装备制造业发达,城市化进程迅速。至 2016 年以来,沈阳市夏季城市热岛效应持续加剧,因此,开展沈阳市近年热岛效应演变特征的系统性研究具有重要现实意义。本文以沈阳市为研究区域,基于 2016 年至 2024 年的气象、城市规划及人为活动等数据,计算热岛强度,运用 Spearman 秩相关分析探讨其与各类影响因素的关联特征,运用移动平均分析和滞后效应分析方法,并构建了综合热岛压力指数系统分析各因素的演变规律与影响机制,为沈阳市热岛效应缓解与城市规划提供科学参考依据。

2. 研究与数据

2.1. 研究区域概况

沈阳市位于中国东北地区南部,辽宁省中部,具体位置在东经 $122^{\circ}25'\sim 123^{\circ}48'$ 、北纬 $41^{\circ}11'\sim 43^{\circ}02'$ 之

间,如图1所示。它是东北地区重要的中心和交通枢纽,总面积约1.29万平方公里。城市建成区面积不断增长,到2024年已达到595.5平方公里。全市地形以平原为主(约占65%),整体从东北向西南缓缓倾斜,海拔在50到266米之间。辽河及其支流浑河、蒲河是主要河流。沈阳属于典型的温带大陆性季风气候,四季分明,雨热同期。全年平均气温8.4℃,一月最冷,平均-11.0℃;八月最热,平均29.2℃。年平均降水量约622.5毫米,主要集中在6到8月,占全年六成五以上,春冬季比较干旱。月平均风速在5.65到6.45米/秒之间,月均日照时长7.63到10.17小时。截至2024年,沈阳常住人口约924.3万人,其中城镇人口约790.7万,城镇化率高达85.5%。全市机动车保有量约326.7万辆,全年用电量447.32亿千瓦时,显示出较大规模的人为热排放和能源消耗。同时,城市绿化持续改善,2024年建成区的绿地率和绿化覆盖率已分别达到40.8%和42.7%。



注:该图为作者自主绘制,底图地理轮廓依据沈阳市官方行政区域界线制作,无地理信息修改。

Figure 1. Administrative divisions of Shenyang city

图1. 沈阳市行政区域划分

2.2. 数据来源与预处理

2.2.1. 数据来源

本文研究使用的数据涵盖城市人为活动、生态建设、环境质量及气象观测四大类，数据来源包括政府统计年鉴、环境质量公报、气象大数据平台等。所有数据均经过质量控制与一致性处理。具体数据来源见表 1。

Table 1. Research data sources

表 1. 研究数据来源

数据类别	具体指标	时间尺度	数据来源
气象观测	市中心温度(沈河区)	月	镜像地球·气象大数据平台 https://mirror-earth.com/wea_history/210100/2020-08
	郊区温度(新民市、康平县、法库县)	月	
	月均风速	月	
	月均日照时长	月	
环境质量	PM _{2.5} 年均浓度	年	沈阳市生态环境局 - 沈阳市生态环境质量状况公报 https://sthj.shenyang.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/hjzl/
	NO ₂ 年均浓度	年	
人为活动	常住、城镇、乡村人口数	年	沈阳市统计局 - 统计年鉴 https://tjj.shenyang.gov.cn/sjfb/ndsj/
	全社会机动车数量	年	
	全社会用电量	年	
城市生态	建成区绿地率	年	沈阳市生态环境局 - 沈阳市生态环境质量状况公报 https://sthj.shenyang.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/hjzl/
	建成区绿化覆盖率	年	
	地表水资源	年	辽宁省水利厅 - 辽宁省水资源公报 https://slt.ln.gov.cn/jbgb/szygb/

2.2.2. 数据预处理

为保证后续特征分析的准确性，需要对 2016 年至 2024 年的原始数据进行质量控制与整合处理。首先，采用 3σ 准则对热岛强度等关键指标进行异常值识别，异常值占比约为 0.8%，同时使用线性插值法对异常及缺失数据进行填补，以确保数据连续完整。对所有影响因素进行 Z-score 标准化处理，使其转换为均值为 0、标准差为 1 的可比数据序列，用以消除不同变量间的量纲差异。构建空气质量综合指数(AQCI)表征多污染物对热岛效应的协同影响，即将 PM_{2.5} 与 NO₂ 浓度分别归一化至 [0, 1] 区间后，按等权重计算均值，其计算公式为

$$AQI_{composite} = \frac{PM_{2.5norm} + NO_{2norm}}{2} \quad (1)$$

其中 $AQI_{composite}$ 为空气质量综合指数， $PM_{2.5norm}$ 为归一化后的 PM_{2.5} 浓度， NO_{2norm} 为归一化后的 NO₂ 浓度。经 Spearman 秩相关分析法验证(如图 4)，该指数与热岛强度的相关系数($\rho = 0.350$)较单一污染物平均相关系数(0.296)提升 0.054，能更有效反映多污染物的综合效应。

3. 研究方法

3.1. 热岛强度计算

城市热岛强度取值为城市中心区的气象站点观测温度与多个分布均匀的郊区观测点温度均值之间的

气温差异[7]。该方法已在京津冀[8]和哈尔滨[9]等北方城市热岛效应研究中应用。本文选取沈阳市沈河区为城市中心区域,该站点周边下垫面以建筑、道路等城市用地为主,能真实反映沈阳市中心城区热环境特征。新民市、康平县、法库县为郊区观测点。这三个站点距离沈阳市建成区边缘 20 km 以上,人口密度低,下垫面以自然植被或农田为主,且空间分布覆盖城市北部不同方位,可有效代表郊区热环境背景。热岛强度计算公式如下:

$$UHIT = T_{center} - \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \quad (2)$$

式中, $UHIT$ 为热岛强度($^{\circ}\text{C}$); T_{center} 为沈阳市沈河区气象站点的年平均气温($^{\circ}\text{C}$); T_1 、 T_2 、 T_3 分别为新民市、康平县、法库县三个郊区气象站点的同期年平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

3.2. 相关性分析

为量化各因素对城市热岛效应的影响,采用 Spearman 秩相关分析法计算月均日照时长、风速、地表水资源量、建成区绿化覆盖率、空气质量综合指数、城镇化率、机动车保有量、社会用电量及人口密度共 9 项指标与热岛强度之间的相关系数。该方法不要求数据服从正态分布,适用于本文研究的数据类型。依据相关系数绝对值($|\rho|$)评估关联强度: $|\rho| \geq 0.5$ 为强相关, $0.3 \leq |\rho| < 0.5$ 为中等相关, $|\rho| < 0.3$ 为弱相关。

3.3. 移动平均分析与滞后效应分析

为消除时间序列数据中可能存在的年度偶然性波动,分析其长期变化趋势,本文对地表水资源量、建成区绿化覆盖率及空气质量综合指数这三个关键环境因子进行年的移动平均处理。具体计算方法为:将当年数据与前一年数据取算术平均值,作为该年的移动平均值。该方法可有效平滑时间序列曲线,减少短期波动干扰。增加绿化覆盖率、优化水资源配置等生态调控措施的降温效应通常具有时滞性[10]。本文引入滞后一年的效应分析方法分析这些因素对沈阳市热岛效应的影响,第 t 年热岛强度与第 $t-1$ 年环境因子进行相关性分析,并将所得滞后相关系数与同年的即时相关系数进行对比。

3.4. 综合热岛压力指数

为量化多种因素对热岛效应的综合驱动作用,采用客观赋权法构建综合热岛压力指数。权重分配原则为各因素的权重与其相关系数绝对值的大小成比例。具体计算步骤如下:

1) 计算相关系数与权重: 计算各因素与热岛强度的 Spearman 相关系数 ρ_i 。第 i 个因素的权重 W_i 计算公式为

$$W_i = \frac{|\rho_i|}{\sum_{i=1}^n |\rho_i|} \quad (3)$$

式中 n 为参与指数构建的因素总数。

2) 数据标准化: 采用 Z-score 标准化方法对所有因素进行标准化处理,得到标准化值 Z_i ,以消除量纲差异。

3) 构建综合指数: 综合热岛压力指数的计算公式为

$$CHPI = \sum_{i=1}^n (S_i \times W_i \times Z_i) \quad (4)$$

式中, S_i 用于区分因素的作用方向: 当该因素与热岛强度呈正相关时(即加剧热岛效应), $S_i = +1$; 呈负相关时(即缓解热岛效应), $S_i = -1$ 。

4. 研究结果分析

4.1. 热岛强度演变特征

为分析热岛强度随时间的变化特征，根据公式(2)计算了沈阳市 2016 年至 2024 年的热岛强度，结果如图 2 所示。整体来看，热岛强度呈波动变化，数值在 0.038 到 0.714 之间，未形成持续增强或减弱的趋势，但不同年份之间差异显著。其中，2018 年热岛强度最高，为 0.714℃；2022 年最低，仅 0.038℃，两者相差近 18 倍。这说明沈阳市的热岛效应并非由单一因素决定，而是城市建设与生态保护相互制约、共同影响的结果。

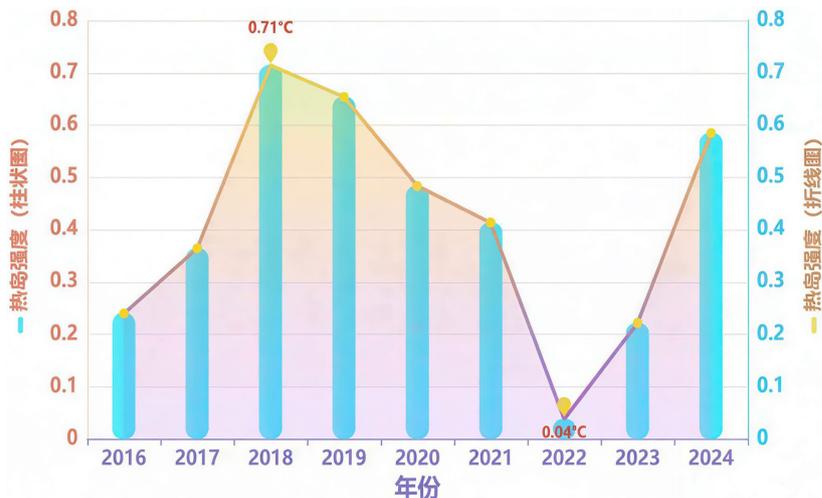


Figure 2. Trend of urban heat island intensity in Shenyang from 2016 to 2024
图 2. 2016 年至 2024 年的沈阳市热岛强度变化趋势

4.2. 因素相关性分析

影响沈阳市热岛强度的因素依据相关系数(ρ)划分为核心驱动因素($0.3 \leq |\rho| < 0.7$)和次要影响因素($|\rho| < 0.3$)。全变量 Spearman 相关性如图 3 所示。由图可知，核心驱动因素包括月均日照时长($\rho = 0.450$ ，中等正相关)、空气质量综合指数($\rho = 0.350$ ，中等正相关)以及月均风速($\rho = -0.300$ ，中等负相关)。月均日照时长和空气质量综合指数均呈正向相关，表明能量输入与空气污染会增加热岛效应，而月均风速则表现为显著的负相关，是城市热扩散的关键调控因素。次要影响因素包括地表水资源($\rho = -0.183$)、建成区绿化覆盖率、城镇化率、机动车保有量、全社会用电量和人口密度($\rho = -0.183$)，表明沈阳市在城市发展过程中生态建设与人为热排在一定程度上形成动态平衡。

图 4 显示，与热岛强度的相关性上，空气质量综合指数($\rho = 0.350$)较单一污染物指标 $PM_{2.5}$ ($\rho = 0.283$)和 NO_2 ($\rho = 0.310$)有所提高，平均优化幅度为 0.054。这表明采用等权重法构建的空气质量综合指数，能更好地反映多种污染物对热岛效应的协同影响。为验证关联的稳健性，进一步对比了各因素与热岛强度的 Spearman 和 Pearson 相关系数(图 5)。结果显示，两种方法所得的相关系数趋势一致，且影响因素排序(月均日照时长 > 空气质量综合指数 > 月均风速)完全相同，证明前述关联特征具有较好的稳定性。

4.3. 核心驱动因素分析

4.3.1. 气象因素

月均日照时长作为主要能量输入来源，与热岛强度呈中等正相关($\rho = 0.450$)，符合北方城市“辐射

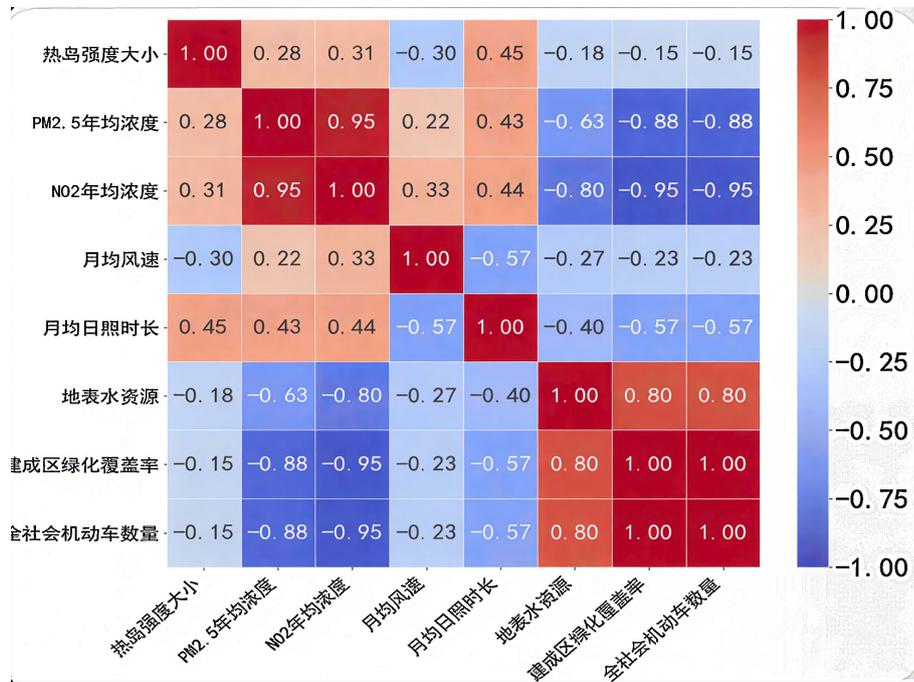


Figure 3. Correlation heatmap of key factors affecting the urban heat island effect
图 3. 热岛效应关键影响因素相关性热力

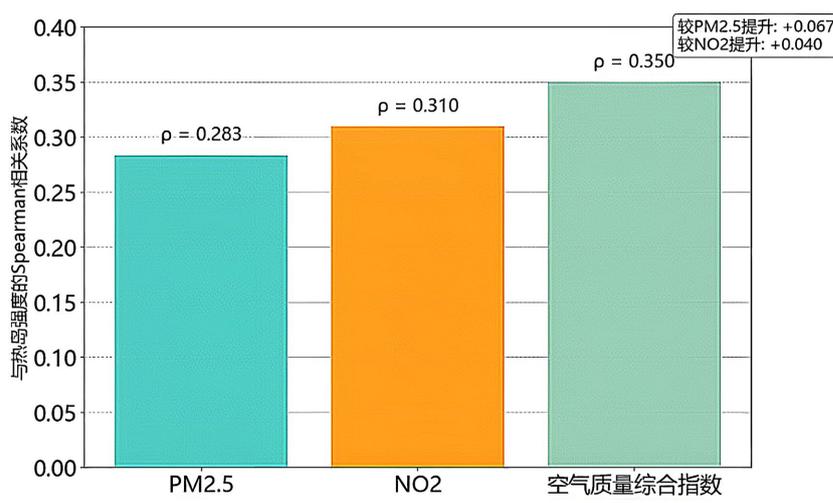


Figure 4. Comparison of the correlation between the comprehensive air quality index and individual air pollutants
图 4. 空气质量综合指数与单个空气污染物相关性对比

主导型”热岛效应的形成机制。沈阳市夏季月均日照时长为 7.63~10.17 小时，日照直接增加了太阳辐射输入，加之城市下垫面以建筑、道路等不透水面为主，蓄热能力显著，共同导致地表温度迅速上升。趋势分析表明，在 37.5% 的年份中，日照与热岛强度呈同向变化，且日照与月均风速呈强负相关($\rho = -0.567$)，易形成“强日照-低风速”的不利气象组合，进一步抑制热量扩散，加剧城市热岛效应。月均风速与热岛强度呈中等负相关($\rho = -0.300$)，其热扩散调节作用与沈阳市所在的辽河平原地形密切相关，风速增大有利于城区积聚的热量向外围输送，从而减缓热岛效应；反之，在风速较低时(如冬季逆温天气)，热量扩散受阻，热岛显著增强。这与哈尔滨[5]、郑州[11]等城市的相关研究结果一致。

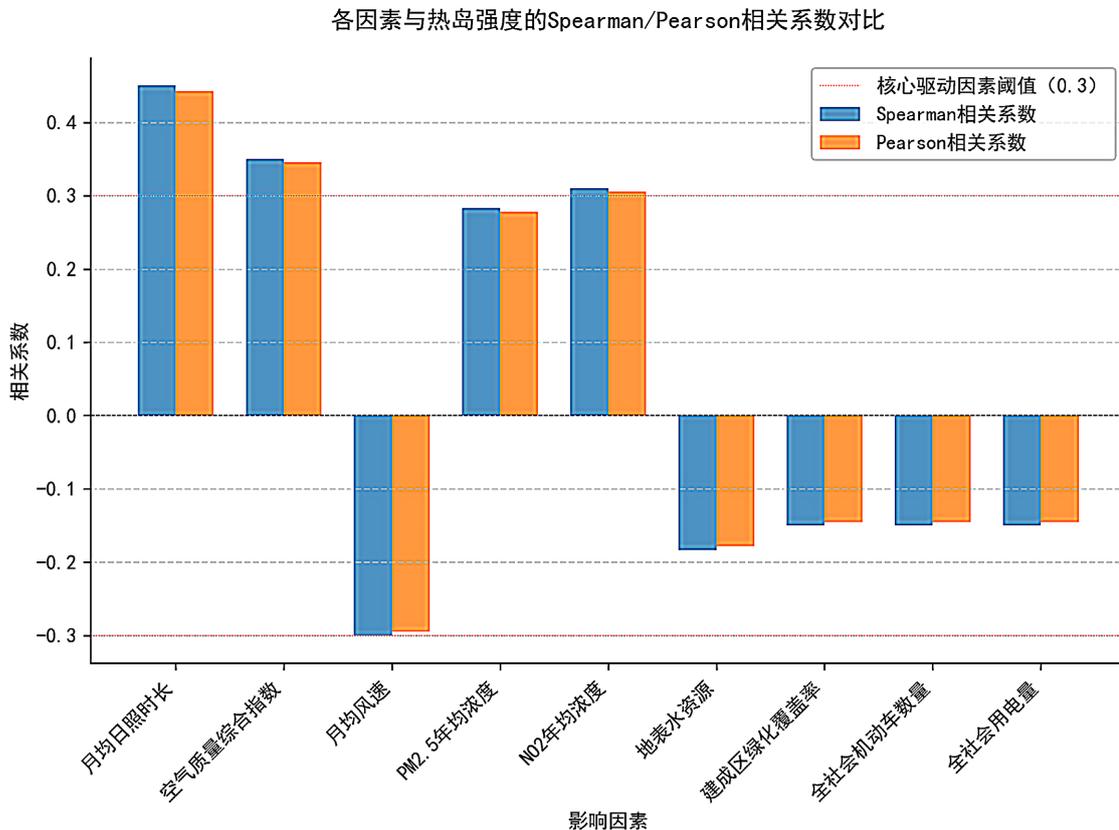


Figure 5. Comparison of Spearman/Pearson correlation coefficients between various factors and urban heat island intensity
图 5. 各因素与热岛强度的 Spearman/Pearson 相关系数对比

4.3.2. 空气质量因素

空气质量综合指数与热岛强度呈中等正相关(相关系数 $\rho = 0.350$), 说明大气污染物的温室效应机制对城市热岛效应具有强化作用。作为典型的老工业基地, 沈阳市在冬季采暖期与工业生产活动的叠加影响下, PM_{2.5}、NO₂ 等污染物浓度维持在较高水平。这些气溶胶和气体组分通过吸收地表向外散射的长波辐射, 阻碍了近地表热量的扩散; 同时, 其存在降低了大气能见度, 使得更多太阳短波辐射被捕获并转化为地表热能。观测数据显示, 沈阳市 2016 年至 2024 年的空气质量综合指数从 1.000 显著下降至 0.1127。这一持续改善的趋势与同期热岛强度的波动变化在时间上基本同步, 证实了大气污染治理措施对于缓解城市热岛效应的积极贡献。相较于 PM_{2.5} 或 NO₂ 等单一污染物指标, 空气质量综合指数因其整合了多种污染物的协同影响, 其与热岛强度的相关性更为显著, 表明多种污染物在对热岛效应的强化过程中存在叠加效应。因此, 从整体上降低复合污染对城市热环境的胁迫, 有必要采取多污染物协同控制的减排策略。

4.4. 次要影响因素的长期效应分析

移动平均分析与滞后效应分析结果表明地表水资源与建成区绿化覆盖率等次要影响因素表现出明显的长期累积与滞后效应, 对热岛强度的长期影响显著, 并具有明确的时间响应特征。这与生态调节功能需通过时间累积才能充分释放的机理一致, 显示出生态措施在缓解热岛效应中的持续性与延迟性。

影响因素与热岛强度的相关性雷达图如图 6 所示。由图可知, 水资源与建成区绿化覆盖率的滞后一年相关性(红色)明显高于其同期相关性(蓝色)。其中, 地表水资源的滞后效应提升最为显著, 相关系数从

0.183 升至 0.738；绿化覆盖率的滞后相关性亦由 0.150 提高至 0.333。相比之下，月均日照时长、空气质量指数等因子的同期与滞后相关性差异较小。可见生态因素对热岛强度的影响具有典型的滞后效应，其调节作用随时间逐步显现。

4.4.1. 地表水资源

地表水资源与热岛强度同期相关性较弱($\rho = -0.183$)，这与沈阳地处辽河流域、水资源相对匮乏的现状相符，水体即时降温效应不显著。图 7 显示，2016~2024 年二者同期波动匹配度低，但将地表水资源滞后 1 年(橙色折线)与热岛强度(蓝色折线)对比，趋势一致性显著增强：2021 年水资源提升对应 2022 年

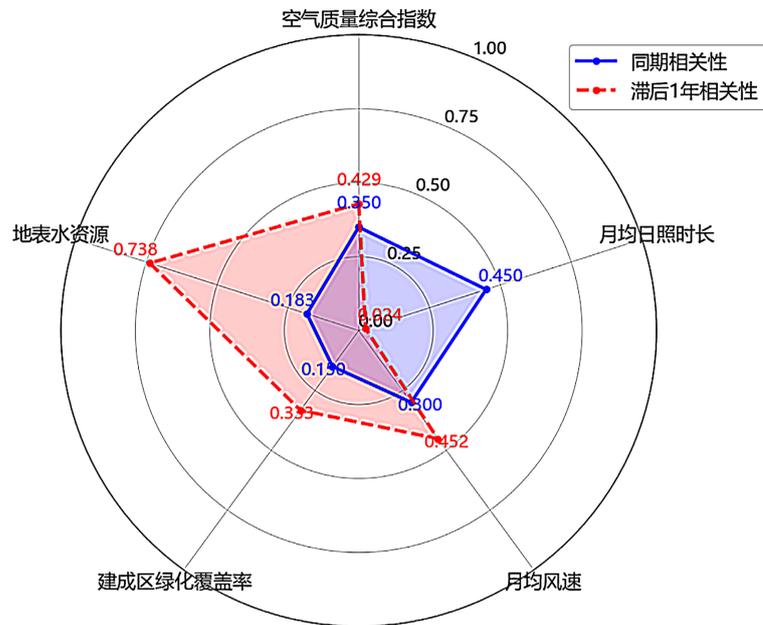


Figure 6. Radar chart of the correlation between influencing factors and urban heat island intensity
图 6. 影响因素与热岛强度相关性雷达图

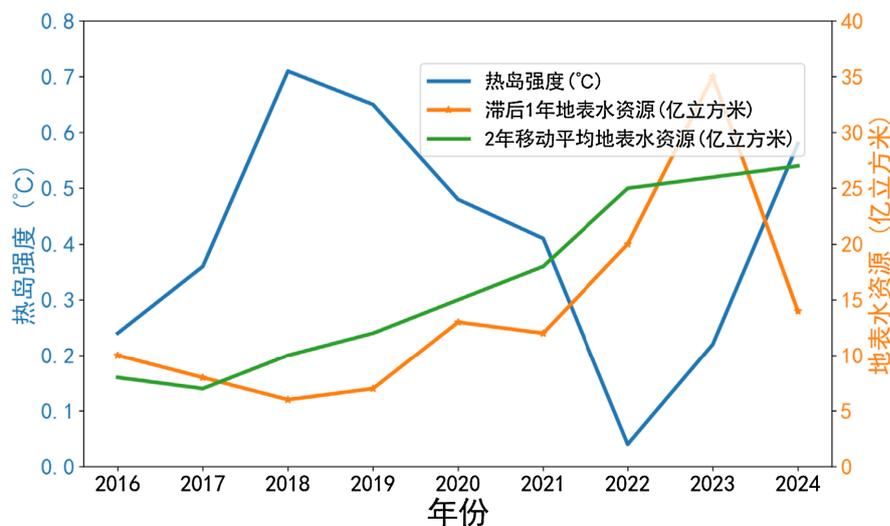


Figure 7. Relationship between surface water resources (concurrent/lagged by 1 year/moving average) and urban heat island intensity

图 7. 地表水资源(同期/滞后 1 年/移动平均)与热岛强度关系图

热岛强度降至低谷(0.0376℃); 2022 年水资源峰值(33.37 亿 m³)对应 2023 年热岛强度维持低位。采用两年移动平均法平滑数据后, 二者相关性由弱相关($\rho \approx -0.183$)提升至中等相关($\rho = -0.548$); 结合滞后一年分析, 相关性进一步增强至强相关($\rho = -0.738$), 表明水体降温效应具有明显的时间滞后性, 沈阳浑河生态修复、湿地建设等工程需经历一年以上恢复期, 才能形成稳定的气候调节能力。

4.4.2. 建成区绿化覆盖率

建成区绿化覆盖率(同期/滞后 1 年/移动平均)与热岛强度关系见图 8。其与热岛强度同期相关性较弱($\rho = -0.15$), 虽沈阳绿化覆盖率已达 42.7%, 但因绿地布局分散、植被以低矮类型为主, 未形成连续降温网络, 即时缓解作用有限。滞后 1 年效应分析显示, 二者相关性提升至 $\rho = -0.343$, 较同期提高 0.193, 证实绿化措施存在明显滞后性。从图 8 可见, 2020~2021 年绿化覆盖率持续上升, 滞后 1 年对应 2021~2022 年热岛强度显著降至低谷(0.0376℃), 滞后响应特征清晰。经 2 年移动平均平滑处理后(图 9), 二者

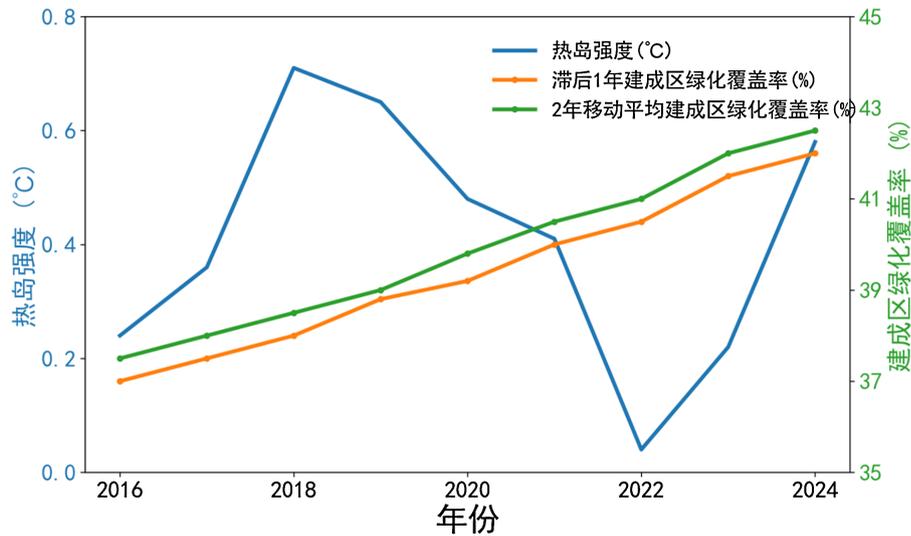


Figure 8. Relationship between green coverage rate in built-up areas (concurrent/1-year lag/moving average) and urban heat island intensity

图 8. 建成区绿化覆盖率(同期/滞后 1 年/移动平均)与热岛强度关系图

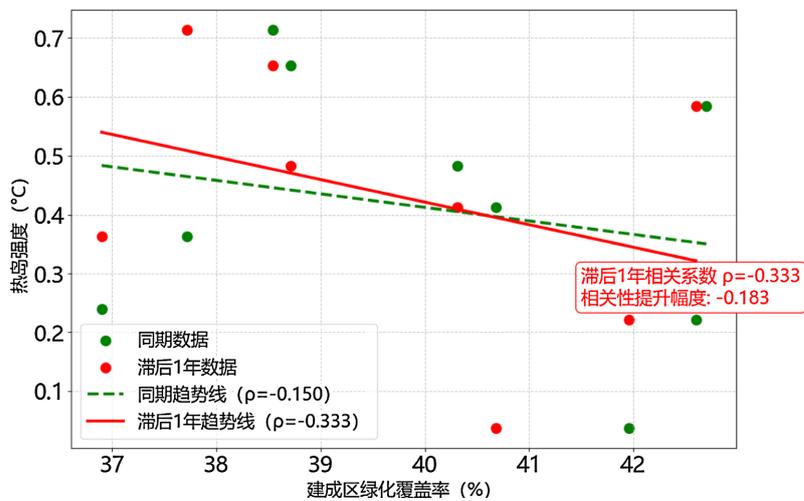


Figure 9. Urban green coverage and heat island intensity map

图 9. 建成区绿化覆盖率与热岛强度图

相关性提升至 $\rho = -0.452$ ，较原始数据提高 0.302，达到中等相关水平。这表明绿地降温效应兼具生长周期与规模效应：树木需 1~2 年生长形成冠层，才能发挥遮荫、蒸腾降温作用；分散绿地也需空间连通形成规模，方可显著缓解热岛效应，该结论与青岛[3]等地相关研究一致。

4.4.3. 人为因素

城镇化率、机动车保有量、用电量及人口密度等人为因素与热岛强度均呈弱负相关($\rho = -0.150$)。这一结果不同于多数城市中人为活动加剧热岛效应[3][5]的一般规律。沈阳市作为老工业基地，在其转型发展过程中呈现出独特的“扩张-补偿”特征。该市在城镇化快速推进的同时，系统开展了绿化提升、水资源保护等生态补偿措施，部分抵消了人为热排放的增温效应，从而形成了“人为扩张 - 生态修复”的动态平衡机制。

4.4.4. 综合热岛压力指数分析

综合热岛压力指数与热岛强度呈中等正相关($\rho = 0.517$)，具体相关系数见图示。从图 10 的趋势对比可看出，2018 年综合指数峰值(0.92)与热岛强度峰值(0.714℃)对应，2022 年指数谷值(0.35)也与热岛强度谷值(0.038℃)对应，二者年际变化趋势高度一致，说明该指数能够有效表征多因素共同作用下热岛效应的主要驱动特征。

权重分析结果(图 11)显示，月均日照时长(0.314)、空气质量综合指数(0.244)和月均风速(0.209)是当前

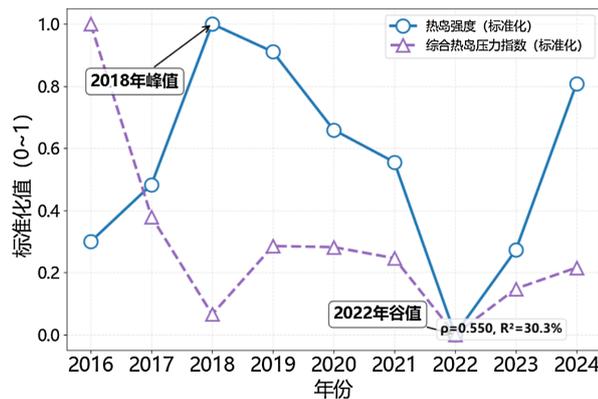
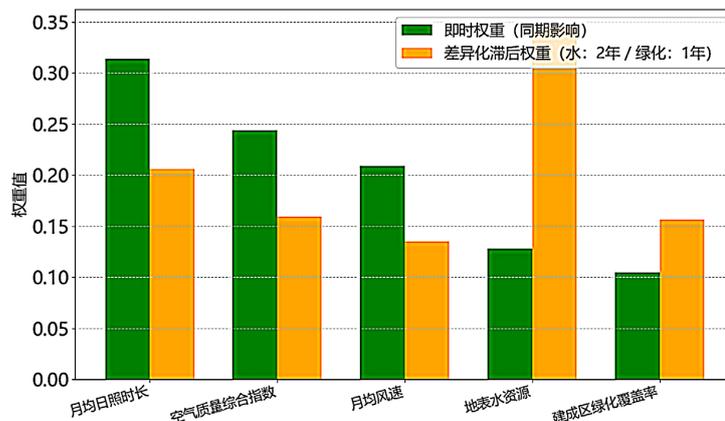


Figure 10. Comparison chart of urban heat island intensity and comprehensive urban heat island pressure index trends
图 10. 热岛强度与综合热岛压力指数趋势对比图



注：地表水资源采用2年滞后权重，建成区绿化覆盖率采用1年滞后权重，其余因素采用1年滞后权重

Figure 11. Comparison of dual-dimensional weights of comprehensive heat island pressure index
图 11. 综合热岛压力指数双维度权重对比图

阶段的核心驱动因素；地表水资源(0.128)和建成区绿化覆盖率(0.105)则为次要影响因素，体现出气象和污染条件的实时影响。然而，在滞后一年的累积数据分析中，地表水资源权重跃升至 0.345，成为首要影响因素，绿化覆盖率的权重也提升至 0.156，这验证了生态因素需经过时间累积才能充分发挥调节作用的特征。

5. 研究结论

本文基于沈阳市 2016 年至 2024 年气象、生态与社会经济数据，综合运用多种统计分析方法，构建了滞后效应模型与综合热岛压力指数，系统分析沈阳市热岛效应的时空演变规律与多维驱动机制，主要结论如下：

(1) 沈阳市 2016 年至 2024 年热岛强度呈现波动的变化特征。热岛强度介于 $0.038^{\circ}\text{C}\sim 0.714^{\circ}\text{C}$ 之间，2018 年达到峰值，2022 年降为谷值，波动幅度显著，反映出热岛效应受多因素复杂调控，并与城市化进程中的建设与生态保护的动态平衡有关。气象因素依然是热岛效应核心驱动因素。月均日照时长是影响最强的单一气象因素，体现出北方城市“辐射主导型”的热岛效应特征；月均风速能有效地对热量扩散进行调控。“强日照 - 低风速”组合会进一步加剧热岛效应。空气质量综合指数相关性分析优于单一大气污染物相关性分析，证实大气污染物之间存在协同增强效应。因此，沈阳市冬季采暖与工业排放叠加形成的复合污染会对热岛效应起到持续放大作用。

(2) 生态因素具有显著的滞后性与累积效应。地表水资源与建成区绿化覆盖率在同期分析中仅呈弱相关，但滞后效应分析发现滞后一年的地表水资源与热岛强度的相关性升至 $\rho = -0.738$ ，滞后两年的绿化覆盖率的相关性提高至 $\rho = -0.452$ ，证实水体与绿地的降温功能需通过生态恢复、植被生长与规模连片逐步释放，属于“长期缓释型”调节因素。

(3) 人为活动与热岛强度呈弱负相关。城镇化率、机动车保有量、用电量及人口密度均与热岛强度呈弱负相关，表明沈阳市在城市化进程中通过绿地建设、水资源保护等生态补偿措施，部分抵消了人为热排放的影响，形成“扩张 - 修复”动态平衡，这一结果与“人为加剧热岛效应”的认知存在差异。

(4) 本文提出的综合热岛压力指数有效地集成了多因素影响。该指数在年际波动上与热岛强度同步变化，其权重结构清晰地区分了气象与大气污染因素的实时驱动作用以及生态因素的长期缓释作用，为分阶段、有重点的热岛效应治理提供了量化依据。

基金项目

2026 年辽宁科技大学大学生创新创业训练计划项目。

参考文献

- [1] 黄庆洪, 张友水, 周溪松. 城市热形态指数构建与福州热岛效应评估[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(12): 13-24.
- [2] 张道远, 沈琪, 王大鹏, 等. 2017-2022 年南京城市热岛效应特征研究与分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2024, 41(6): 67-69.
- [3] 童陆亿, 陈赞, 罗素, 等. 城市地表温度与下垫面关系的时空分异特征及其对缓解热岛效应的启示——以青岛市为例[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(3): 39-49.
- [4] 杜爱军, 张德军, 祝好, 等. 基于多源卫星资料的重庆巴南区城市热岛效应时空变化特征分析[J]. 陕西气象, 2024(3): 53-61.
- [5] 高俊雅, 赵光影, 朱明轩, 张璐璐. 1991-2021 年哈尔滨市热岛效应时空特征及影响因素分析[J]. 黑龙江科学, 2024, 15(14): 63-66.
- [6] 张泽秀, 周晋红, 周鹏, 等. 基于 Landsat 影像的太原市城区热岛效应特征分析[J]. 环境与发展, 2023, 35(6): 87-91, 98.

-
- [7] 王伟民, 熊向隰, 郭键锋, 等. 深圳市环境监测中心站, 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国环境监测总站. DB4403/T193-2021 城市热岛效应遥感评估技术规范[S]. 深圳: 深圳市市场监督管理局, 2021.
- [8] 刘勇洪, 房小怡, 张硕, 栾庆祖, 权维俊. 京津冀城市群热岛定量评估[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5818-5835.
- [9] 宋海宏, 唐婧楠, 崔鹏, 等. 寒地城市景观格局对地表温度及碳汇效能影响机制研究——以哈尔滨为例[J]. 建筑科学, 2025, 41(2): 213-220, 236.
- [10] 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.
- [11] 王笑笑, 王超起, 张亚丽, 等. 郑州市 PM_{2.5} 污染和热岛效应的演变规律及其时空关联特征与影响机制[J]. 环境科学学报, 2025, 45(11): 329-344.