

呼和浩特市地表温度变化及热岛效应分析

苏叶

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年4月16日; 发布日期: 2025年4月25日

摘要

在全球气候变化与快速城市化背景下, 寒旱区城市热岛效应因其生态脆弱性成为关键科学问题。本文基于2001~2022年MODIS遥感数据, 结合GIS技术, 系统分析了呼和浩特市地表温度的时空格局演变及冷热岛的时空分布特征。研究发现: (1) 时间上, 冬季地表温度呈现矛盾趋势, 最高值波动上升, 最低值持续下降, 反映冬季极端低温频发与基础温度升高的矛盾性; 夏季则表现为高温低温同步上升的趋势; 季节性差异显著扩大的现象。(2) 空间上, 热岛范围从老城区单核结构演变为“主城 + 金川 + 盛乐”多核格局, 沿交通轴线扩散并与城市建成区扩张高度相似; 冷岛依附于自然基底, 降温范围局限且呈现碎片化。研究进一步分析地表温度的时间格局变化, 揭示寒旱区冷热岛时空分布特征, 未来需融合高分辨率遥感与多源数据, 深化研究冷热岛效应的影响机制与热岛对生态系统服务的长期影响评估, 为全球同类型城市可持续发展提供科学范式。

关键词

地表温度, 热岛效应, 冷热岛分布, 呼和浩特市

Analysis of Surface Temperature Change and Heat Island Effect in Hohhot City

Ye Su

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

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Apr. 16th, 2025; published: Apr. 25th, 2025

Abstract

In the context of global climate change and rapid urbanization, the urban heat island effect in cold

文章引用: 苏叶. 呼和浩特市地表温度变化及热岛效应分析[J]. 地理科学研究, 2025, 14(2): 309-315.

DOI: 10.12677/gser.2025.142032

and arid regions has become a key scientific issue due to its ecological vulnerability. In this paper, based on MODIS remote sensing data from 2001 to 2022, combined with GIS technology, we systematically analyzed the evolution of spatial and temporal patterns of surface temperature and the spatial and temporal distribution characteristics of hot and cold islands in Hohhot City. It is found that: (1) temporally, the surface temperature in winter shows a contradictory trend, with the maximum value fluctuating up and the minimum value continuously decreasing, reflecting the contradictory nature of the frequent occurrence of extremely low temperatures and the increase of base temperature in winter; in summer, it shows a synchronized trend of the increase of high temperature and low temperature; and the phenomenon of significant expansion of the seasonal difference. (2) Spatially, the range of heat islands has evolved from a single-core structure in the old city to a multi-core pattern of “main city + Jinchuan + Shengle”, which spreads along the transportation axis and is highly similar to the expansion of the built-up area of the city; and the cold islands are dependent on the natural substrate, with a limited range of cooling and fragmentation. The study further analyzes the temporal pattern of surface temperature changes and reveals the spatial and temporal distribution characteristics of hot and cold islands in the cold and arid regions. In the future, it is necessary to integrate high-resolution remote sensing and multi-source data to deepen the study of the influence mechanism of the hot and cold island effect and the long-term impact assessment of hot islands on ecosystem services, in order to provide a scientific paradigm for the sustainable development of the same kind of cities in the world.

Keywords

Surface Temperature, Heat Island Effect, Hot and Cold Island Distribution, Hohhot City

Copyright © 2025 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

在全球气候变化的大背景下，城市化进程的加速使各种城市病也随之显现出来。其中，地表温度变化及热岛效应问题日益突出。寒旱区城市热岛效应加剧伴随着生态脆弱性，呼和浩特作为中国北方典型生态屏障城市，热岛扩张威胁“草原都市”可持续发展。

城市热岛效应(Urban Heat Island, UHI)作为城市化进程的典型环境问题，在过去的几十年里，Luke Howard (1880)通过伦敦气温观测首次提出“城市热岛”概念[1]，其形成机制与影响研究逐步深入[2]。Oke在1987年提出“地表能量平衡理论”，强调建筑密度与地表覆盖变化的决定性影响[3]。随着遥感技术[4][5]、气象观测[6][7]和数值模拟[8][9]的融合应用，热岛效应的时空分异规律得以量化[10]-[12]。大量的研究文献已经揭示了城市热岛效应的形成机制[13]。其中，城市中的工业、交通以及人口密集区域的热排放导致了城市的热量积聚[14]。影响着城市热岛效应的形成。除了人为因素，自然因素也对城市热岛效应的形成起到了一定的作用[15]，城市的地形[16]、植被覆盖[17]以及气候条件[18]都会影响城市热岛效应的强度和分布。

城市热岛效应的加剧对城市环境和人类健康产生了重要影响。城市热岛效应不仅影响城市的气候和大气环境，还会导致城市居住环境的不适。由于城市热岛引起的热量积聚，居民需要更多的能源来制冷确保居住环境的舒适，从而加速热岛强度的形成[19][20]。热岛效应还会影响该地区的水气循环[21]，加剧城市的水资源压力以及人工成本。高温和低空湍流(热浪)的增加会导致城市空气质量的恶化，进而对居

民的健康产生负面影响[22]。

综上所述,城市热岛效应是一个复杂而重要的研究领域。现有的研究多聚焦湿润区城市,寒旱区热岛驱动机制研究不足,未来的研究应该进一步探索长时间序列的城市热岛效应的时空分异规律以寻找有效的适应策略。因此,本文通过呼和浩特市近 20 年的遥感影像数据实证研究,分析归纳热岛效应的时空规律,探讨其发展趋势。研究结果不仅可以为城市规划和环境保护提供科学依据,还可以为其他城市应对类似问题提供参考。研究呼和浩特市地表温度变化及其热岛效应,对于理解城市化进程中的环境问题及制定相应的应对措施具有重要意义。

2. 研究数据与方法

2.1. 数据采集与预处理

利用了 MODIS 遥感数据来进行地表温度反演,地表温度(Land surface temperature)数据,简称 LST。为了得到呼和浩特市长时间序列的地表温度,使用了从美国国家航空航天 NASA 官网(<https://earthdata.nasa.gov/>)下载获取的 MODIS 产品 MODIS/006/MOD11A1 的时间序列数据,该产品是经过官方已经过各种矫正和处理的,精度较高,且范围广,排除了云雨条件等影响。分辨率为 1000 米,适用于大区域。为了更好的对冷热岛的关系进行分析,本文中只考虑了冬夏季进行研究,采用了逐年的最低温度月与最高温度月的数据,即逐年的与 7 月的数据进行研究。

对图像质量进行测试,选取质量比较好的遥感影像,采用了平均值来获取逐年的月值数据。最终获取 2001~2022 年的逐年 1 月与 7 月的地表温度值。由于数据量较大,本文基于 GEE 进行批量下载。再将得到的图像经过辐射校正、大气校正、几何校正及地理配准等预处理,对地表温度影像进行分类,提取城市区域的地表温度数据。

2.2. 研究方法

(1) 均值 - 标准差法

参考前人的研究文章发现,均值 - 标准差法在消除不同时期影像差异方面具有显著优势,并且更能细致地表征区域内部热环境的变化细节[23]。因此,本文选择采用均值 - 标准差法对呼和浩特市的地表温度进行衡量,再对其热岛强度划分为五个等级。在本研究中,使用序号分级来划分热岛等级,序号分级与热岛等级的对应关系详见表 1。划分区间依据地表温度反演结果确定。

(2) 空间分析方法

空间分析指的是通过 GIS 等地图处理软件对地理空间现象的定量化研究。其原理是将地理空间目标划分为不同类型的点、线和面,并获得这些不同类型目标的形态结构,通过空间分析用不同的形式表示[24]。基于本研究的研究目的,采用了 ArcGISpro 中的提取分析、统计分析等重要分析方法对热岛强度数据进行空间可视化,将空间数据和属性数据相互连接,进行特定任务的空间计算与分析。

3. 呼和浩特市地表温度时间变化分析

为了更细致地研究呼和浩特市逐年地表温度变化,本文将 1 月与 7 月的地表温度平均值、最小值与最大值进行了比较,得出了图 1 所示的趋势线结果。

整体来看,1 月和 7 月的最高温度、最低温度、平均温度整体呈现上升趋势,但冬季最低温的波动较大,夏季的增温趋势更明显。冬季升温缓慢,夏季更显著升温。

再先从 1 月的平均值、最大值和最小值的变化趋势来看,1 月的平均值在波动中有微幅上升,最大值从 2001 年的 -5°C 上升到 2022 年的 0°C ,显示冬季最高温度在逐渐升高。然而,最小值从 -20°C 降至 -25°C ,

说明冬季的极端低温更加频繁或更加强烈。这种矛盾现象可能反映了气候变化中的温度波动性增加，既有暖冬趋势，也有极端寒潮事件。

7月的平均值、最大值和最小值均呈上升趋势，最大值从35℃上升到40℃，升幅达5℃，平均值上升3℃，最低值也上升了约2℃。这表明夏季最高温度值逐越上升最低温度值也同步上升的现象，整体夏季趋热明显。这与全球变暖背景下的普遍趋势一致。

比对两个季节的趋势线，能够看出季节性差异的扩大以及“冬夏双强化”的特征。1月均温升幅(1.5℃)高于7月(3℃)，由此可见，地表温度的变化虽然在数值上受太阳辐射、下垫面等的影响较强，但是在整个季节上，1月的升高幅度比7月的要高，这也在某种程度上表明了热岛强度的形成在冬季显现效果更强。在整个时间序列上冬夏季的温度呈现阶段性规律较相似。可以分为2001~2010缓慢升温期、2011~2020波动升温期以及2021~2022稳定升温期。而这些阶段正好反映了呼和浩特市城市化的起步期、扩张期以及扩张稳定期。

此外，呼和浩特位于温带大陆性气候区，冬季寒冷干燥，夏季温热短促。近年来，全球气候变暖趋势导致北方城市冬季气温上升，夏季高温日数增加。7月的最高温度、最低温度、平均温度均有所升高，符合气候变暖趋势。

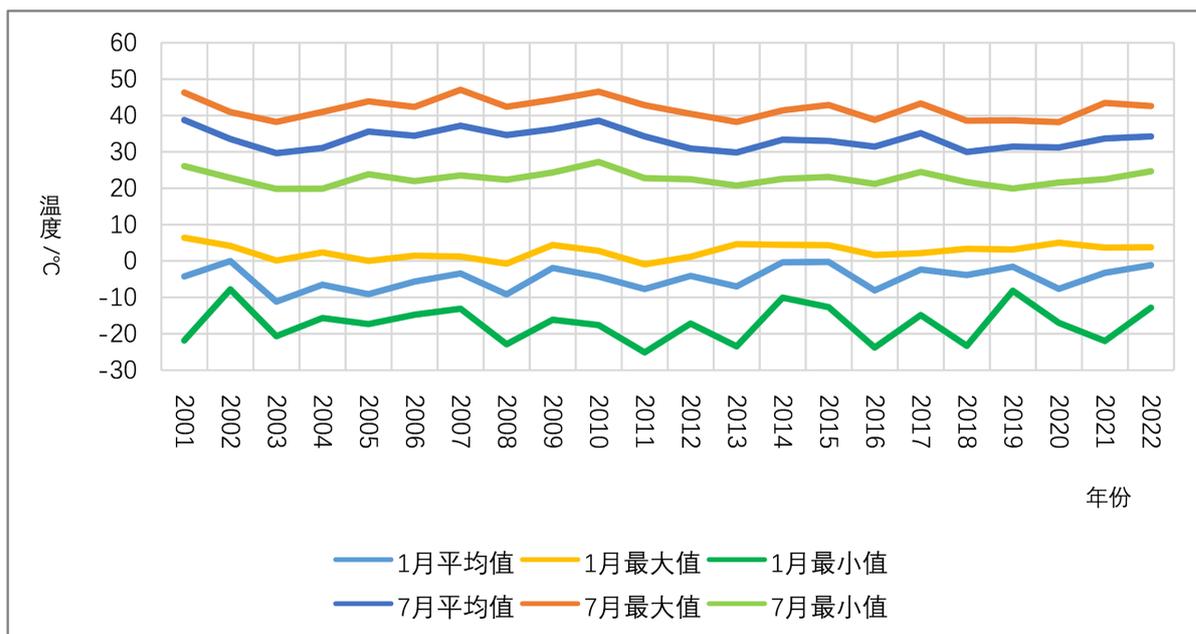


Figure 1. Annual surface temperature time pattern variation

图 1. 逐年地表温度时间格局变化图

4. 基于地表温度的呼和浩特市冷热岛强度时空变化特征分析

4.1. 基于地表温度的冷热岛强度划分

为了更好地诠释呼和浩特市的地表温度形成的冷热岛的现象，本研究对逐年间呼和浩特市的地表温度反演结果进行了归一化处理，并利用 ArcGIS 软件通过密度分割原理将其划分为不同强度等级，界限点为 0、0.4、0.5、0.6、0.7、1，对应五个强度区间。为进一步分析呼和浩特市热岛效应特征，结合均值 - 标准差法等级划分法，将地表温度分为强冷岛区、弱冷岛区、无热岛区、弱热岛区及强热岛区五个等级(如表 1 所示)。

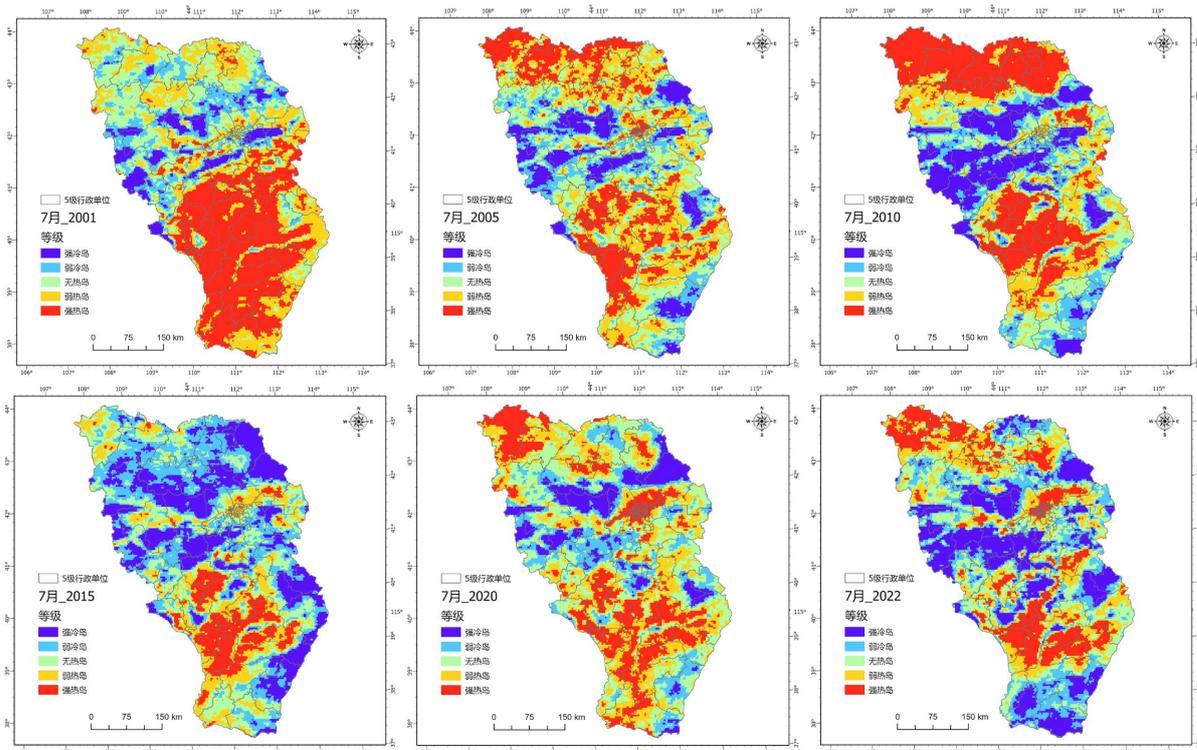
Table 1. Explanation of the intensity classification of heat and cold islands
表 1. 冷热岛强度划分说明

| 冷热岛强度 | 序号分级 | 划分区间 |
|-------|------|---------|
| 强冷岛 | I | 0~0.4 |
| 弱冷岛 | II | 0.4~0.5 |
| 无热岛 | III | 0.5~0.6 |
| 弱热岛 | IV | 0.6~0.7 |
| 强热岛 | V | 0.7~1 |

4.2. 呼和浩特市冷热岛强度时空变化特征分析

利用 GIS 技术对呼和浩特市地表温度的空间分布进行分析，发现地表温度的空间分布具有明显的区域差异，城市核心区显现出热岛，而农村地区显现处冷岛的特征。特别是在夏季，城市核心区的地表温度较周边区域高出 5℃ 以上。季节上，呼和浩特市热岛效应季节变化特征明显，夏季热岛效应更明显，而冬季冷岛效应更显著。随着城市化进程的推进，不同季节的冷热岛效应差异逐渐增大，特别是在夏季，地表温度的上升幅度更为显著。

根据前人的研究得出，冷热岛效应具有着显著的季节性规律且在城市建筑区地区夏季显现出来的热岛效应会更显著，乡村地区则在冬季更显现出冷岛的特征。在对呼和浩特市冬季与夏季的地表温度进行处理以后发现夏季呈现出来的效果与现实城市发展规律较符合，且按照 5 年为一个单元进行划分所得到的规律如图 2 所示。



(注：该图基于国家基础地理信息中心发布的《2024 版国家地理信息公共服务平台(天地图)正式发布》公告，天地图官方网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。)

Figure 2. Space-time distribution features of heat and cold island intensities
图 2. 冷热岛强度时空分布特征图

从图 2 中可以看到, 2001 年热岛集中于以中山路为商圈的老城区, 强度年均增长 0.3°C , 到 2010 年呼和浩特市的热岛区域向外扩散, 表明城市核心区初步扩张, 工业用地零星分布, 金川开发区启动, 东南向扩展加速, 部分农田转为工业与住宅用地。再到 2015 年, 人工冷岛随生态工程显现, 大青山南麓绿化带降温达 2°C , 但局部出现“冷岛破碎化”, 可能与自然降水不均匀或人工灌溉不均衡等问题所引起。2015~2020 期间和林格尔新区规划出台, 热岛重心随着交通干道有南移的趋势。到 2022 年, 热岛强度显现出趋稳状态。由此可以看出呼和浩特市的热岛迁移在空间上显现出核心 - 边缘扩散的特征, 并沿着交通轴线向外延伸。由于冷岛更多地是依附自然基地, 因此冷岛的呈现大多数都是零碎型的分布方式。从冷热岛的时空分异来看, 与呼和浩特市的城市发展规律有着较高的相似性。这也代表了冷热岛的形成与城市化发展有着紧密的联系。但空间范围大至远郊。此外以大青山南麓绿化为例的生态修复工程推进, 形成片区稳定冷岛。

整体上, 呼和浩特市的热岛范围持续扩大, 热岛核心由单一向多核心发展。最初热岛集中在老城区, 随着城市扩张, 新区、工业区也成为热岛中心。冷岛区域逐渐减少, 最终趋于稳定, 受城市扩张影响, 部分冷岛被压缩, 但近年来有部分有修复的现象。加强城市绿化, 通过公园、湿地、绿化带等减少热岛效应。总体而言, 呼和浩特市的热岛效应随着城市化不断增强, 冷岛区域有所减少但在部分地区仍得以维持。未来的城市规划需要更注重生态平衡, 以缓解城市热环境问题, 应当合理规划新区发展, 避免工业区热岛过度集中且需提升城市热环境监测, 结合遥感数据优化城市规划, 控制热岛效应。

5. 结论与讨论

5.1. 主要结论

(1) 呼和浩特市冬季最高温有升高现象, 最低温有降低现象, 说明冬季地表温度呈现矛盾性变化。夏季最高温度值逐月上升, 最低温度值也同步上升的现象, 整体夏季趋热明显。

(2) 季节性差异扩大。1 月均温升幅低于 7 月, 表明夏季热岛效应增强比冬季更快, 可能是因为研究区的地理位置以及城市化水平等多种因素受自然条件的影响更强。

(3) 冷热岛时空分异与现实中的城市扩张规律较相似。热岛范围从老城区单核演变为“主城 + 金川 + 盛乐”多核结构, 沿交通轴线(京藏高速、机场高速)向外扩散, 与建成区扩张边界高度吻合。

(4) 冷岛显现出依附性与局限性。冷岛集中分布于大青山南麓绿化带与哈素海湿地, 如敕勒川公园等人工干预形成的冷岛降温范围有限, 受高层建筑阻隔与自然基底制约, 难以抵消热岛扩张。

5.2. 讨论

与湿润区城市不同, 呼和浩特市具有着寒旱区热岛效应的特殊性。在本研究中提到的热岛效应呈现“冬夏双强化”特征可能与冬季燃煤供暖与夏季工业废热叠加, 加剧极端温度事件相关。此外, 寒旱区植被绿植的分布及类型也可能在某种程度上导致冷岛破碎化。因此, 在后续研究中需进一步分析其驱动机制及量化分析。

城市扩张的“双刃剑”效应一方面体现在交通网络与工业区扩张短期内促进经济增长, 但热岛连片化导致能源需求激增, 很可能会形成“热排放 - 能耗”恶性循环。另一方面, 尽管生态修复工程局部降温显著, 但其规模与城市扩张速度不匹配, 需通过“海绵城市”与屋顶绿化等分布式技术提升生态韧性。

MODIS 数据的分辨率可能低估小尺度热岛异质性, 未来需融合 Landsat 或别的数据提升精度。

参考文献

- [1] Pedgley, D.E. (2003) Luke Howard and His Clouds. *Weather*, **58**, 51-55. <https://doi.org/10.1256/wea.157.02>

- [2] Blench, B.J.R. (1963) Luke Howard and His Contribution to Meteorology. *Weather*, **18**, 83-92. <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1963.tb01977.x>
- [3] Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- [4] Lo, C.P., Quattrochi, D.A. and Luvall, J.C. (1997) Application of High-Resolution Thermal Infrared Remote Sensing and GIS to Assess the Urban Heat Island Effect. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, 287-304. <https://doi.org/10.1080/014311697219079>
- [5] Voogt, J.A. and Oke, T.R. (2003) Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, **86**, 370-384. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(03)00079-8)
- [6] Camuffo, D. (2002) History of the Long Series of Daily Air Temperature in Padova (1725-1998). *Climatic Change*, **53**, 7-75. <https://doi.org/10.1023/a:1014958506923>
- [7] Grimmond, C.S.B. and Oke, T.R. (2002) Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (Lumps). *Journal of Applied Meteorology*, **41**, 792-810. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0792:thfua>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0792:thfua>2.0.co;2)
- [8] Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F. (2001) A Simple Single-Layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-Layer and Slab Models. *Boundary-Layer Meteorology*, **101**, 329-358. <https://doi.org/10.1023/a:1019207923078>
- [9] Saitoh, T.S., Shimada, T. and Hoshi, H. (1996) Modeling and Simulation of the Tokyo Urban Heat Island. *Atmospheric Environment*, **30**, 3431-3442. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00489-0](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00489-0)
- [10] 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>
- [11] Oerlemans, J. (1986) Linear Theory of the Urban Heat Island Circulation. *Atmospheric Environment* (1967), **20**, 447-453. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90084-3](https://doi.org/10.1016/0004-6981(86)90084-3)
- [12] Morris, J.G. (1998) Urban Heat Island and Its Influence on Tree Growth. *Arboricultural Journal*, **22**, 1-18.
- [13] 唐仕瑞, 吴利. 基于 CNKI 的城市热岛效应研究的统计分析[J]. 地理空间信息, 2024, 22(12): 55-59.
- [14] 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/OL]. 环境科学: 1-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjx.202407004>, 2025-03-14.
- [15] 杨务发. 基于热岛效应的城市复合生态廊道构建研究[D]: [博士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2021.
- [16] Arnfield, A.J. (2003) Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*, **23**, 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- [17] 颜萍. 基于遥感数据的成都市土地利用类别与热岛效应关联性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [18] 王阳, 孙然好. 区域气候背景对城市热岛效应的影响规律[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4288-4299.
- [19] Li, X., Zhou, W. and Ouyang, Z. (2013) The Effects of Urbanization on the Thermal Environment: A Case Study of Suzhou, China. *Sustainable Cities and Society*, **6**, 67-74.
- [20] Santamouris, M. (2014) Cooling the Cities—A Review of Reflective and Green Roof Mitigation Technologies to Fight Heat Island and Improve Comfort in Urban Environments. *Solar Energy*, **103**, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- [21] 金燕, 晏红明, 何雨琴, 等. 昆明城市降雨特性变化及城市热岛效应的可能影响[J]. 地理科学, 2024, 44(11): 2039-2050.
- [22] Li, D. and Bou-Zeid, E. (2013) Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 2051-2064. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-13-02.1>
- [23] Qin, Z.H., Dall'Olmo, G., Karnieli, A. and Berliner, P. (2001) Derivation of Split Window Algorithm and Its Sensitivity Analysis for Retrieving Land Surface Temperature from NOAA-Advanced Very High Resolution Radiometer Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**, 22655-22670.
- [24] 曾庆泳, 陈忠暖. 基于 GIS 空间分析法的广东省经济发展区域差异[J]. 经济地理, 2007(4): 558-561+574.