

城市人口热暴露风险及土地利用结构耦合关系研究——以石家庄市为例

齐博杰¹, 秦岭^{1,2*}

¹河北地质大学土地科学与空间规划学院, 河北 石家庄

²河北省农业干旱遥感监测国际联合研究中心, 河北 石家庄

收稿日期: 2026年6月16日; 录用日期: 2026年8月19日; 发布日期: 2026年8月31日

摘要

当前极端高温事件频发, 地表热环境的逐步恶化已成为威胁城市人口健康的主要环境风险。而土地利用和覆盖的变化深刻地促进了当地热失衡和人口热暴露风险的时空变化。为了进一步分析“土地利用-热环境-人口热暴露”的内在驱动机制和空间耦合定律, 本研究以石家庄市为例。利用2004年至2020年的多周期遥感图像和高精度人口网格数据, 结合地表温度反演、景观生态指数和空间自相关模型, 建立了一个综合多尺度分析框架, 用于确定热暴露风险和空间演变。结果显示: 1) 城市建设用地持续扩张深刻地重塑了区域热环境, 直接导致人口热暴露高风险区域的面积显著增加。2) 不同类型的土地利用结构对热暴露风险的影响具有显著的异质性。不透水表面作为热源, 具有较高的正空间相关性, 重心迁移特性与热暴露强度相关。农田和森林植被在生态缓慢释放和缓冲热环境方面发挥着核心作用。人口热暴露风险形成“城镇高聚集、耕地低聚集”的空间模式。3) 城市水系统和蓝绿色生态区的恢复对冷岛附近的当地小气候调节产生了重大影响, 有效抵消了高密度开发造成的热暴露增加的风险。本研究揭示土地利用变化对热暴露风险的影响机制, 为热风险分区与差异化韧性提升提供了定量证据与空间指引。

关键词

人口热暴露, 土地利用结构, 城市热岛, 空间聚类

The Spatial Evolution of Population Heat Exposure and Its Coupling Relationship with Land Use Structure in Shijiazhuang, Hebei Province

Bojie Qi¹, Ling Qin^{1,2*}

¹School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang Hebei

*通讯作者。

文章引用: 齐博杰, 秦岭. 城市人口热暴露风险及土地利用结构耦合关系研究——以石家庄市为例[J]. 地理科学研究, 2026, 15(4): 718-731. DOI: 10.12677/gser.2026.154065

²Hebei Province International Joint Research Center for Agricultural Drought Remote Sensing Monitoring, Shijiazhuang Hebei

Received: June 16, 2026; accepted: August 19, 2026; published: August 31, 2026

Abstract

The frequent occurrence of extreme heat events and the gradual deterioration of the surface thermal environment have become the main environmental risks threatening the health of urban populations. The changes in land use and cover have profoundly promoted the spatiotemporal changes in local thermal imbalance and population heat exposure risk. In order to further analyze the intrinsic driving mechanism and spatial coupling law of “land use thermal environment population heat exposure”, this study takes Shijiazhuang as an example. A comprehensive multi-scale analysis framework was established using multi period remote sensing images and high-precision population grid data from 2004 to 2020, combined with surface temperature inversion, landscape ecological index, and spatial autocorrelation model, to determine heat exposure risk and spatial evolution. The results show that: 1) The continuous expansion of urban construction land has profoundly reshaped the regional thermal environment, directly leading to a significant increase in the area of high-risk areas for population heat exposure. 2) The impact of different types of land use structures on heat exposure risk exhibits significant heterogeneity. The impermeable surface, as a heat source, has a high positive spatial correlation, and the center of gravity migration characteristics are related to the heat exposure intensity. Farmland and forest vegetation play a central role in slow ecological release and buffering of thermal environments. The risk of population heat exposure forms a spatial pattern of “high concentration in urban areas and low concentration in cultivated land”. 3) The restoration of urban water systems and blue-green ecological zones has had a significant impact on local microclimate regulation near Cold Island, effectively offsetting the risk of increased heat exposure caused by high-density development. This study reveals the impact mechanism of land use change on heat exposure risk, providing quantitative evidence and spatial guidance for heat risk zoning and differentiated resilience enhancement.

Keywords

Population Heat Exposure, Land-Use Structure, Urban Heat Island, Spatial Clustering

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

全球气候变化正成为全球陆地增强趋势中最显著的极端热事件之一[1][2], 对人类健康和社会经济系统构成了严重威胁[3]。快速城市化进程进一步放大了风险: 不透水地表不断取代林地与草地等自然植被, 改变了地表能量平衡与热力特性, 导致城市热岛效应普遍增强[4]-[6]。使得城市居民面临更高的热暴露风险和脆弱性[7]-[9]。因此, 将研究视角从传统的“地表热力格局刻画”向以人为本的“人口热暴露风险”升级, 已成为当前城市科学与人类活动交互研究的重要前沿。系统解析“土地利用结构-热环境演变-人口热暴露”的深层耦合驱动机制, 有助于深化对城市复合热风险生成机理的理解。

城市热岛(UHI)效应显著影响人口热暴露风险, 其强度、空间格局及扩张特征与热暴露广度、深度密

切相关, 改变风险空间分布及人口与热环境耦合关系, 进而影响风险范围与严重程度[10]-[12]。城市热岛演变受自然气候波动与人类城市化活动共同驱动[9]-[13], 且人类活动(如无序城市用地扩张[13]、城市中心绿地减少[14][15]、不透水面占比过高)多对热暴露风险产生负面影响[16], 引发热岛面积翻倍[9]、热暴露向近郊扩散[12]、特定群体脆弱性加剧[17]、热暴露不平等[18], 导致风险整体提升。研究表明合理配置蓝绿空间可降低暴露人口数量[16]-[19], 但土地利用调节作用弱化会降低风险管控效果。现有研究虽揭示 UHI 与人口热暴露关联, 但在动态人口分布、精细尺度分析、社会脆弱性识别、区域比较及干预效果评估方面仍有不足。

人口热暴露风险评估以暴露强度与社会脆弱性双维度研究、热环境与人口分布/社会属性/适应策略多重关联探索为主要方向, 此类研究可明晰风险形成机制与分布规律, 影响评估科学性及应用策略有效性, 进而改变管控路径[20][21]。该领域进展受技术与现实需求驱动[22][23], 热风险复杂性也提高了研究要求[24]。暴露强度研究中应用手机信令与气象数据[20]、社会脆弱性研究引入人口密度与老龄化指标[21]等, 虽推动研究发展却凸显单一手段局限及因地制宜制策的迫切性。区域热风险复杂性提升使单一城市治理模式不适配, 现有研究虽在多维度探索与区域治理有进展, 但评估体系统一、数据补齐及政策协同不足, 未来需强化标准化评估并融合地方规划[22]。

现有研究虽关注土地利用结构变化与城市热强度的关系, 但二者与人口热暴露风险的直接关联机制仍不清晰, 主要研究缺陷包括三个方面: 多聚焦土地利用对热环境的影响[25][26]或人口暴露与热环境的相关性[20], 很少从功能分区耦合用地空间形态与风险; 评估多侧重单一因子, 缺多维度框架及对“土地利用-热环境-人口暴露”动态的长期跟踪; 且精细化治理支撑弱, 难提供精准指导[25]。因此, 本文以北方快速城市化典型城市石家庄为研究对象, 旨在实现三项目标: 1) 基于 Landsat 影像、人口网格及土地利用数据, 剖析该市土地利用与城市热岛的时空演变, 刻画人口热暴露风险的时空特征, 明确三者空间分布模式; 2) 通过景观格局指数、空间自相关模型(Moran's I)量化不同用地与人口热暴露强度的关联, 分析二者变化的内在逻辑; 3) 为同类城市热环境治理、气候适应性规划及可持续发展提供理论支撑。

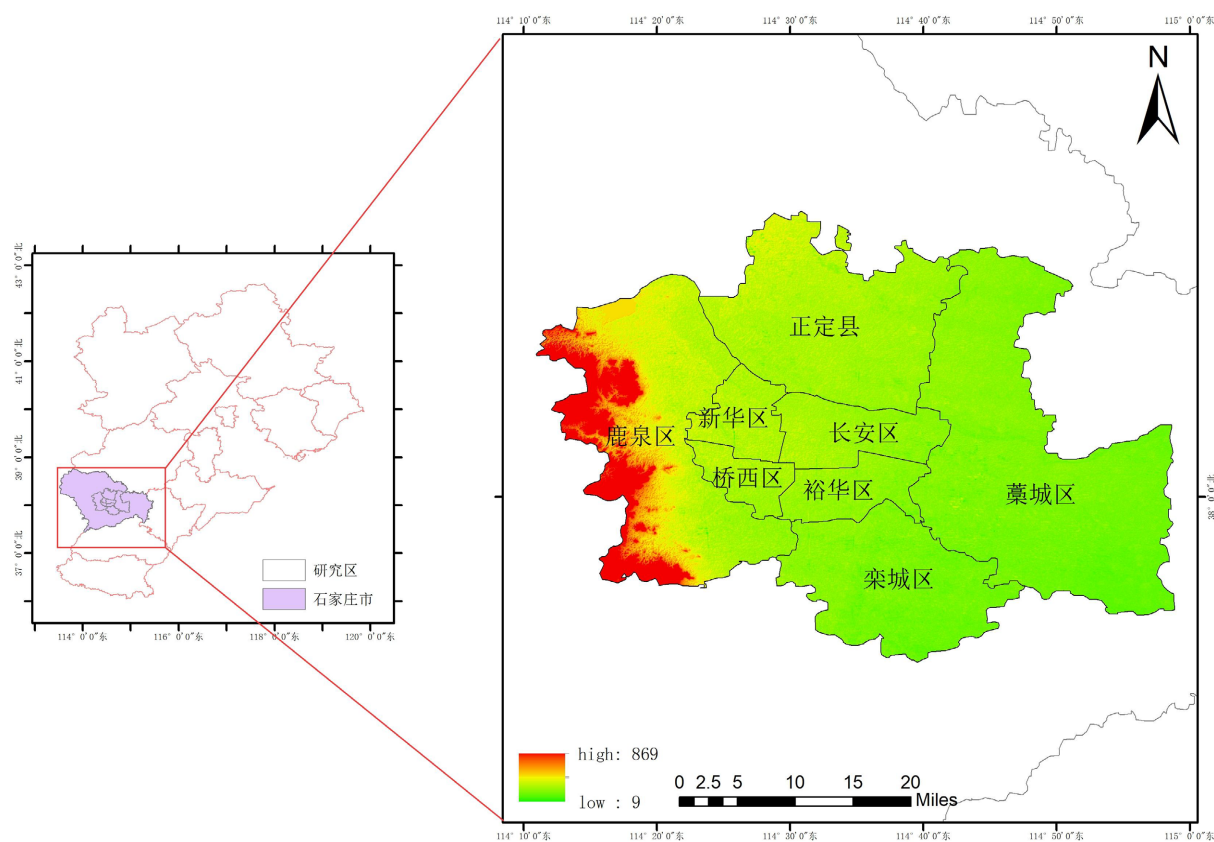
2. 材料和方法

2.1. 研究区概况

本研究选取河北省省会石家庄市作为研究案例, 见图 1。石家庄地处太行山地与华北平原过渡地带, 市域地势西高东低, 地形格局深刻调控城市热环境空间分布规律; 同时该市城镇化进程增速显著, 研究结论具备区域对比与外延参考意义。以石家庄为研究区可兼顾样本代表性与实证可操作性。

2.2. 数据来源

本研究的主要数据源包括: 1) GoogleEarthEngine (GEE)平台的 Landsat 系列图像: 本研究从 GEE 平台获取了 Landsat 系列卫星影像数据。为了避免云层等大气条件的干扰, 研究选择晴朗无云、静风或微风的影像以保证数据精度。如表 1 所示, 为了减少时间跨度对结果的影响, 研究尽量选择相近的日期最终筛选出了 5 幅影像这些影像在拍摄时天气晴朗、云量较少且风速低缓, 覆盖了研究区域的范围。2) 中国土地利用/覆被数据集(CLCD) [27]: 土地利用/覆被数据由武汉大学黄欣教授团队提供, 空间分辨率为 30 米。3) WorldPop 人口网格数据: 人口密度空间分布数据来自 WorldPop (<https://www.worldpop.org/>), 包括 2004 年、2007 年、2010 年、2015 年和 2020 年五期数据, 空间分辨率为 100 米。该数据基于土地利用、路网等卫星遥感数据, 采用随机森林方法生成, 因其高精度和空间分辨率, 已广泛应用于人口相关研究。4) 城市建成区数据使用孙洁的[28]中国城市 2020 年建成区数据集, 由于该数据集每五年一期, 本研究使用 2005~2020 年的四期建成区数据集。



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 GS(2019)3333 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Location of the study area
图 1. 研究区位置

Table 1. Remote sensing statistical parameters
表 1. 遥感统计参数

数据	类型	成像日期	行/路径	分辨率	数量
Landsat5	TM	2004/8/30	124/33124/34	30	2
Landsat5	TM	2007/8/23	124/33124/34	30	2
Landsat5	TM	2010/8/15	124/33124/34	30	2
Landsat8	OLI	2015/8/13	124/33124/34	30	1
Landsat8	OLI	2020/8/26	124/33124/34	30	1

2.3. 研究方法

2.3.1. 分析框架

本文构建了“土地利用变化识别 - 热岛强度反演 - 人口热暴露测算 - 空间耦合分析”研究框架，见图 2。以 2004~2020 年 Landsat 影像、CLCD 土地利用数据为基础，用重分类与转移矩阵提取用地类型及变化轨迹，识别城市扩张主导用地与空间趋势；然后通过地表温度反演、城乡差异法计算热岛强度(SUHI)并分级，刻画热岛空间格局与演变特征；随后，叠加 SUHI 与 WorldPop 人口数据，计算热暴露指数并分级，揭示风险空间差异；最后通过 Moran’s I、重心迁移等方法，从结构、集聚、动态维度解析二者耦合关系，识别热点区域。

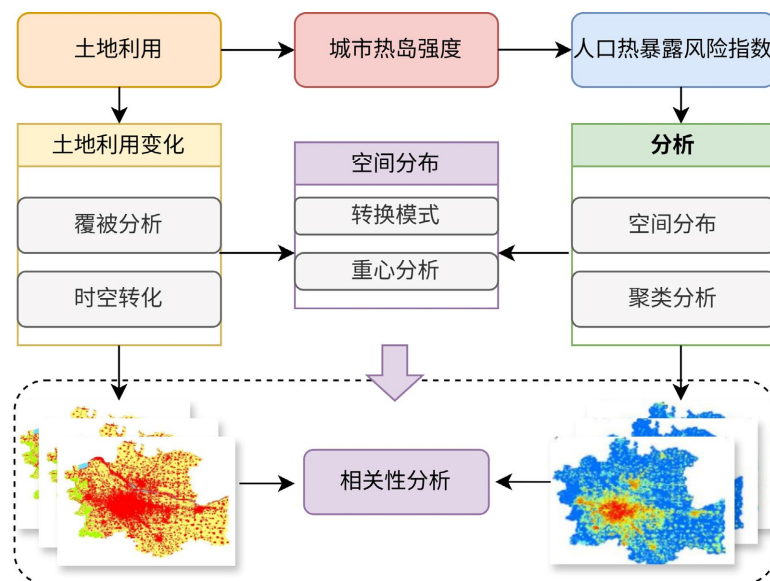


Figure 2. Research framework of “land use change identification—heat island intensity inversion—population heat exposure measurement—spatial coupling analysis”

图 2. “土地利用变化识别 - 热岛强度反演 - 人口热暴露测算 - 空间耦合分析” 研究框架

2.3.2. 土地利用转移矩阵

对于每一年的土地利用数据, 使用土地利用转移矩阵进行区域汇总, 以获取交叉转换后的数据。通过对面积变化分析, 更清晰地展示各种土地利用类型之间的转移量以及概率[29]-[31]。公式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \vdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S 为土地利用面积, 1 为研究初期土地利用类型, 2 为研究末期的土地利用类型, S_{12} 为研究期内第 1 类向第 2 类转化的面积, n 为土地利用类型数。

2.3.3. 热岛强度指数

城市地表热岛强度指数(I_{SUHI})被广泛定义为城市和农村地区之间的 LST 差值[32]。公式为:

$$I_{SUHI} = T_i - Tr \quad (2)$$

式中: T_i 为每个栅格的 LST, Tr 为农村地区的平均 LST。根据 LUCC 分类系统, 农村地区被定义为除绿地(包括林地、草地和灌木)、水体与城镇建设用地以外的耕地及农村居民点。该定义方法也是目前较为常用的计算 SUHI 强度的方法[33]。

2.3.4. 热岛强度分级

采用平均标准偏差法对 UHI 区域进行分级:

$$I_i = I_{mean} \pm n \times std \quad (3)$$

式中: I_i 为标准化后的栅格 i 的强度级别, I_{mean} 为 UHI 区域的 SUHI 强度的平均值, std 为 UHI 区域的标准差, n 为标准差倍数。具体分级如下表 2 所示:

Table 2. Heat island classification intensity**表 2.** 热岛分级强度

强度分级	分级标准
低	$I_i < I_{mean} - 1std$
次低	$I_{mean} - 1std \leq I_i < I_{mean} - 0.5std$
中等	$I_{mean} - 0.5std \leq I_i < I_{mean} + 0.5std$
次高	$I_{mean} + 0.5std \leq I_i < I_{mean} + 1std$
高	$I_i > I_{mean} + 1std$

2.3.5. 人口热暴露强度

本文基于不同时期的人口数据和 SUHI 计算人口热暴露强度, 研究区域内人口热暴露强度的空间分布特征。为了避免数据存在极值, 影响实验分析结果的可比性, 研究对人口数据进行了对数处理。计算公式如下:

$$H = \log_{10}(P_i) \times S_i \quad (4)$$

式中: H 为热暴露强度; P_i 为像元 i 内的人口数量; S_i 为像元 i 的地表城市热岛强度值。

为了方便研究对比不同时期的人口热暴露差异, 归一化之后采用自然断点法将人口热暴露强度分为五个级别; 为避免结果中出现负数和零值, 本研究采用的标准化公式如下:

$$X' = 0.1 + \frac{X - MIN}{MAX - MIN} \times (0.9 - 0.1) \quad (5)$$

式中: X' 为标准化值, X 为原始值, MAX 和 MIN 分别为原始值的最大和最小值。

为了方便研究对比不同时间的人口热暴露差异, 将归一化的相对人口热暴露强度分为 5 级依次为: 无风险[0, 0.25]、低风险(0.25, 0.3]、中风险(0.3, 0.35]、高风险(0.35, 0.4]、极高风险(0.4, 1]。

2.3.6. 空间自相关分析

本研究基于 Moran's I 探讨了土地利用类型和人口热暴露强度空间分布的聚集特征, 可以有效检测地理实体的空间自相关。计算公式如下:

$$\text{Moran's I} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

式中: n 为样本数, w_{ij} 为空间权重矩阵, X_i 表示每个周期的暴露指数和 $PLAND$ 值。

3. 结果分析

3.1. 土地利用转变特征

在本研究将土地利用数据重分类为耕地、植被、水体、建设用地及未利用地五类, 依托 ArcGIS 平台统计分析 2004~2020 年五期土地利用的空间分布、面积占比及结构转移特征, 见图 3、图 4。结果表明, 研究期内石家庄市土地利用结构变化显著, 核心表现为建设用地持续扩张、耕地大幅缩减。其中, 建设用地占比由 30.01% 增至 39.82%, 耕地占比由 65.48% 降至 55.73%, 城市扩张主要以占用耕地为代价, 各阶段耕地转建设用地比例均接近 2%, 仅 2015~2020 年扩张速度略有放缓。此外, 植被用地占比小幅波动下降, 水体面积占比有所提升, 体现城市化进程中生态空间保护取得初步成效。

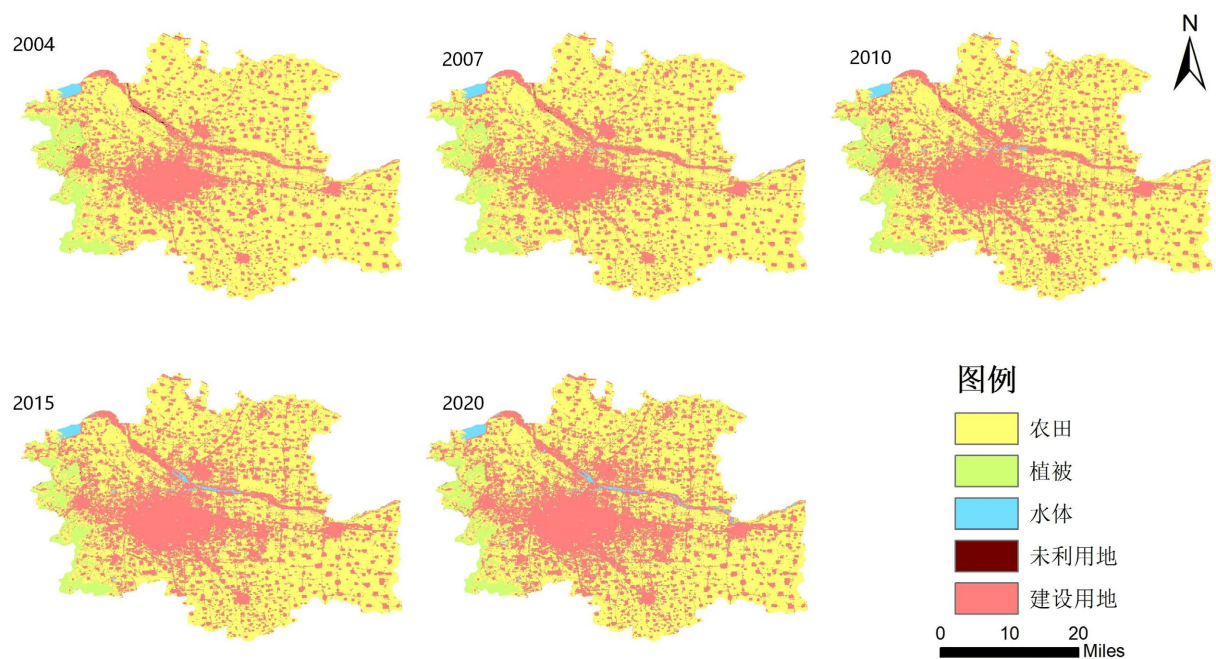


Figure 3. Land use change map from 2004 to 2020
图 3. 2004~2020 年土地利用变化图

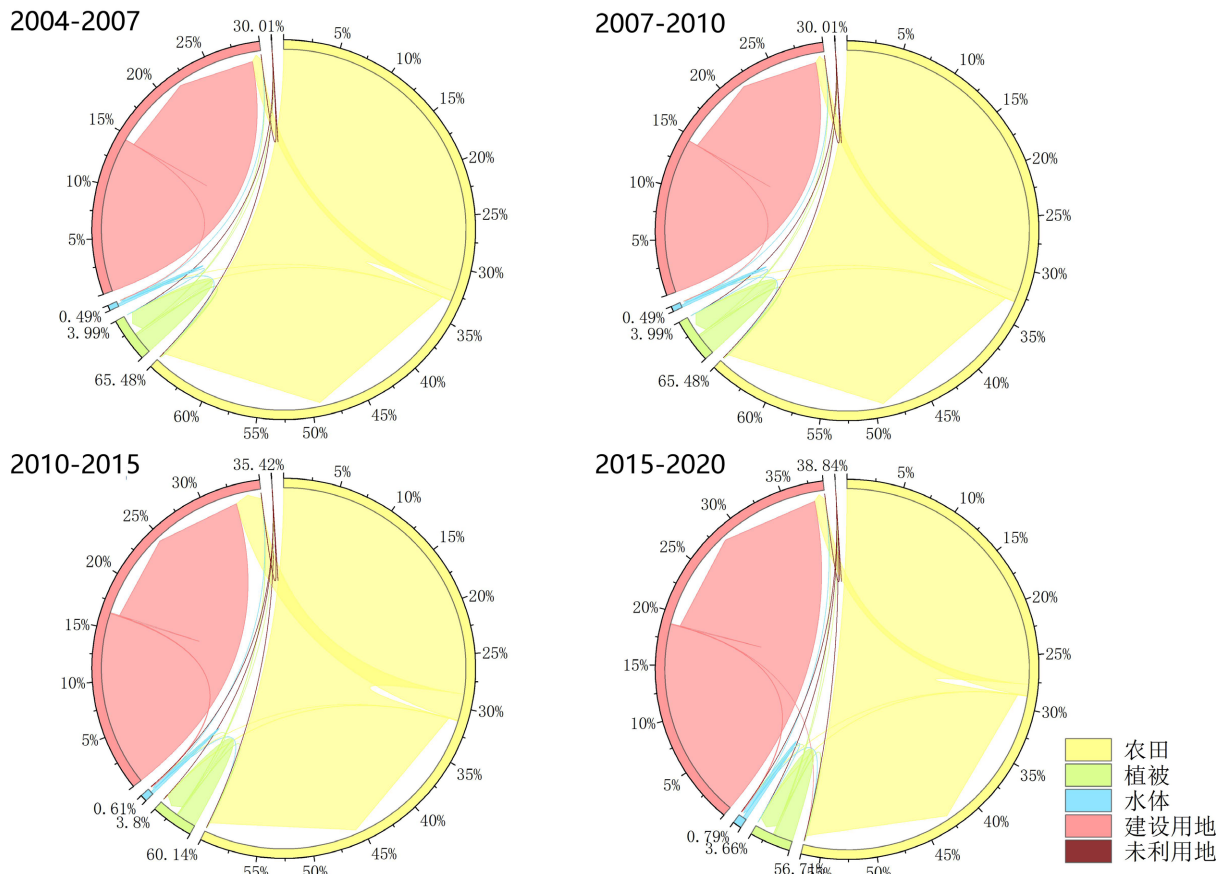


Figure 4. Chord diagram of land use transfer from 2004 to 2020
图 4. 2004~2020 年土地利用转移弦图

3.2. 城市热岛强度时空演变

本研究将高温区、次高温区归为热岛区，中温区划为常温区，低温区、次低温区划分为冷岛区，依据该分级标准生成 2004、2007、2010、2015、2020 年五期地表热力等级空间分布图，见图 5。结果表明，石家庄市地表城市热岛强度(SUHI)存在明显的时空分异与阶段性演化特征，整体表现为“持续增强－增幅回落－平稳变化”的演化规律。高强度热岛空间不断向城郊外延扩张，在城市绿地营建与生态修复的管控作用下，中、低级热岛面积有所缩减，热环境空间格局演变与区域城镇化进程高度耦合。

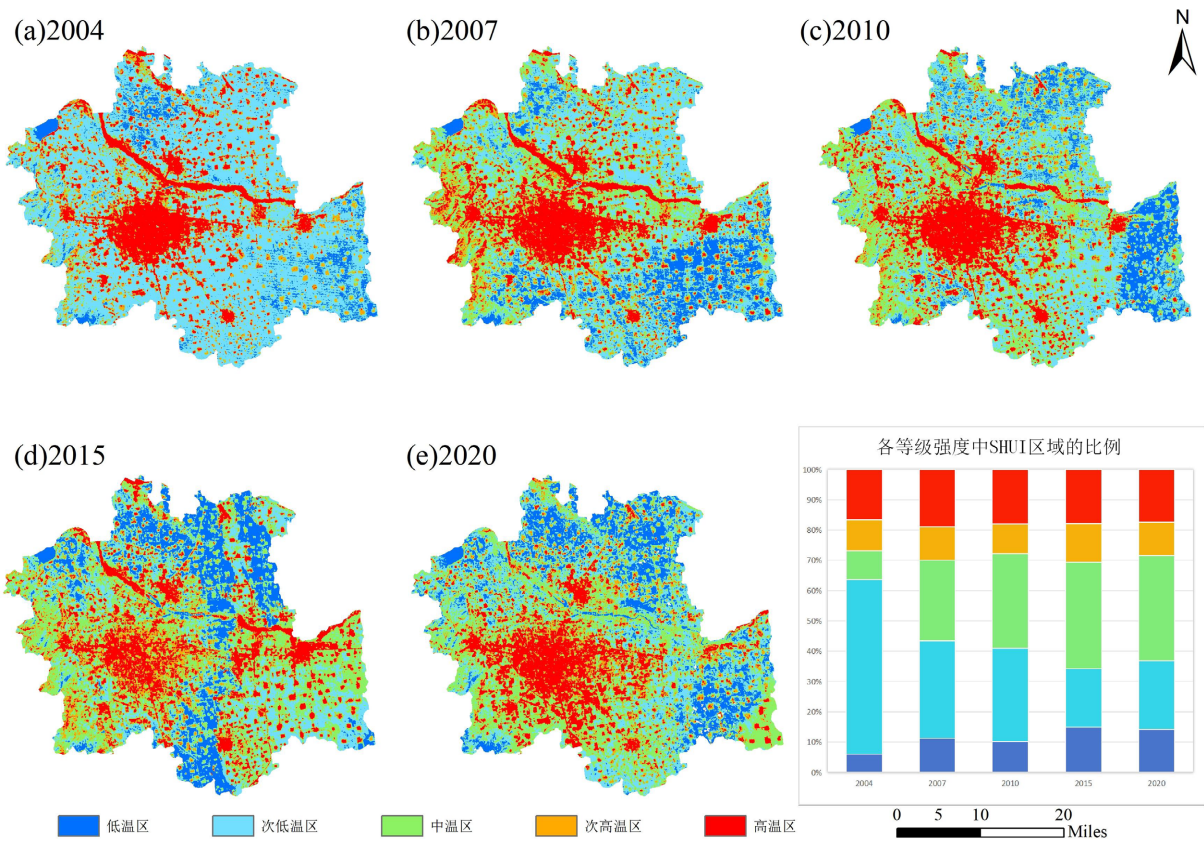


Figure 5. Intensity change of urban heat island in Shijiazhuang
图 5. 石家庄市城市热岛强度变化

3.3. 人口热暴露风险时空演变

叠加 SUHI 与 WorldPop 人口数据，计算热暴露指数并分级，石家庄人口热暴露风险 2004~2020 年区域热暴露总体空间格局基本稳固，但空间扩张与风险等级更迭特征显著，见图 6；高热暴露区集聚于主城及各镇区中心，呈组团式空间布局。

3.4. 土地利用类型和人口热暴露的重心迁移特征分析

基于 ArcGIS 对 2004~2020 年石家庄市土地利用类型及人口热暴露高值区开展重心与标准差椭圆分析，结果显示不同要素的轨迹与石家庄阶段性城市空间规划及拓展战略呈现出高度的空间耦合，见图 7。建设用地重心始终位于长安区并呈现出稳步向东偏移的态势，这一特征高度契合了该时期石家庄市“跨越铁路、重点向东拓展”的城市总体规划，以及高新区、藁城良村开发区等东部高新技术产业组团的部署。伴随着工业厂房与城镇住宅等不透水表面的东向积聚，高密度人口随之机械迁入与集聚，导致人口

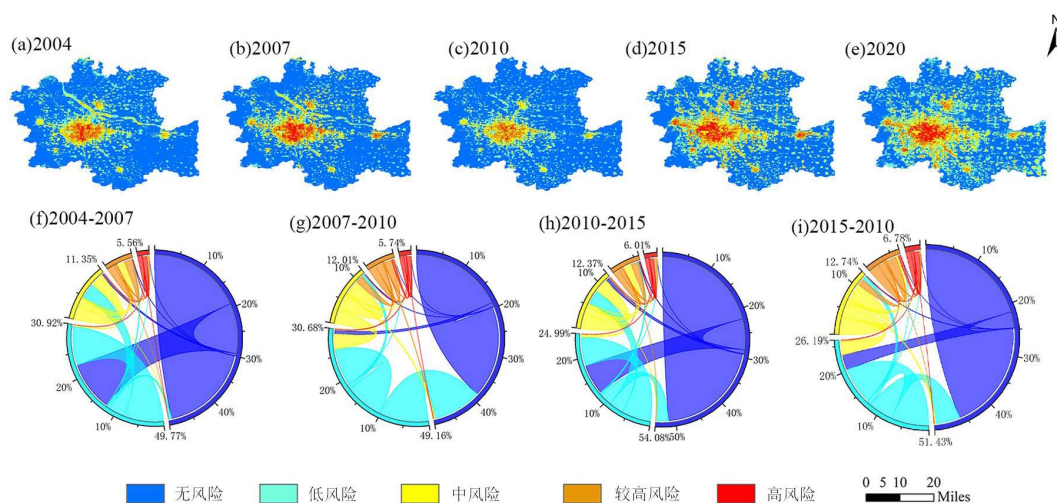


Figure 6. Changes of population heat exposure risk index in Shijiazhuang
图 6. 石家庄市人口热暴露风险指数变化

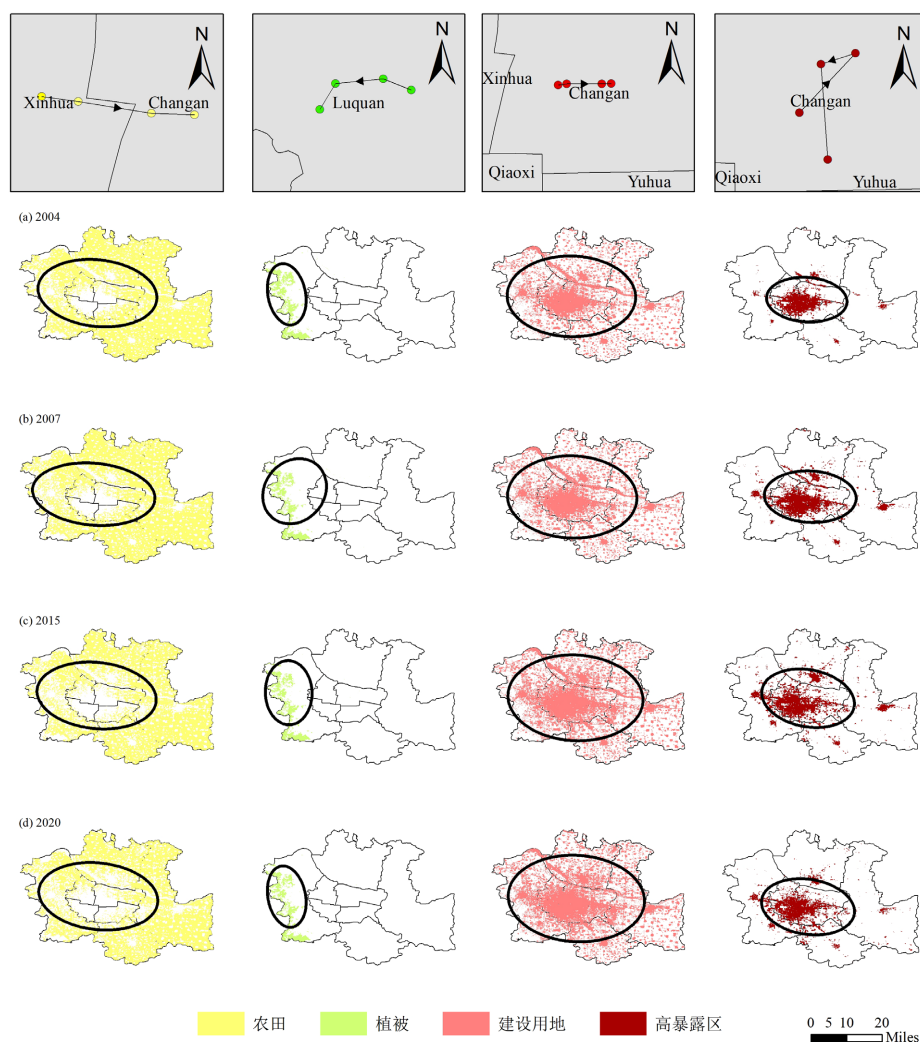


Figure 7. Evolution of population heat exposure and land use types in focus
图 7. 人口热暴露和土地利用类型的重心演变

热暴露高值区的重心同样锁定于长安区, 且其空间演进的方向和速率与建设用地重心表现出高度的同向性。同时, 东部平原地区(如藁城、晋州等)作为国家级传统农业产区, 随着高标准农田建设与“基本农田保护红线”的落实, 促使耕地系统重心持续向东部退缩。植被重心则表现出极强的空间稳定性, 稳定位于鹿泉区西部的太行山脉边缘。该区域受地形刚性约束、人类活动干扰弱且自然植被保存完好, 充分体现了规划中“太行山生态防护带”对生态空间的刚性保障效应。标准差椭圆分析则进一步从几何形态上明晰了各要素的空间发散与扩展规律。建设用地与人口热暴露高值区的标准差椭圆长轴均表现出显著的东西走向, 这与石家庄市依赖中山路、裕华路等核心交通干线形成的城市形态密不可分。人口热暴露高值区椭圆在空间轮廓、长轴取向及偏心率上, 均与建设用地椭圆表现出很高的重合度。城市居民所面临的面状热暴露风险并非盲目蔓延, 而是沿城市空间规划的东西向主轴线呈带状向外延伸。

3.5. 相关性分析与空间聚类分析

3.5.1. 相关性分析

本研究通过渔网工具将研究区分为 2794 个斑块, 并对不同地类占比和平均人口热暴露指数进行研究, 见图 8。发现随着建设用地不透水占比值的增加, 人口热暴露风险呈明显的增加趋势。在建设用地占比样本处于 0%~60% 的值区间内, 数据呈现高度聚集状态, 这表明在此区间内, 建设用地占比的变化对人口热暴露风险的影响尤为显著。

从 2004 年至 2020 年, 建设用地占比与人口热暴露指数的 Pearson 相关系数接近 1, 实际相关系数在 0.8 左右, 其中 2015 年的相关系数最高为 0.8512, 反映出两者之间存在显著的正相关关系。人口热暴露

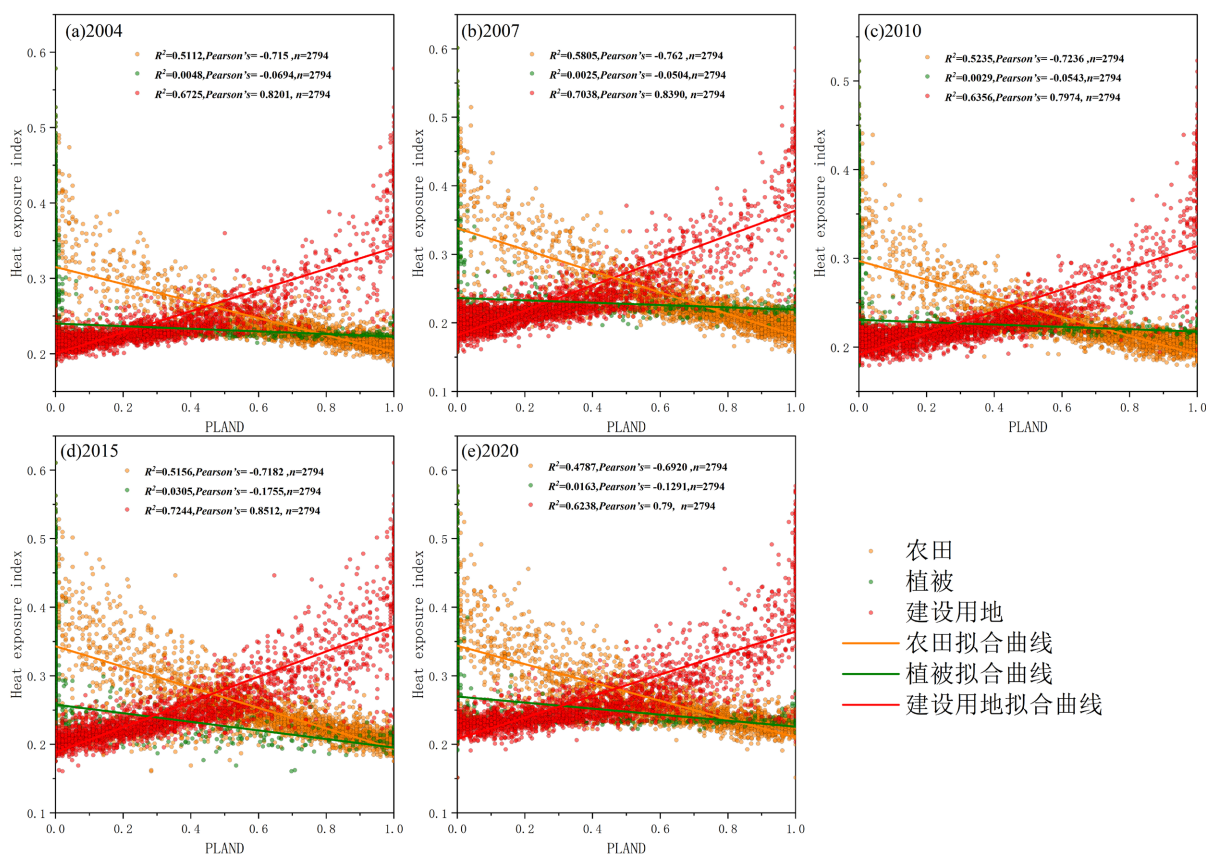


Figure 8. Regression analysis of different land use types and population heat exposure index
图 8. 不同土地利用类型和人口热暴露指数回归分析

指数与耕地和植被占比呈现负相关关系。由于研究区植被集中的地区面积较小, 而且人迹罕至, 植被占比与人口热暴露指数的相关性相对不明显, 而耕地占比和人口热暴露指数呈现明显的负相关关系, 相关系数在-0.7左右, 在2007年最低为-0.762, 这是由于耕地相对开阔的空间布局也避免了热量的过度聚集。此外, 耕地的灌溉活动也有助于降低周边温度, 减少人口热暴露风险。

3.5.2. 聚类分析

使用 GIS 分析研究区域中的人口热暴露风险自相关情况, 发现研究期间的 p 值均为零, 通过了 95% 置信度检验。每个年份空间中的 Z 值很高, 表明空间自相关性很强。每年的莫兰指数值都大于 0, 见表 3。表明人口热暴露风险存在明显的空间正相关。

Table 3. Moran's index of population heat exposure risk
表 3. 人口热暴露风险的莫兰指数

年	Moran's I	Expected	Z	P
2004	0.878458	-0.000089	93.692042	0
2007	0.869609	-0.000089	92.734024	0
2010	0.857314	-0.000089	91.433805	0
2015	0.856408	-0.000089	91.315326	0
2020	0.865572	-0.000089	92.300052	0

基于样本单元平均值对研究区开展聚类分析, 将石家庄市划分为高高(HH)、高低(HL)、低高(LH)、低低(LL)及不显著区五类空间类型, 见图 9。结果表明, LL 区域集中于西北部与东南部, 以耕地和生态空间为主, 为城市热环境提供重要缓冲; 不显著区广泛分布于生产空间占优区域, 热暴露水平相对平稳; HH 区域则聚焦市中心居住空间及周边裸地带, 呈“核心团块”分布, 且 2004~2020 年面积持续增长, 高暴露集聚趋势不断强化。

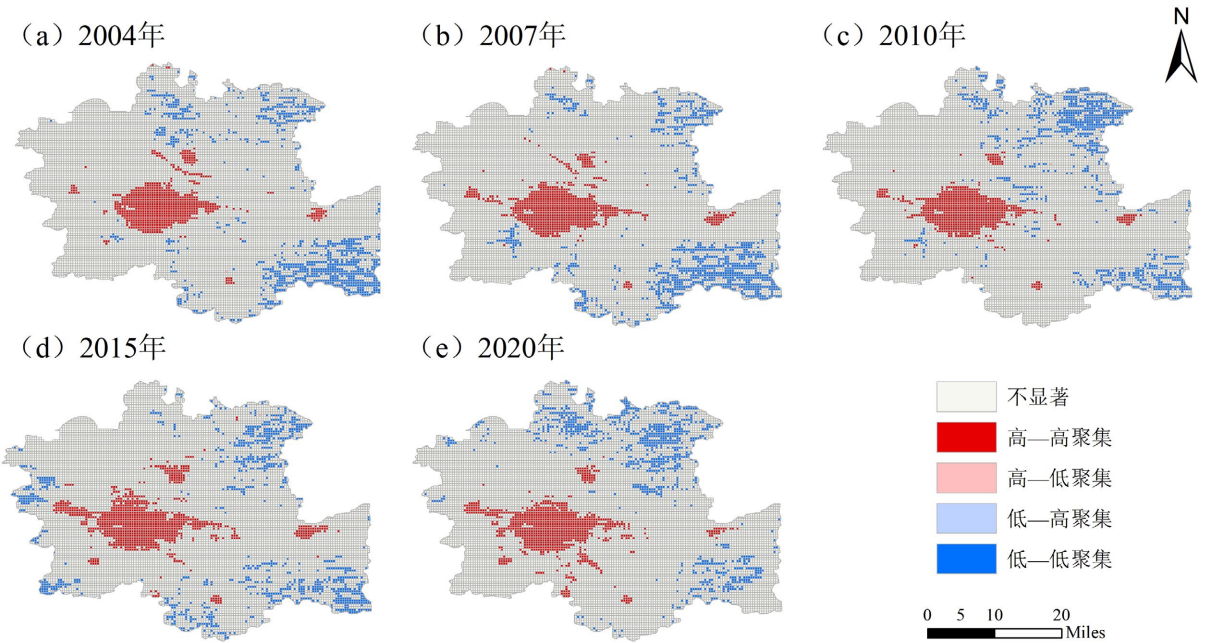


Figure 9. Cluster analysis of population heat exposure risk
图 9. 人口热暴露风险的聚类分析

4. 讨论

研究通过解析“土地利用结构-城市热岛-人口热暴露”的完整作用机制,填补了现有研究中“土地利用变化与人口热暴露风险直接关联机制”的空白,明确了不同土地利用类型对人口热暴露风险的差异化作用,为“基于土地利用调控热暴露风险”的理论框架提供实证支撑。但是研究也存在一些局限。其一,研究仅选取8月夏季数据,该时段多云天气较多,既影响地表温度反演结果的准确性与可靠性,又减少可用图像数量,导致温度变化信息无法连续采集;其二,研究所用城乡范围识别所用建成区数据集,在时间覆盖范围及县级城镇建设用地识别上效果欠佳;其三,研究仅探讨植被、耕地、建设用地三类用地对人口热暴露环境的影响,未纳入更多土地利用类型。未来的研究可以利用 Sentinel-2 等高时空分辨率数据结合云检测与恢复算法,提升遥感数据质量;结合地面观测与模型模拟,提高地表温度反演精度以捕捉小尺度温度变化;城乡范围识别可采用 GHS 住区模型网格数据、土地覆盖类别百分比、不透水面划分或局地气候分区等方法,获取更高精度的人口热暴露分布图。

5. 结论与建议

本研究围绕城市扩张背景下“土地利用变化如何驱动城市热岛效应及其对人口热暴露的影响”这一问题,构建了多源数据融合与空间分析的综合框架,系统揭示了土地利用格局演变与城市热环境风险之间的耦合机制。主要结论如下:

1) 2004~2020年,石家庄市建设用地面积占比从30.01%升至39.82%,与之同步SUHI高值区由中心城区向外辐射扩展,人口热暴露边界随建成区扩张同步外移。土地开发过程中,地表反照率降低、热容特性改变,最终在空间上呈现建设用地开发、热岛范围扩张、人口热暴露边界外溢的演进特征。

2) 土地利用与人口热暴露格局的时空耦合具有方向性与异质性。重心迁移分析结果显示,建设用地与人口热暴露高值区重心均稳定于长安区且同步东移,呈现环状扩张、放射延伸的空间特征。研究通过定量的相关性分析,确认了建设用地与人口热暴露风险的显著正相关,验证了城市扩张对热风险加剧的驱动效应;同时耕地和植被的负相关关系进一步强调了生态系统的缓释作用。这丰富了土地利用与热环境耦合理论,也为城市规划提供了科学依据,明确了控制建设用地扩张和强化生态空间保护的必要性。

3) 空间自相关模型进一步表明,研究期内人口热暴露风险存在强烈的空间正相关,并在空间上固化为“城镇HH聚集、耕地LL缓冲”的分异。随着城市化进程的持续推进,HH高暴露集聚区沿主要走廊向郊区与农村过渡区外溢的趋势仍在强化。综上所述,提出以下发展建议:① 鉴于长安区为建设用地与热暴露重心双向东移的交汇点,HH集聚最显著,风险沿东西主轴呈带状累积。规划必须优先布局城市通风廊道,严格控制中山路、裕华路及和平东路改造带两侧的建筑高度与密度,利用石德铁路沿线绿带构建西北东南走向的开敞通道。在裕华区高密度住宅区、新华区传统商业区推行“见缝插绿”,加密布局立体绿化,提升局部调温韧性。② 尽管西部山地构成了稳固的冷岛,但其降温效应与中东部核心区存在明显的空间脱节。未来应实重点依托滹沱河蓝绿生态带,严禁破坏水体与滩地植被,将其打造为引导西部冷空气向中心城区渗透的主动脉。配合民心河、石清路等南北向绿化带,构建“一横多纵”的蓝绿网格,疏导冷岛效益。③ 随着高暴露集聚区沿交通走廊向近郊外溢,西北与东南部的耕地及生态缓冲功能逐渐减少。城市规划必须将正定新华交界带、藁城西侧产业承接区等外溢前沿的敏感农田,严格划定为生态保护红线与绿色隔离带。限制连片无序硬化,强化农业灌溉水体留存以发挥耕地蒸腾降温作用,防止高热风险蚕食LL缓冲带。

参考文献

- [1] Zhai, P.M., Zhou, B.Q., Chen, Y. and Yu, R. (2021) Several New Understandings in the Climate Change Science.

- Advances in Climate Change Research*, **17**, 629-635. <https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2021.201>
- [2] Wang, C., Li, Z., Chen, Y., Li, Y., Ouyang, L., Zhu, J., *et al.* (2024) Changes in Global Heatwave Risk and Its Drivers over One Century. *Earth's Future*, **12**, e2024EF004430. <https://doi.org/10.1029/2024ef004430>
 - [3] Marcotullio, P.J., Keßler, C. and Fekete, B.M. (2022) Global Urban Exposure Projections to Extreme Heatwaves. *Frontiers in Built Environment*, **8**, Article ID: 947496. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.947496>
 - [4] Liu, Y., Huang, X., Yang, Q. and Cao, Y. (2021) The Turning Point between Urban Vegetation and Artificial Surfaces for Their Competitive Effect on Land Surface Temperature. *Journal of Cleaner Production*, **292**, Article ID: 126034. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126034>
 - [5] Irfeey, A.M.M., Chau, H., Sumaiya, M.M.F., Wai, C.Y., Muttill, N. and Jamei, E. (2023) Sustainable Mitigation Strategies for Urban Heat Island Effects in Urban Areas. *Sustainability*, **15**, Article No. 10767. <https://doi.org/10.3390/su151410767>
 - [6] Zhou, J., Liu, J., Chu, Q., Wang, H., Shao, W., Luo, Z., *et al.* (2021) Mechanisms and Empirical Modeling of Evaporation from Hardened Surfaces in Urban Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article No. 1790. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041790>
 - [7] Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Bréon, F., *et al.* (2012) Surface Urban Heat Island across 419 Global Big Cities. *Environmental Science & Technology*, **46**, 696-703. <https://doi.org/10.1021/es2030438>
 - [8] Heaviside, C., Macintyre, H. and Vardoulakis, S. (2017) The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, **4**, 296-305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
 - [9] Xu, Y., Jia, R., Liu, J., Han, D., He, T., Xu, X., *et al.* (2024) The Population Exposure Risk of Urban Heat Island Effect: From the Perspective of Urban Spatial Expansion in China. *Building and Environment*, **258**, Article ID: 111565. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111565>
 - [10] Leal Filho, W., Echevarria Icaza, L., Neht, A., Klavins, M. and Morgan, E.A. (2018) Coping with the Impacts of Urban Heat Islands. A Literature Based Study on Understanding Urban Heat Vulnerability and the Need for Resilience in Cities in a Global Climate Change Context. *Journal of Cleaner Production*, **171**, 1140-1149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.086>
 - [11] Liu, D., Zhou, R., Ma, Q., He, T., Fang, X., Xiao, L., *et al.* (2024) Spatio-Temporal Patterns and Population Exposure Risks of Urban Heat Island in Megacity Shanghai, China. *Sustainable Cities and Society*, **108**, Article ID: 105500. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105500>
 - [12] Zhao, H., Fang, Y. and Xu, X. (2024) Quantifying Morphology Evolutions of Urban Heat Islands and Assessing Their Heat Exposure in a Metropolis. *Sustainable Cities and Society*, **102**, Article ID: 105244. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105244>
 - [13] Jia, R., Liu, J., He, T., Han, D., Xu, X., Liu, L., *et al.* (2024) Population Heat Exposure Risk from the Perspective of Urban Heat Island Spatial Expansion in China during 2005-2020. *Urban Climate*, **56**, Article ID: 101987. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101987>
 - [14] Elmarakby, E. and Elkadi, H. (2024) Prioritising Urban Heat Island Mitigation Interventions: Mapping a Heat Risk Index. *Science of the Total Environment*, **948**, Article ID: 174927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174927>
 - [15] Lemonsu, A., Viguié, V., Daniel, M. and Masson, V. (2015) Vulnerability to Heat Waves: Impact of Urban Expansion Scenarios on Urban Heat Island and Heat Stress in Paris (France). *Urban Climate*, **14**, 586-605. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.007>
 - [16] Liang, X., Guo, S., Huang, C., Wang, B., Xiao, Y., He, J., *et al.* (2024) Modeling the Subpixel Land-Use Dynamics and Its Influence on Urban Heat Islands: Impacts of Factors and Scale, and Population Exposure Risk. *Sustainable Cities and Society*, **107**, Article ID: 105417. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105417>
 - [17] Ming, Y., Liu, Y., Liu, X. and Tian, Z. (2024) Demographic Disparity in Diurnal Surface Urban Heat Island Exposure across Local Climate Zones: A Case Study of Chongqing, China. *Science of the Total Environment*, **923**, Article ID: 171203. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171203>
 - [18] Chen, B., Xie, M., Feng, Q., Li, Z., Chu, L. and Liu, Q. (2021) Heat Risk of Residents in Different Types of Communities from Urban Heat-Exposed Areas. *Science of the Total Environment*, **768**, Article ID: 145052. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145052>
 - [19] Gunawardena, K.R., Wells, M.J. and Kershaw, T. (2017) Utilising Green and Bluespace to Mitigate Urban Heat Island Intensity. *Science of the Total Environment*, **584**, 1040-1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
 - [20] Li, J., Guo, P., Sun, Y., Liu, Z., Zhang, X. and Pei, X. (2022) Population Exposure Changes to One Heat Wave and the Influencing Factors Using Mobile Phone Data—A Case Study of Zhuhai City, China. *Sustainability*, **14**, Article No. 997. <https://doi.org/10.3390/su14020997>
 - [21] Macharia, C.W. and Kiage, L. (2025) Examining the Nexus of Social Vulnerability, Land Cover Dynamics, and Heat

- Exposure in Reno, Nevada, USA. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **37**, Article ID: 101400. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101400>
- [22] Chauhan, S., Walsh, C.L., Eckersley, P., Mohareb, E. and Heidrich, O. (2025) Urban Heat Stress, Air Quality and Climate Change Adaptation Strategies in UK Cities. *Frontiers of Engineering Management*, **12**, 255-271. <https://doi.org/10.1007/s42524-025-4029-y>
- [23] Zhang, T., Sun, Y., Wang, R., Yang, Y., Yin, L., Li, L., *et al.* (2024) A New Framework for Assessing and Dealing with Heat Risk from an Urban Resilience Perspective. *Journal of Cleaner Production*, **479**, Article ID: 144008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144008>
- [24] Kingsborough, A., Jenkins, K. and Hall, J.W. (2017) Development and Appraisal of Long-Term Adaptation Pathways for Managing Heat-Risk in London. *Climate Risk Management*, **16**, 73-92. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.01.001>
- [25] Silva, J.S., Silva, R.M.d. and Santos, C.A.G. (2018) Spatiotemporal Impact of Land Use/Land Cover Changes on Urban Heat Islands: A Case Study of Paço Do Lumiar, Brazil. *Building and Environment*, **136**, 279-292. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.041>
- [26] Rhee, J., Park, S. and Lu, Z. (2014) Relationship between Land Cover Patterns and Surface Temperature in Urban Areas. *GIScience & Remote Sensing*, **51**, 521-536. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.964455>
- [27] Yang, J. and Huang, X. (2021) The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, **13**, 3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>
- [28] 孙中昶, 孙洁, 郭华东, 等. 中国城市 2020 年建成区数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2022, 7(1): 184-198.
- [29] 吴宗洋, 蔡卓雅, 郭英, 等. 黄河流域多源遥感土地覆被数据精度评价与一致性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(6): 917-927.
- [30] Li, H., Peng, J., Liu, Y.X. and Hu, Y.N. (2017) Urbanization Impact on Landscape Patterns in Beijing City, China: A Spatial Heterogeneity Perspective. *Ecological Indicators*, **82**, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.032>
- [31] Dewi, D.I.K., Ratnasari, R.A. and Pangi (2016) Land Use Change in Sub District Mranggen Because of Residential Development. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, **227**, 210-215. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.06.064>
- [32] Li, B., Zhang, B., Yin, L. and Chang, J. (2023) Assessing Heat Risk for Residents of Complex Urban Areas from an Accessibility-Based Perspective. *Sustainable Cities and Society*, **88**, Article ID: 104278. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104278>
- [33] Hu, L., Wilhelmi, O.V. and Uejio, C. (2019) Assessment of Heat Exposure in Cities: Combining the Dynamics of Temperature and Population. *Science of the Total Environment*, **655**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.028>