

基于 SDGSAT-1 的城市热风险评估研究

周猛^{1,2,3}

1. 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 中国·北京 100049

2. 可持续发展大数据国际研究中心, 中国·北京 100049

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 中国·北京 100049

摘要: 论文运用 SDGSAT-1 遥感影像, 构建城市热风险评估体系, 包含热危害性、热暴露性、热脆弱性三指标, 借助地表温度、夜间灯光等多源数据对北京开展实证分析, 揭示城市热风险空间分布呈现“东南热风险偏高、西北热风险偏低”特征。结合局地气候区类型分析, 发现建筑密集、绿地覆盖率低区域热风险大, 生态涵养区为低风险区。论文提出差异化热风险治理策略, 为城市热环境管理提供科学依据与数据支撑。

关键词: 城市热风险; SDGSAT-1; 局地气候区 (LCZ); 热危害性; 空间分布

Research on Urban Heat Risk Assessment Based on SDGSAT-1

Meng Zhou^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Digital Earth, Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

2. Sustainable Development Big Data International Research Center, Beijing, 100049, China

3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract: This paper uses SDGSAT-1 remote sensing imagery to construct an urban heat risk assessment system, which includes three indicators: thermal hazard, heat exposure, and thermal vulnerability. It conducts an empirical analysis of Beijing using multi-source data such as land surface temperature and nighttime lights, revealing that the spatial distribution of urban heat risk shows a characteristic of “higher heat risk in the southeast and lower heat risk in the northwest”. Combining the analysis of local climatic zone types, it is found that areas with dense buildings and low green cover have high heat risk, while ecological conservation areas are low-risk zones. This paper proposes differentiated heat risk management strategies, providing scientific basis and data support for urban heat environment management.

Keywords: urban heat risk; SDGSAT-1; local climate zone (LCZ); heat hazard; spatial distribution

0 前言

伴随全球变暖趋势和城市化进程提速, 极端热浪事件频繁发生, 城市热岛效应愈加明显, 对生态系统和居民健康造成显著影响^[1], 热岛效应与热浪相互作用, 使城市热风险的空间差异进一步加剧, 城市热风险研究已从单一要素探讨转向多维综合评估^[2]。IPCC 第五次评估报告提出的“灾害胁迫—社会脆弱性—暴露”三位一体风险评估框架, 为构建城市热风险评估体系提供了理论支持, 论文利用多源数据, 构建了包含“热危害性—热暴露性—热脆弱性”三项准则层的评估体系, 并在北京市进行了实证分析, 结合局地气候区 (LCZ) 类型, 探讨了城市热风险的空间异质性, 目的是为城市热风险治理提供科学依据和参考。

1 城市热风险指标体系构建

本研究基于 IPCC 第五次评估报告提出的“灾害胁迫—暴露—脆弱性”框架, 构建了城市热风险评估指标体系, 涵盖热危害、热暴露性和热脆弱性三个层面, 旨在深入剖析城市热环境的风险源与影响机制。热危害性指标以地表温度

(LST) 为核心, 利用 SDGSAT-1 热红外遥感影像, 采用分裂窗算法进行 LST 反演, 结合大气校正、辐射定标和地表发射率估算, 获得 30 米分辨率的高精度 LST 数据, 显著提升了对热风险空间异质性的分辨能力^[3]。

以人口与建筑两个维度对热暴露性指标进行评估: 以融合夜间灯光、NDVI 和 DEM 数据构建的 EAHSI 指数表征人口暴露度, 建筑暴露依托住宅区 POI 数据实施核密度分析, 计算住宅区建筑密度指数, 全面呈现高温态势下城市承灾体的分布特性。

就热脆弱性指标而言, 筛选出 NDVI、5 岁以下及 65 岁以上人口占比、医疗点可达性和经济分布指数这五项因子, NDVI 反映绿地覆盖情况, 年龄结构指标反映高敏感人群的空间分布, 医疗可达性借助 OD 路径分析与插值法进行计算, 采用五类商业 POI 核密度叠加估算经济分布^[4]。

2 指标评估计算方法与标准化处理

为实现城市热风险的定量评估与空间表达, 本研究根据“热危害性—热暴露性—热脆弱性”指标体系开展工作,

完成了指标核算、标准化处理、权重设置与叠加分析,使不同量纲的数据能够在统一尺度下融合与比较。

在热危害性的评估工作里,采用分裂窗算法对 SDGSAT-1 热红外遥感影像进行 LST 反演,结合 Modtran5.2.2 大气校正和辐射定标^[5],结合地表发射率估算,获得 30 米分辨率的高精度 LST 数据,显著提高了热环境空间识别的精度。EAHSI 指数和住宅建筑核密度指数纳入热暴露性评估,EAHSI 将夜间灯光、NDVI 和 DEM 数据融合,计算人口暴露水平;利用 POI 数据计算住宅核密度指数,通过 ArcGIS 核密度分析反映建筑密集度,二者共同衡量城市暴露特征。热脆弱性评估纳入五项因子进行评估:利用 NDVI 计算绿地覆盖率;利用 WorldPop 数据统计 5 岁以下和 65 岁以上人口的占比;通过 OD 路径分析和插值法计算医疗可达性;经济分布指数通过商业 POI 核密度叠加计算,反映城市经济活跃度和社会适应能力。

为实现各类指标的统一处理,本研究对所有因子开展极差标准化操作,针对值越大风险越高的正向指标和值越大风险越低的负向指标,分别采用不同标准化公式,使标准化后的指标值落入 0~1 的范围,方便后续的叠加综合分析,以下为具体的公式:

正向指标标准化:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

负向指标标准化:

$$X' = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}}$$

为避免主观判断和复杂数学模型带来的理解障碍,本研究采用等权累加法,将所有指标视为同等重要,赋予相同的权重^[6]。该方法简便易行,适用于城市管理中的快速决策,能直观反映各区域热风险的高低,尽管无法精确区分各指标权重,但在多因素评估中具有较强的适用性。研究将热危害性、热暴露性和热脆弱性三个准则层的标准化指标进行等权叠加,得到城市热风险综合指数,并将此结果划分为五个等级,为北京市热风险治理提供数据支持和理论指导。

3 北京市城市热风险评估结果分析

搭建起以“热危害性—热暴露性—热脆弱性”为核心内容的城市热风险指标体系,且在完成指标标准化以及权重赋值后,本研究以北京市这一案例展开,开展三大准则层风险因子的定量评估,最终叠加各项因子形成城市热风险综合指数,并对风险等级进行划分。

热危害性评估是依据 2024 年 8 月 30 日 SDGSAT-1 数据反演的地表温度 (LST) 来进行的,研究结果显示,北京市 LST 空间呈“东南高、西北低”分布,东城、西城、朝阳、丰台等中心城区成为高温高风险区,而在延庆、怀柔、密云等西北山地丘陵之处,由于林地覆盖面积大、城市化水平低,呈现较低的 LST,热危害状况相对轻微,呈现出热危害主要

受城市建设强度及土地利用结构影响 (见图 1)。

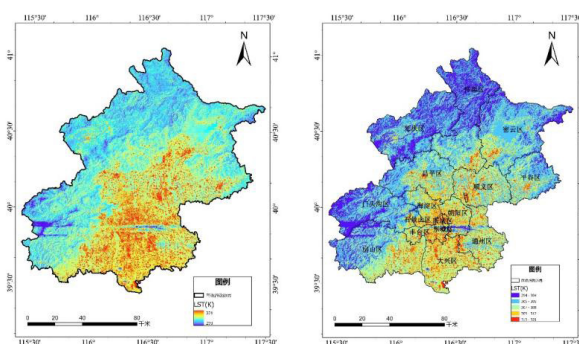


图 1 北京市 LST 空间分布和 LST 分区分级的空间分布

热暴露性评估将 EAHSI 指数和住宅建筑核密度指数整合,EAHSI 利用夜间灯光、NDVI 和 DEM 数据反映人口密集程度,利用住宅核密度指数评估建筑密集度。评估结果显示,北京市热暴露呈现“中心城区高、外围区域低”的分布特点,东城、西城表现出极高的暴露性,而房山、延庆等外围区域,由于人口密度较低且建设布局分散,表现出较低的暴露水平。高暴露现象主要集中在核心城区及其周边区域 (见图 2)。

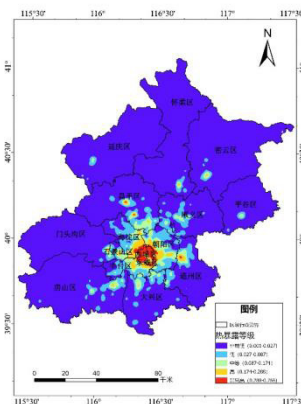


图 2 北京市分区分级的热暴露性空间分布

热脆弱性评估综合考量了 NDVI、老幼人口占比、医疗可及性以及经济分布指数等五项要素,门头沟、延庆、密云这类生态涵养区的 NDVI 值偏高,表现出良好的自然调节能力;然而中心城区绿地覆盖的比例较低,NDVI 值大多维持在较低位。东城、西城等老龄化严重区域有大量 65 岁以上人口聚集,5 岁以下人口分布在昌平、通州这类新兴居住区,医疗可达性于中心城区呈现明显优势,郊区的医疗资源相对匮乏,经济的分布同样高度聚焦于核心区域,空间上热脆弱性的差异十分显著,未呈现明显集聚特征,呈现出多因素聚合的复杂情形 (见图 3)。

三个准则层的评估结果经等权相加后叠加,生成城市热风险综合指数,而后分成了五个等级,北京市整体热风险形成“东南热风险偏高、西北热风险偏低”格局,高风险区

有中心城区（如朝阳、东城、海淀、丰台）以及部分发展强度较高的次中心区域。这些地区普遍呈现出高温、人口密度大、老年人口集中、绿地不足以及医疗资源紧张等状况，延庆、门头沟、怀柔、密云等区域其生态资源丰富、人口相对少，热风险水平较低，像通州、昌平、大兴这类外围区域，呈现出冷热风险交错的过渡格局。

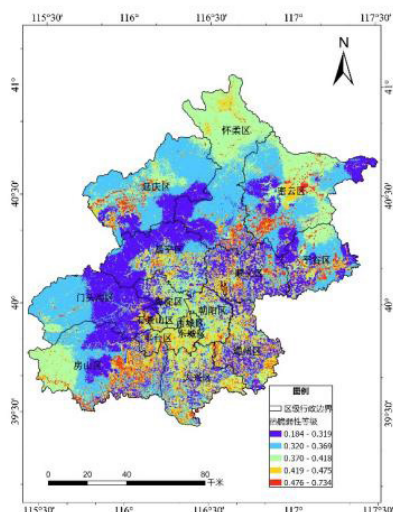


图 3 北京市分区分级的热脆弱性空间分布

4 基于 LCZ 的城市热风险差异探究

完成针对北京市城市热风险空间分布的综合评估后，本研究后续引入局地气候区（Local Climate Zone, LCZ）类别划分体系，探寻不同类型背景下城市热风险组成要素的空间异质性特征。LCZ 类型学把城市、自然地表分成 17 类典型组合，囊括不同样式的建筑形态、土地利用程度与自然覆盖特性，可在地表结构与热环境反应机制之间发挥连接作用，相比之下，传统以行政区划为单位实施的空间划分方式较难体现城市特征，LCZ 更关注城市物理结构及其生态环境属性，可更细致地描绘城市内部热风险的空间差异格局^[7]。

本研究采用 Matthias Demuzere 等研究者 2023 年发布的全球 LCZ 遥感制图成果，截取北京市对应区域的 LCZ 分布图，显示的结果是，北京市 LCZ 类型总体的空间格局呈现为建筑型往东南集中，自然型往西北集中。约 33.99% 的全市总面积为建筑类 LCZ（涵盖 LCZ 1-10）面积，多数分布在东城区、西城区、朝阳区、丰台区等中心城区及其周边地段；约 66.01% 为自然类 LCZ，较多分布于西北部延庆、门头沟、怀柔、密云等生态涵养区域（见图 4）。

叠加分析 LCZ 图层与城市热风险三大组成部分发现，不同 LCZ 类型热风险存在显著空间分异。建筑类 LCZ（1~5 类）因人口密集、不透水面占比高，热量难散，热危害、暴露性和脆弱性均高，属高风险区；自然类 LCZ A 植被优、干扰少，热环境调节能力强，是“低风险缓冲区”；LCZ E

和 F 缺植被、调温弱，昼夜温差大，热危害性和脆弱性高，为热环境敏感区。相比行政区划分，LCZ 能更精准反映城市热环境异质性，助力识别热风险区域与成因，为治理和城市优化提供依据。

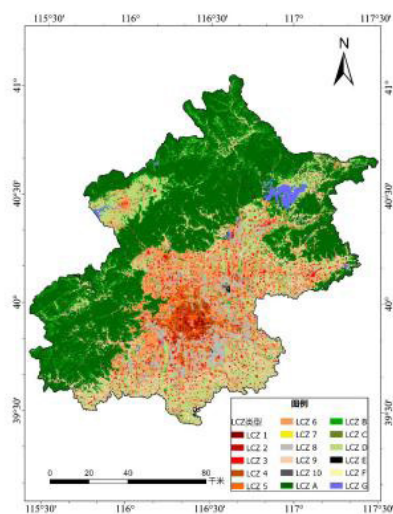


图 4 北京市 LCZ 空间分布

5 不同 LCZ 对城市热风险的贡献分析

为进一步明晰不同城市空间类型对城市热风险的影响程度，本研究依托城市热风险空间评估的结果开展，采用空间统计分析手段，定量刻画了局地气候区（LCZ）类型和城市热风险两者间的关系，具体采用局部 Moran's I 指数用于识别城市中高热风险的聚集区域，依此构建城市热风险贡献指数（Heat-risk Contribution Index），以测定不同 LCZ 类型对城市高热风险区域的影响大小。

HCI 的具体计算公式如下：

$$HCI = \frac{S_{ki}/S_i}{S_k/S}$$

研究显示，建筑类 LCZ 中，LCZ 1（紧凑型高层）、LCZ 2（紧凑型中层）和 LCZ 10（重工业区）HCI 值达 3.90，集中于北京市中心城区，因建筑密集、非透水地表占比高、散热慢，属高温高密度区，对城市热风险空间影响显著。而 LCZ 6（开放型低层）和 LCZ 9（稀疏建筑区）分布于城市边缘或低密度居住区，建筑疏散、绿地多，热调节能力较强，HCI 值较低，对高热风险影响有限。自然类 LCZ 中，仅 LCZ E（裸岩或硬质铺装）、LCZ F（裸土或沙地）的 HCI 值超 1，其余如 LCZ A（密集树木）等类型均低于平均水平，对城市热风险有明显缓冲抑制作用（见图 5）。

全面分析说明，北京市城市热高风险区主要汇聚在建筑密度高、土地开发强度大的 LCZ 类型里，自然型及低密度建筑型 LCZ 在降低城市热风险方面优势明显，未来针对城市空间优化与热风险治理过程中，要充分借鉴 LCZ 6、LCZ D 等低风险类型的空间特征，采用增加绿地覆盖率、减少建筑密度等途径，缓解城市热环境所面临的压力^[8]。

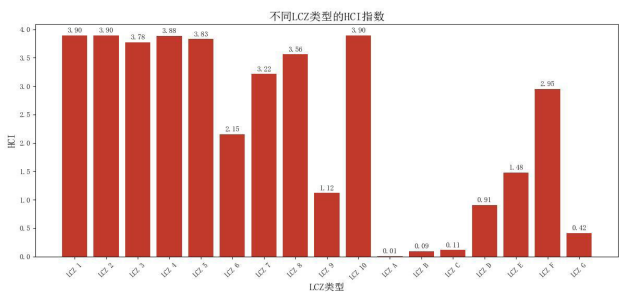


图 5 不同 LCZ 类型的 HCI 指数

6 风险治理建议与总结

依托城市热风险评估及空间异质性分析，本研究提出按 LCZ 类型单元开展的热风险治理策略^[9]，相比之下，LCZ 更可以体现出城市内部结构与功能的差异点，在风险识别及策略制定工作中更具科学性和针对性。

治理优先需把焦点放在对热风险具有显著正向贡献的 LCZ 类型，涵盖像 LCZ 1-5（紧凑型建筑区域）、LCZ 7、LCZ 8 和 LCZ 10 等高建筑密度、低绿地占比、高人口聚集的区域，是热危害、暴露现象及脆弱性高度叠加的高风险区域。

经进一步剖析可知，不同 LCZ 在主导风险因素存在差异：LCZ 1、LCZ 2、LCZ 4 属于热危害和暴露同时突出型，热危害和脆弱性共存的现象在 LCZ 3、LCZ 7、LCZ 8、LCZ 10 表现，热危害在 LCZ 5 里占主要成分，给出三类治理良策：

①热危害主导区域应当削减人为热源排放，优化城市通风模式。

②热暴露表现突出的区域应削减建设密度，优化人口疏散及高温避难方面的设施。

③高热脆弱性区域需增添绿地、提升医疗可达程度，关注老幼等脆弱群体的需求。

LCZ 尺度下采取差异化治理可精准应对热风险，增进城市气候适应的水平，推动空间优化向可持续发展转变。

7 结语

本研究基于 SDGSAT-1 遥感影像与多源数据，构建涵盖热危害性、暴露性、脆弱性的城市热风险评估模型。通过

北京实证分析，明确中心城区及高密度建筑区热风险高，生态涵养区低；结合 LCZ 类型剖析区域影响，提出差异化治理策略。未来可推广至其他城市，融合气候与规划优化布局。研究为城市热环境管理提供科学依据，助力可持续发展。

参考文献：

[1] 孙艺菲,孟丹,宋加颖,等.局地气候分区视角下北京市五环内城市热环境及人口热暴露风险日动态变化研究[J].生态环境学报,2025,34(2):279-292.

[2] 张蔚,甄峰,陈文婷,等.“活动-环境”交互视角下南京城市街道空间热风险评估研究[J].地理研究,2024,43(11):2902-2919.

[3] 刘婷婷,温晓诣,刘志镜,等.构建街区“凉廊”:多源数据支撑下的街区热风险评估与规划优化建议[J].城市规划学刊,2024(S1):228-236.

[4] 刘君男,陈天,王柳璿.高密度城市热健康风险识别、评估与城市设计干预——以澳门为例[J].国际城市规划,2024,39(4):141-151.

[5] 杨俊,任嘉义,于文博.局地气候分区视角下城市气候与人居环境研究进展[J].生态学报,2024,44(11):4489-4506.

[6] 崔海莹,银超慧,卢新海,等.基于步行性的城市热环境暴露风险区识别及其健康效应——以武汉市主城区为例[J].地域研究与开发,2023,42(1):75-80+107.

[7] 邓凯文,安永龙,黄勇,等.基于土壤-人体系统的城市用地重金属污染和健康风险评价:以北京城市副中心为例[J].环境化学,2025,44(3):1119-1132.

[8] 左世诚,董杰,廖明生.时序InSAR形变梯度估计与城市建筑物风险评估:以北京平原为例[J].地质科技通报,2024,43(6):171-183.

[9] C. N. S. Rapid neighbourhood-scale modelling of urban heat risks for early-stage quantification of potential passive design mitigation strategy effectiveness: Copenhagen test case[J]. E3S Web of Conferences,2024(562):3003.

作者简介：周猛（1999-），男，中国安徽六安人，硕士，从事城市遥感研究。

基金项目：国际（地区）合作与交流项目可持续发展国际合作科学计划（SDIC）—重点项目典型丘陵地区环境—社会系统大数据平台构建与发展途径决策支持（项目编号：42361144884）国家自然科学基金。