

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络

乔治¹, 陈嘉悦¹, 王楠¹, 卢应爽¹, 贺瞳¹, 孙宗耀², 徐新良³, 杨浩⁴, 李莹⁵, 王方^{6*}

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学建筑学院, 天津 300072; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 4. 北京社会科学院, 北京 100101; 5. 天津大学建筑设计规划研究总院有限公司, 天津 300070; 6. 天津市科学技术发展战略研究院, 天津 300011)

摘要: 快速城市化加剧了城市热环境系统复杂性, 严重影响城市生态环境和人居健康. 综合地理信息系统、遥感、形态学空间格局分析和电路理论等理论与技术, 应用 MODIS 地表温度遥感数据, 定量识别京津冀城市群热岛斑块时空分布特征, 划分城市热岛斑块景观类型并分析其时空转移路径. 在此基础上, 揭示城市群热环境空间网络和关键廊道时空演变过程. 结果表明, 2020 年城市热岛斑块面积为 16 610 km², 占研究区面积比例为 7.68%. 2005~2020 年京津冀城市群热岛面积和斑块数量显著增加. 城市热岛斑块类型由 2005 年孤岛型为主导转变为 2020 年以核心型为主导. 其中, 2020 年核心型城市热岛斑块主要来源于 2005 年的非城市热岛斑块、核心型和边缘型城市热岛斑块. 2020 年京津冀城市群热环境源地数量和廊道长度、密度及电流密度均高于 2005 年. 通过城市热环境廊道等级分析发现, 2020 年京津冀城市群热环境敏感型廊道为主要类型. 2005~2020 年敏感型廊道增加数量最多. 同时, 城市热环境廊道系数增加, 表征京津冀城市群热环境廊道趋向稳定型发展. 最终提出城市热环境空间网络模式并讨论城市热环境主动适应和减缓措施. 研究结果将为城市热环境空间网络识别提供范式, 旨在实现主动有序适应和减缓城市热环境风险与促进城市可持续发展的目标.

关键词: 城市热环境; 空间网络; 形态学空间格局分析; 电路理论; 京津冀城市群

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3034-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202206310

Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory

QIAO Zhi¹, CHEN Jia-yue¹, WANG Nan¹, LU Ying-shuang¹, HE Tong¹, SUN Zong-yao², XU Xin-liang³, YANG Hao⁴, LI Ying⁵, WANG Fang^{6*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Beijing Academy of Social Sciences, Beijing 100101, China; 5. Tianjin University Research Institute of Architectural Design and Urban Planning Company Limited, Tianjin 300070, China; 6. Tianjin Academy of Science and Technology for Development, Tianjin 300011, China)

Abstract: Rapid urbanization has increased the complexity of the urban heat environment system, which has negative impacts on the health of the urban ecological system and the human habitat. By combining theories and technologies such as geographic information systems, remote sensing, morphological spatial pattern analysis, and circuit theory with data from MODIS land surface temperature production, urban heat island patches in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration were quantitatively identified in terms of their spatial and temporal distribution characteristics and their spatial and temporal transfer paths. This foundation revealed the geographical network structure of the urban heat environment as well as the spatial and temporal evolution process of critical corridors. According to the findings, urban heat island patches covered 16 610 km² in 2020, accounting for 7.68% of the study area. In the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, both the area and the number of urban heat island patches considerably increased between 2005 and 2020, going from being dominated by isolated island types of urban heat island patches in 2005 to being dominated by core types in 2020. In particular, the non-urban heat island patches, core type, and edge type of urban heat island patches in 2005 were the major ancestors of the core type and edge type urban heat island patches in 2020. In the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, there were more urban heat environment source sites, corridor length, densities, and present densities in 2020 than there were in 2005. The sensitive corridor was found to be the predominant type of urban heat island corridor in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2020. The number of sensitive corridors increased the highest in the period from 2005-2020. As the coefficient of urban heat environment corridors increased concurrently, it was apparent that the urban heat environment corridor had a propensity to grow continuously in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. The active adaptation and mitigation measures of the urban heat environment were proposed, and a spatial network model of the urban heat environment was finally provided. To adapt to, mitigate, and promote urban sustainable development risks, these research findings will serve as a paradigm for the identification of the urban heat environment spatial network actively and methodically.

Key words: urban heat environment; spatial network; morphological spatial pattern; circuit theory; Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

收稿日期: 2022-06-27; 修订日期: 2022-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52270187, 41971389); 天津市自然科学基金项目(21JCYBJC00390); 国家高分辨率对地观测重大科技专项(05-Y30B01-9001-19/20-4)

作者简介: 乔治(1986~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 GIS 及遥感应用、土地利用变化和城市热环境, E-mail: qiaozhi@tju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wangfang02@tj.gov.cn

以气温升高为主要特征的全球气候变化是人类社会可持续发展面临的重大挑战. 作为全球气候变化最典型的特征之一, 城市热岛 (urban heat island, UHI) 效应是由于人类活动导致城市和郊区间温度差异显著的现象^[1,2]. 近年来, 城市化过程加剧城市热岛效应, 高温热浪极端天气频率增加, 并与空气污染等环境问题协同复合影响人类健康和城市可持续发展^[3-5]. 因此, 识别城市热环境复杂系统及其网络结构时空变化, 从而主动适应与减缓城市热岛效应已成为应对气候变化和降低气候风险的重要目标和技术手段^[6-9].

分析城市热岛斑块空间形态和结构特征的相互作用对于主动适应与减缓城市热岛效应具有重要意义. 已有学者利用空间形态学和景观生态学等方法分别在全球、国家和区域等不同空间尺度开展了城市热环境时空动态研究^[10-13]. 针对空间形态学理论和方法, 已有研究通过剖面线法刻画地表温度从城市中心到郊区的空间变化过程, 绘制城市热岛重心迁移轨迹揭示城市热岛效应时空扩张规律^[12,14]. 此外, 已有研究通过定量新增城市热岛斑块与原有斑块的空间拓扑关系, 识别边缘型、填充型和飞地型等新增城市热岛斑块空间扩张模式及其扩张路径^[15]. 基于景观生态学研究城市热环境的理论核心为“基底-斑块-廊道-网络”^[16]. 在“基底”(研究区域中分布最广、连续性程度最高的城郊背景场)中定量识别出“斑块”(即城市热岛像元), 并从数量、形态和结构等方面构建多种指标评估城市热岛斑块景观空间形态、结构特征与城市热环境时空过程的关联^[17]. 在此基础上, 识别廊道及其相互交叉所形成的空间网络. 形态学空间格局分析 (morphological spatial pattern analysis, MSPA) 更加强调系统内部及

结构性连接, 对斑块的量化分类 (核心、孤岛、孔隙、边缘、环道、桥接和支线) 为廊道和网络识别提供了理论依据^[18]. 同时, 电路理论可以有效弥补 MSPA 功能性连接不足的缺陷, 被进一步用来解析关键廊道^[18]. 但是, 该方法多被用于生态廊道和生态网络, 针对城市热岛效应还没有被广泛应用. 总之, 现阶段的研究多致力于如何评估城市热环境变化, 而忽视了主动适应和减缓城市热环境变化的必要性^[19]; 多致力于量算绿色基础措施对于城市热环境的降温效果, 而忽视了城市热环境复杂系统结构的内在成因机制^[20]; 多致力于揭示土地利用规模或景观组分对城市热环境的影响, 而忽视了城市热环境空间网络的重要性^[21].

本文以京津冀城市群为研究区, 利用 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 地表温度 (land surface temperature, LST) 产品, 基于 MSPA 和电路理论定量识别城市热岛斑块及景观类型. 在此基础上, 揭示城市热环境空间网络和关键廊道时空演变过程. 本研究结果将为城市热环境网络识别提供范式, 旨在实现主动有序适应和减缓城市热环境风险与促进城市可持续发展的目标.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

京津冀城市群位于华北平原北部, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 属于温带季风气候. 京津冀城市群包括北京市、天津市、石家庄市、唐山市、秦皇岛市、邯郸市、邢台市、保定市、张家口市、承德市、沧州市、廊坊市和衡水市等 13 个城市, 其面积占全国总面积的 2.35% (图 1). 截至 2020 年, 京津

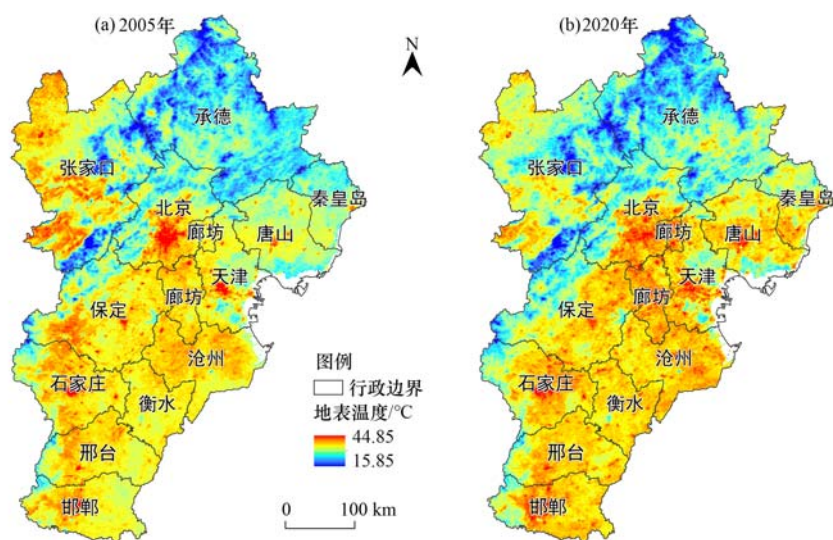


图 1 京津冀城市群行政边界及夏季平均地表温度

Fig. 1 Administrative boundary of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration and the average LST in summer

冀城市群人口和 GDP 分别占全国的 7.82% 和 8.50%, 城镇化水平达到 68.61%, 成为带动我国经济快速增长和参与国际经济合作与竞争的主要平台^[22]. 文献[23]明确指出要打造以首都北京为核心的世界级城市群. 但是, 在快速大规模城市化和一体化发展的同时^[24,25], 京津冀城市群高温热浪天数明显增加、城市热岛强度显著上升等城市热环境问题及其所带来的不利影响日益突显^[26~29].

1.2 数据来源及其预处理

1.2.1 地表温度数据

本研究所使用的地表温度数据来源于美国国家航空航天局提供的 Aqua MODIS 8 天 3 级 (L3) LST 全球产品 (MYD11A2, 6.1 Level-1B) 数据集, 由 Aqua 卫星于 13:30 (上升模式) 和 01:30 (下降模式) 这两次过境时获取 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>), 空间分辨率为 1 km. 地表温度数据通过分裂窗算法反演获得, 精度可达到 1 K. 本研究在 Google Earth Engine (GEE) 平台上分别针对 2005 年和 2020 年 6~8 月所有 MODIS LST 产品进行精度控制后计算其上升模式的像元平均值, 作为地表平均温度表征研究区 2005 年和 2020 年夏季城市热环境 (图 1).

1.2.2 土地利用数据

土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心网站 (<http://www.resdc.cn>) 所提供的土地利用遥感监测数据集, 包括耕地、林地、草地、水

域、城乡建设用地和未利用土地这 6 个一级类型以及 25 个二级类型, 空间分辨率为 1 km. 土地利用一级类型综合评价精度达 94.30%, 二级类型综合精度达 91.20%^[30].

1.2.3 城市边界数据

城市边界数据来源于全球城市边界数据集 (<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>), 其主要借助 GEE 平台开发, 绘制了全球多时相的城市边界数据^[31]. 该数据集能够很好地捕获到城乡边缘地区轮廓特征, 因而在本研究中被用于城市热岛斑块范围识别. 本研究综合利用地表温度数据、土地利用数据和城市边界数据, 通过 SUE (simplified urban-extent) 算法分别识别京津冀城市群 2005 年和 2020 年夏季城市热岛斑块^[32]. 本研究将各个城市边界范围内部非城乡建设用地和非水域像元的平均温度统计为郊区背景场温度, 高于背景场温度的像元被识别为城市热岛斑块, 像元地表温度与郊区背景场温度的差值即为该像元城市热岛强度.

1.3 城市热岛斑块景观类型识别

针对由 SUE 算法所得到的 2005 年和 2020 年京津冀城市群夏季城市热岛斑块, 利用 ArcGIS 软件将其转换为二值数据 (城市热岛斑块为前景, 其余为背景), 再利用 Guidos 软件的 MSPA 方法进一步分类为 7 种城市热岛斑块景观类型, 包括: 核心、孤岛、孔隙、边缘、环道、桥接和支线 (图 2)^[33].

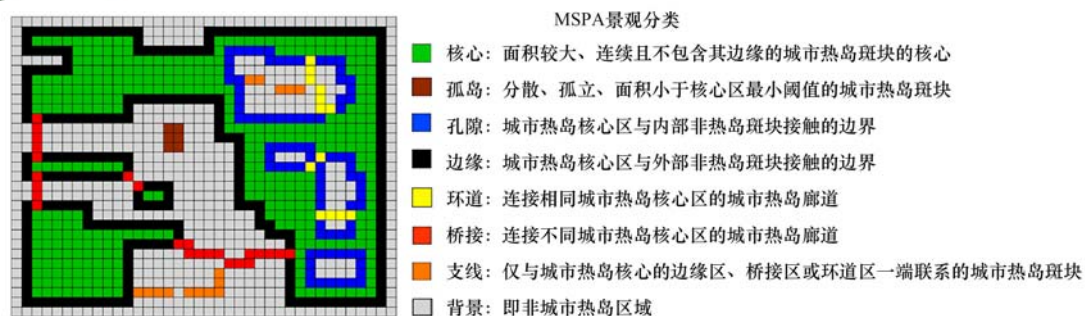


图 2 基于 MSPA 的城市热岛斑块分类及特征

Fig. 2 Classification and characteristics of UHI patches based on MSPA

1.4 城市热环境空间网络识别

基于城市热岛斑块类型空间分布, 引入电路理论, 识别京津冀城市群热环境空间网络. 电路理论耦合电学与运动生态学, 利用电子在电路中随机游走的特性 (即随机漫步理论) 来模拟物种个体或基因流在特定场中的迁移扩散过程. 本研究将城市地表能量 (温度) 传输过程作为电流, 背景场和城市热岛斑块景观作为电导面. 其中, 核心型且面积大于 1 km² 的城市热岛斑块被定义为源地, 根据是否利于地表能量传输为各类城市热岛斑块景观赋予不同电

阻值 (表 1)^[18]. 例如, 核心型等城市热岛斑块地表温度较高, 表征其易于传输和储存地表能量, 则被赋予低电阻值. 反之, 背景场 (非城市热岛斑块) 则被赋予高电阻值. 据此, 城市热环境即可转化为一列节点 (源地) 和电阻组成的电路. 该步骤通过 linkage mapper 工具箱中的 build network and map linkages 功能实现.

在电路模拟过程中, 运用 linkage mapper 工具箱中 pinchpoint mapper 调用 circuitscape 程序, 同时选取 “all-to-one” 计算模式, 将某个源地与地面链接, 将

表 1 基于 MSPA 的城市热岛斑块类型电阻值
Table 1 Resistance values of UHI patch types based on MSPA

斑块类型	核心	孤岛	孔隙	边缘	环道	桥接	支线	背景
电阻值	1	15	80	30	30	10	60	100

电流注入剩余的源地中,在所有源地间相互作用,即可得到基于连接廊道的电流密度. 本研究中,电流密度大小表征地表能量在该电路中传输概率的大小. 由于并联电路中有效电阻会随着电路路径数的增加而降低,相应的电流会增大,因而当廊道冗余度、宽度和连接度增加时,地表能量传输过程中所受到的阻力会减小,地表能量传输的概率随之增大.

1.5 廊道重要性分级

根据电路理论,地表能量传输与源地面积和电流强度成正比,与廊道长度成反比. 因此,本研究进一步提出廊道系数,并依据其值大小划分廊道重要性:

$$CI = \frac{Area_{yd} \times \int_s^f I_i}{Length_{ld}}$$

式中,CI 为廊道系数; $Area_{yd}$ 为廊道所连接的城市热岛源地面积; $\int_s^f I_i$ 为该廊道上由起点 s 到终点 f 电流强度的积分; $Length_{ld}$ 为廊道的长度.

2 结果与分析

2.1 城市热岛斑块时空变化过程

2.1.1 城市热岛斑块类型空间分布特征

本研究识别京津冀城市群热岛斑块并将其分为 7 种城市热岛斑块类型(图 3). 2020 年,城市热岛斑

块面积为 16 610 km², 占研究区面积比例为 7.68%. 2020 年城市热岛斑块面积是 2005 年的 2.38 倍.

2005 ~ 2020 年京津冀城市群热岛斑块主要分布于中部、南部和东南部,面积显著增加,其中北京市和天津市城市热岛斑块面积较大且分布集中. 2020 年,北京市城市热岛斑块面积最大(3 737 km²),城市热岛斑块集中分布于北京市东南部. 2020 年北京市城市热岛斑块面积是 2005 年的 2.12 倍,占京津冀城市群面积比例为 1.73%,占北京市总面积的 22.77%. 2020 年北京市城市热岛斑块城市热岛强度为 $(1.51 \pm 1.22) ^\circ\text{C}$. 天津市城市热岛斑块面积仅次于北京市(2 194 km²),占京津冀城市群面积比例为 1.01%,占天津市的 18.39%; 2020 年天津市城市热岛斑块面积是 2005 年的 2.80 倍,城市热岛强度为 $(2.03 \pm 1.25) ^\circ\text{C}$. 承德市城市热岛斑块面积最小(171 km²),仅占研究区面积的 0.08%,占承德市面积的 0.43%. 2020 年承德市城市热岛斑块面积是 2005 年的 3.29 倍.

2005 ~ 2020 年京津冀城市群热岛斑块类型由孤岛型为主导转变为以核心型为主导. 2020 年京津冀城市群以核心型城市热岛斑块为主,面积为 5 078 km²,主要集中分布于北京市、天津市和京津冀城市群西南部,核心型城市热岛斑块城市热岛强度为 $(2.43 \pm 1.27) ^\circ\text{C}$; 孤岛型和边缘型城市热岛斑块次

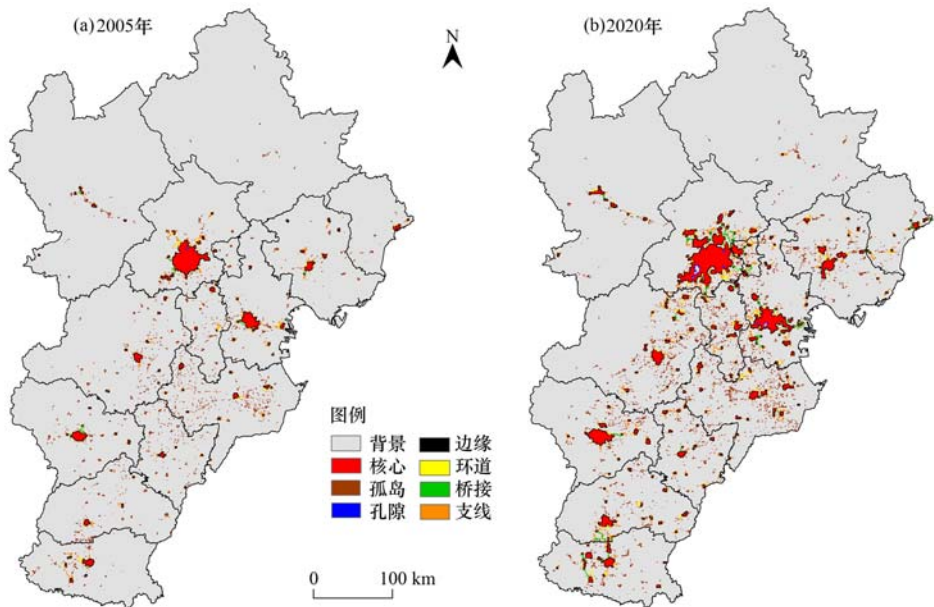


图 3 基于 MSPA 的城市热岛斑块类型空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of UHI patch types based on MSPA

之,主要分布于京津冀城市群东南部,面积分别为 3 964 km² 和 3 803 km²,城市热岛强度分别为 $(0.92 \pm 0.75) ^\circ\text{C}$ 和 $(1.51 \pm 1.07) ^\circ\text{C}$. 2020 年孔隙型城市热岛斑块面积最小(91 km²). 2005 ~ 2020 年,核心型和边缘型城市热岛斑块面积增加最多(3 180 km² 和 2 386 km²),孔隙型增长速度最快(2020 年的结果是 2005 年的 11.38 倍).

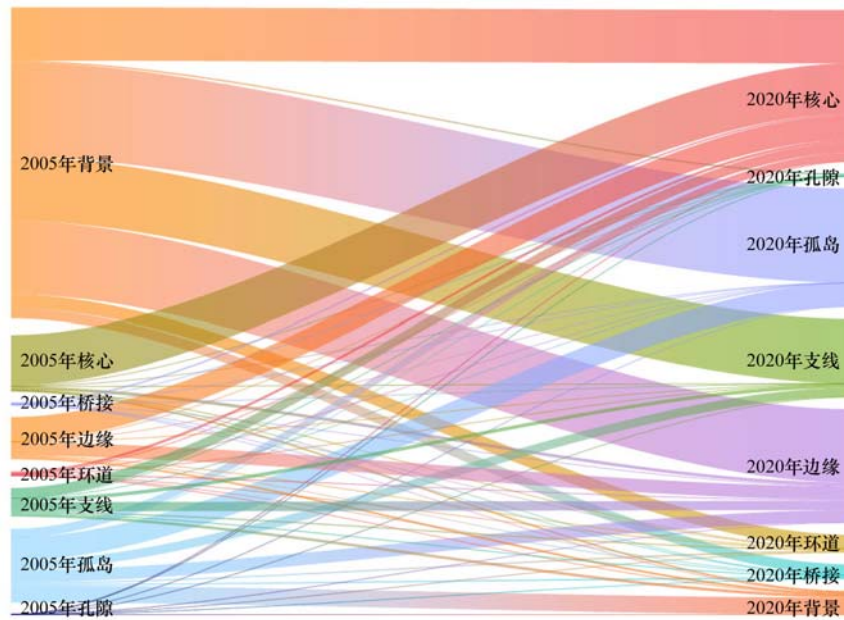
2.1.2 城市热岛斑块类型时空转移路径

2005 ~ 2020 年京津冀城市群不同城市热岛斑块类型差异显著,具有明显的类型转移特征(图 4). 2020 年核心型城市热岛斑块主要来源于 2005 年的非城市热岛斑块(35.25%)、核心型(33.26%)和边缘型(16.21%). 新增核心型城市热岛斑块主要

集中于北京市南部、天津市南部、唐山市中部和京津冀城市群西南部.

2005 年孤岛型城市热岛斑块在 2020 年主要转向为孤岛型(31.97%)、非城市热岛斑块(23.01%)和边缘型(16.77%). 其中,转向为非城市热岛斑块的孤岛型城市热岛斑块主要分布于京津冀城市群东南部,相对远离核心型城市热岛斑块;转向为边缘型和孤岛型城市热岛斑块分布则更为分散.

尽管 2005 年非城市热岛斑块有 95.02% 在 2020 年仍为非城市热岛斑块,但其仍为 2020 年各类城市热岛斑块的主要来源. 非城市热岛斑块主要转向孤岛型(1.51%)、边缘型(1.17%)、支线型(1.03%)和核心型(0.85%).



剔除 2005 年和 2020 年皆为背景的区域

图 4 2005 ~ 2020 年城市热岛斑块类型面积转移

Fig. 4 Area transfer of UHI patch types from 2005 to 2020

2.2 城市热环境网络及关键廊道分析

2.2.1 城市热环境空间网络

运用 build network and map linkages 和 pinchpointmapper 工具进行 2005 ~ 2020 年京津冀城市群热环境空间网络分析,并在此基础上计算电流密度(图 5). 本研究从源地个数、面积、廊道长度、密度和电流密度等方面分析京津冀城市群热环境空间网络特征变化.

2020 年,京津冀城市群热环境源地共 126 个,较 2005 年增加了 77 个. 2005 ~ 2020 年,源地总面积从 1 834.86 km² 增加至 4 751.93 km²,2020 年源地面积达到 2005 年的 2.59 倍. 新增加的源地主要分布在北京市、天津市和河北省西南部. 2005 ~ 2020 年,面积最大的源地位于北京市,从 960.29 km² 增加至 2 046.29 km².

2020 年,京津冀城市群热环境廊道共 250 条,较 2005 年增加了 157 条. 2005 ~ 2020 年,城市热环境廊道总长度从 4 751.97 km 增加至 8 335.67 km,增加了 75.42%. 2020 年京津冀城市群热环境廊道密度为 0.04 km·km⁻²,达到 2005 年的 1.75 倍. 新增加的城市热环境廊道主要分布于保定市、沧州市、衡水市、邢台市和邯郸市,与 2005 年相比增加了 3 135.90 km; 城市热环境廊道密度较大的城市分别是衡水市(0.13 km·km⁻²)、沧州市(0.09 km·km⁻²)和廊坊市(0.09 km·km⁻²),同时廊道密度增加最多的城市分别是衡水市(0.10 km·km⁻²)、邢台市(0.04 km·km⁻²)和沧州市(0.03 km·km⁻²),主要分布于京津冀城市群东南部.

2005 ~ 2020 年,京津冀城市群热环境廊道电流密度呈增加趋势,主要体现在平均电流值和最大电

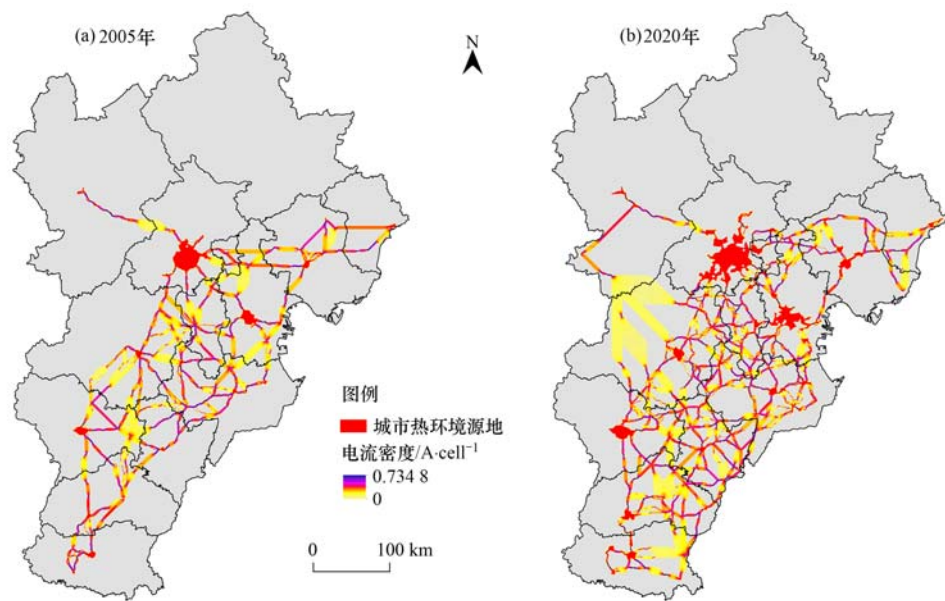


图5 京津冀城市群热环境空间网络及电流密度

Fig. 5 Spatial network of urban heat environment and current density in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

流值增加. 其中, 平均电流值由 0.18A 增加至 0.19A, 最大电流值由 0.71A 增加至 0.73A. 2005 ~ 2020 年, 京津冀城市群热环境廊道电流密度在东南部和西部地区增势明显, 这些地区城市热环境廊道密度较高, 且土地利用类型多为城镇建设用地、农村居民点和耕地. 受高强度人类开发活动影响, 表现出城市热环境源地数量增多、面积增加的基本特征, 促使相邻城市热环境源地之间距离缩短, 地表能量传输能力增强.

2.2.2 城市热环境廊道等级分析

本研究根据廊道系数将京津冀城市群热环境廊道分为敏感型[0 ~ 10)、较敏感型[10 ~ 25)、较稳

定型[25 ~ 90)和稳定型(>90)等4个等级(图6).

2020 年共有 250 条城市热环境廊道, 各廊道数量由敏感型廊道至稳定型廊道依次递减, 所连接的城市热岛源地面积则依次增加. 其中, 敏感型廊道数量最多, 共有 151 条, 占比 60.40%, 连接小型城市热岛源地, 多位于北京市以东和以南区域、廊坊市、沧州市、保定市、衡水市全域、秦皇岛市南部、唐山市北部、天津市、廊坊市和沧州市交界处、张家口市南部, 石家庄市、邢台市和邯郸市东部. 较敏感型廊道 50 条, 占比 20.00%, 连接较小的城市热岛源地, 主要分布于北京市以东和以南的东部区域, 与敏感型廊道相比更集中于研究区东部. 较稳定型廊道

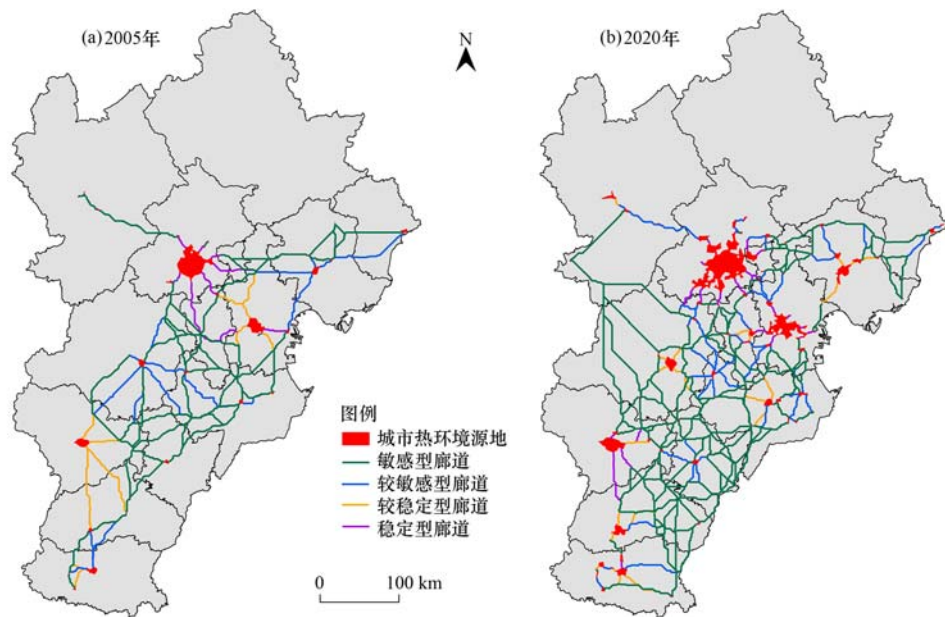


图6 京津冀城市群热环境廊道类型空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of corridor types for urban heat environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

25 条,占比 10.00%,连接中等城市热岛源地,位于唐山市、廊坊市、沧州市、保定市、石家庄市、邢台市和邯郸市。稳定型廊道数量最少,共 24 条,占比 9.60%,连接大型城市热岛源地,主要分布在北京市东部和南部、天津市中部和石家庄市南部。

分析 2005~2020 年各类型城市热环境廊道的变化情况与空间分布。2005~2020 年,敏感型廊道数量增加 95 条,主要分布于京津冀城市群热环境廊道密度明显增加的区域。较敏感型廊道数量增加 32 条,主要分布于廊坊市全域、保定市、沧州市和衡水市东部。较稳定型廊道数量增加 15 条,主要分布于唐山市、沧州市和保定市东南部。稳定型廊道数量增加 15 条,分布于北京市东南部、天津市南部和石家庄市东南部。敏感型廊道明显减少的区域位于张家口市东部(转变为较敏感型)和沧州市西部(转变为较敏感型和较稳定型)。较敏感型廊道明显减少区域位于唐山市中部与秦皇岛市南部(转变为较稳定型或不再是廊道)、保定市东南部与沧州市西部(交界处仍保持较敏感型,其余部分转变为较稳定型,部分转变为敏感型)。较稳定型廊道减少的区域主要位于天津市(南部转变为稳定型,北部转变为较敏感型)、石家庄市与邢台市交界处(转变为稳定型)。稳定型廊道减少区域位于北京市东部与廊坊市、天津市交界处(廊坊市连接北京市的廊道消失,连接天津市的廊道转变成敏感型)和北京市南部与廊坊市北部(北京市内仍是稳定型廊道,廊坊市的廊道转变为敏感型和较敏感型)。

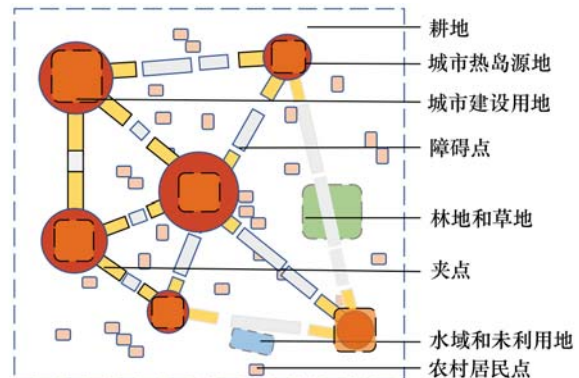
3 讨论

3.1 城市热环境空间网络模式

结合京津冀城市群热环境空间网络、关键廊道和土地利用时空变化特征,本研究进一步提炼城市热环境空间网络模式(图 7)。城市热环境源地根据面积和城市热岛强度可以分为大型、中型和小型等 3 种类型。大型源地与大型源地之间若存在廊道,连通性最强,多为夹点,相对最为稳定,数量最少;大型源地与中等源地间的廊道连接性较强,较为稳定,夹点与障碍点交替出现,夹点较多且靠近源地;大型源地与小型源地若距离较近,则可能连接且较为稳定,若相距较远则连接可能性小;中等源地与小型源地间廊道稳定性较弱,障碍点较多;小型源地与小型源地之间的廊道长度相对最长,稳定性最弱,障碍点最多,数量最多。

城市热环境源地多位于城市建设用地和农村居民点及其周边区域。相对来说,处于城市建设用地及其周边的大、中型源地面积和城市热岛强度明显高

于农村居民点,并且该类型源地面积通常大于城市建设用地本身。4 种类型廊道皆多分布于耕地,从稳定型到敏感型连接的源地面积依次减小。夹点同样多分布于耕地和农村居民用地附近,靠近城市热岛源地。林地与草地通常共同出现,所在区域若有廊道通过则多为障碍点。水域与未利用土地常共同出现,面积相对较小,若有廊道则多从边缘通过,为障碍点;面积较大的水域则无廊道通过。



夹点是指在廊道中对廊道连接起关键作用的区域,即提取较高电流密度集聚的区域;障碍点是廊道连接的障碍区域,改善后能使连接性有较大提升的区域

图 7 城市热环境空间网络模式

Fig. 7 Spatial network model of urban heat environment

3.2 城市热环境主动适应与减缓措施

值得注意的是,2005 年部分城市热岛斑块在 2020 年转变为非城市热岛斑块,特别针对这一现象进行讨论。其中,核心型城市热岛斑块转变为非城市热岛斑块的概率为 2.95%,分布于北京市南部和天津市中部;结合土地利用情况,所处地区都属于城镇用地。尽管该类型区域处于城市内部,但可以通过建设公园和绿地等方式缓解城市局地热环境加剧现象。孤岛型城市热岛斑块转变为非城市热岛斑块的概率为 23.01%,较广泛地分布于京津冀城市群全域,尤其在衡水市、沧州市和保定市较为密集;这些孤岛分布零散,且多属于耕地,靠近农村居民点,即面积小且空间分散的城市热岛斑块,更加容易得到治理。尽管孔隙型城市热岛斑块转变为非城市热岛斑块的概率很大,但本身数量极少。边缘型、环道型、桥接型和支线型城市热岛斑块转变为非城市热岛斑块的部分分布较广且分散。综上,在 7 类城市热岛斑块中,孤岛型最容易转变为非城市热岛斑块,城市热环境主动适应与减缓措施应着重针对该类型城市热岛斑块。

此外,2005~2020 年核心型城市热岛斑块相对稳定,边缘型城市热岛斑块的转变趋向于核心型,城市热岛范围扩张明显,扩张重点区域与环道、桥接和支线型城市热岛斑块有关。转变为核心型概率较

大的景观类型从高到低依次是: 桥接、环道和边缘型(64.77%、60.81%和58.08%)。由此, 相对于城市本身发展造成的城市热岛扩张(边缘型转为核心型城市热岛斑块), 城市间的空间关联有着更强的影响(桥接和环道型转变为核心型城市热岛斑块)。因此, 城市热环境主动适应与减缓措施应注意城市间距, 通过设置城市开发边界和最小生态安全距离, 避免城市群热环境叠加污染。

4 结论

(1) 基于形态学空间格局分析和电路理论等方法, 利用地表温度、土地利用和城市边界多源数据, 识别京津冀城市群热岛斑块的时空分布、类型和转移路径, 揭示城市热环境空间网络和关键廊道时空演变过程。本研究表明, 2005~2020 年京津冀城市群热岛斑块的数量和面积明显增加; 城市热岛斑块主导类型由孤岛型转变为核心型; 京津冀城市群热环境源地数量、面积和廊道长度、密度和电流密度均有所增加。其中, 敏感型廊道为主要城市热环境廊道。2005~2020 年, 各类型廊道数量增加, 增加数量由敏感型到稳定型逐渐减少, 若发生转变则更趋向于廊道系数更高的廊道类型。最终提炼出城市热环境空间网络模式及城市热环境主动适应和减缓措施。

(2) 本文将生态廊道和生态网络识别技术方法应用于城市热环境研究, 更加强调主动适应和减缓城市热环境变化的必要性, 以及城市热环境空间结构内在成因机制和城市热环境空间网络的重要性。所提出的廊道系数和城市热环境空间网络模式对于发现城市群热环境关联特征和主动适应与减缓措施具有一定的创新价值。

参考文献:

- [1] Huang Q F, Lu Y Q. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, **131**(3-4): 1055-1067.
- [2] Howard L. *The Climate of London: deduced from meteorological observations*(2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1833.
- [3] 曹畅, 李旭辉, 张弥, 等. 中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 3987-3997.
Cao C, Li X H, Zhang M, *et al.* Correlation analysis of the urban heat island effect and its impact factors in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 3987-3997.
- [4] 孙艳伟, 王润, 郭青海, 等. 基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 501-512.
Sun Y W, Wang R, Guo Q H, *et al.* Estimation of the urban heat island intensity change and its relationships with driving factors across China based on the human settlement scale [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 501-512.
- [5] 李宇, 周德成, 闫章美. 中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 5037-5045.
Li Y, Zhou D C, Yan Z M. Spatiotemporal variations in atmospheric urban heat island effects and their driving factors in 84 major Chinese cities [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 5037-5045.
- [6] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C H. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(1): 120-128.
- [7] Zhou D C, Xiao J F, Bonafoni S, *et al.* Satellite remote sensing of surface urban heat islands: progress, challenges, and perspectives [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(1), doi: 10.3390/rs11010048.
- [8] 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 等. 无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 492-500.
Yang S Q, Feng L, Tian H H, *et al.* Urban micro-scale thermal environment simulation supported by UAV thermal infrared data [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 492-500.
- [9] 吴志丰, 王业宁, 孔繁花, 等. 基于热红外影像数据的典型居住区常见地表类型热特征分析[J]. *生态学报*, 2016, **36**(17): 5421-5431.
Wu Z F, Wang Y N, Kong F H, *et al.* Analysis of the thermal characteristics of selected urban surfaces in a typical residential area based on infrared thermography [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(17): 5421-5431.
- [10] Shreevastava A, Rao P S C, McGrath G S. Emergent self-similarity and scaling properties of fractal intra-urban heat islets for diverse global cities [J]. *Physical Review E*, 2019, **100**(3), doi: 10.1103/PhysRevE.100.032142.
- [11] Ma L, Wang Y Y, Liang Z, *et al.* Changing effect of urban form on the seasonal and diurnal variations of surface urban heat island Intensities (SUHIs) in more than 3000 cities in China [J]. *Sustainability*, 2021, **13**(5), doi: 10.3390/su13052877.
- [12] 孙芹芹, 吴志峰, 谭建军. 基于热力重心的广州城市热环境时空变化分析[J]. *地理科学*, 2010, **30**(4): 620-623.
Sun Q Q, Wu Z F, Tan J J. Spatio-temporal changes of urban thermal environment with thermal centroid in Guangzhou [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, **30**(4): 620-623.
- [13] 张楚宜, 胡远满, 刘森, 等. 景观生态学三维格局研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(12): 4353-4360.
Zhang C Y, Hu Y M, Liu M, *et al.* Research progress on three-dimensional pattern in landscape ecology [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(12): 4353-4360.
- [14] 乔治, 黄宁钰, 徐新良, 等. 2003-2017 年北京市地表热力景观时空分异特征及演变规律[J]. *地理学报*, 2019, **74**(3): 475-489.
Qiao Z, Huang N Y, Xu X L, *et al.* Spatio-temporal pattern and evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(3): 475-489.
- [15] Peng J, Hu Y X, Dong J Q, *et al.* Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: a radius approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136792.
- [16] 郭建国. *景观生态学: 格局、过程、尺度与等级* [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [17] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容 [J]. *生态学报*, 2002, **22**(7): 1135-1142.
Chen W B, Xiao D N, Li X Z. The characteristics and contents

- of landscape spatial analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(7): 1135-1142.
- [18] 史学民, 秦明周, 李斌, 等. 基于 MSPA 和电路理论的郑汴都市区绿色基础设施网络研究[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2018, **48**(6): 631-638.
- Shi X M, Qin M Z, Li B, *et al.* Research on the green infrastructure network in the Zhengzhou-Kaifeng metropolitan area based on MSPA and circuit theory [J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2018, **48**(6): 631-638.
- [19] 乔治, 孙宗耀, 孙希华, 等. 城市热环境风险预测及时空格局分析[J]. *生态学报*, 2019, **39**(2): 649-659.
- Qiao Z, Sun Z Y, Sun X H, *et al.* Prediction and analysis of urban thermal environment risk and its spatiotemporal pattern [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2): 649-659.
- [20] 乔治, 贺瞳, 卢应爽, 等. 全球气候变化背景下基于土地利用的人类活动对城市热环境变化归因分析——以京津冀城市群为例[J]. *地理研究*, 2022, **41**(7): 1932-1947.
- Qiao Z, He T, Lu Y S, *et al.* Quantifying the contribution of land use change based on the effects of global climate change and human activities on urban thermal environment in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Geographical Research*, 2022, **41**(7): 1932-1947.
- [21] 宁琦, 朱梓铭, 覃盟琳, 等. 基于 MSPA 和电路理论的南宁市国土空间生态网络优化研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2021, **46**(2): 306-318.
- Ning Q, Zhu Z M, Qin M L, *et al.* Research on the optimization of territorial space ecological network of Nanning city based on MSPA and circuit theory [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2021, **46**(2): 306-318.
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>, 2021-10-09.
- [23] 北京市昌平区人民政府. 京津冀协同发展规划纲要 [EB/OL]. <http://www.bjchp.gov.cn/cpqzl/315734/tzgg27/1277896/index.html>, 2018-04-13.
- [24] 陈彬辉, 冯瑶, 袁建国, 等. 基于 MODIS 地表温度的京津冀地区城市热岛时空差异研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2016, **52**(6): 1134-1140.
- Chen B H, Feng Y, Yuan J G, *et al.* Spatiotemporal difference of urban heat island in Jing-Jin-Ji area based on MODIS land surface temperature [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2016, **52**(6): 1134-1140.
- [25] 乔治, 田光进. 北京市热环境时空分异与区划[J]. *遥感学报*, 2014, **18**(3): 715-734.
- Qiao Z, Tian G J. Spatiotemporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, **18**(3): 715-734.
- [26] 乔治, 田光进. 基于 MODIS 的 2001 年—2012 年北京热岛足迹及容量动态监测[J]. *遥感学报*, 2015, **19**(3): 476-484.
- Qiao Z, Tian G J. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, **19**(3): 476-484.
- [27] 刘勇洪, 房小怡, 张硕, 等. 京津冀城市群热岛定量评估[J]. *生态学报*, 2017, **37**(17): 5818-5835.
- Liu Y H, Fang X Y, Zhang S, *et al.* Research on quantitative evaluations of heat islands for the Beijing-Tianjin-Hebeurban agglomeration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(17): 5818-5835.
- [28] 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 等. 基于卫星遥感的京津冀热环境效应分析[J]. *环境监控与预警*, 2019, **11**(5): 72-79.
- Zhao W H, Li L J, Lu H F, *et al.* Research on thermal environment effect of the Beijing-Tianjin-Hebei region and air pollution based on remote sensing [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2019, **11**(5): 72-79.
- [29] 杨浩, 孟娜, 王婧, 等. 基于支持向量机的京津冀城市群热环境时空形态模拟[J]. *地球信息科学学报*, 2019, **21**(2): 190-200.
- Yang H, Meng N, Wang J, *et al.* Spatial-temporal morphology simulation of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration thermal environment based on support vector machine [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2019, **21**(2): 190-200.
- [30] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. *地理学报*, 2018, **73**(5): 789-802.
- Liu J Y, Ning J, Kuang W H, *et al.* Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5): 789-802.
- [31] Li X C, Gong P, Zhou Y Y, *et al.* Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, **15**(9), doi: 10.1088/1748-9326/ab9be3.
- [32] Chakraborty T, Lee X. A simplified urban-extent algorithm to characterize surface urban heat islands on a global scale and examine vegetation control on their spatiotemporal variability [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, **74**: 269-280.
- [33] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, **30**(4): 456-459.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)