

DOI: 10.20103/j.stxb.202403040439

徐林莉, 王佳, 周伟奇. 城市群发展对区域热岛空间格局演变的影响. 生态学报, 2024, 44(24): 11035-11048.

Xu L L, Wang J, Zhou W Q. Impact of urban agglomeration development on spatial pattern evolution of regional heat islands. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11035-11048.

## 城市群发展对区域热岛空间格局演变的影响

徐林莉<sup>1,2</sup>, 王 佳<sup>2</sup>, 周伟奇<sup>1,2,3,\*</sup>

1 中国科学技术大学生命科学与医学部生命科学学院, 合肥 230027

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**大量研究显示随着城市发展,城市热岛效应加剧。随着新型城镇化战略的实施,城市群逐渐成为我国城市化进程的主体形态。城市群发展,是否会引起区域热环境的改变,加剧城市热岛效应?城市群发展如何影响区域热岛的空间格局演变?这些问题关系城市群的可持续发展,亟需得到科学的解答。研究选择京津冀、长三角、长株潭和珠三角四个城市群为研究对象,基于2000—2020年夏季地表温度数据,提取城市群区域热岛斑块,进而探究区域热岛空间格局特征及其变化规律,并分析其与城市群不透水面占比的定量关系。研究发现:(1)2000—2020年,各城市群不透水面快速增加,城市群区域热岛面积显著上升。(2)区域热岛空间格局变化显著,其中京津冀、珠三角城市群区域热岛呈现集聚特征,表现为热岛斑块的平均斑块面积增加、平均最近距离减小;而长三角城市群、长株潭城市群则表现为热岛斑块的平均斑块面积增加,但平均最近距离也增加。(3)随着城市群发展,四个城市群区域热岛斑块连通性水平显著上升。但城市群各城区间温度相似性水平变化存在差异。其中,随着长三角和长株潭城市群的发展,起初各城市间温度相似性水平快速上升,当城市群不透水面占比分别达到20%、4%时,各城区间温度相似性逐渐趋于稳定。研究对于深入理解城市群发展对区域热环境的影响具有重要意义,可为城市群热环境问题协同治理与缓解、区域的可持续发展提供科学依据。

**关键词:**城市群;区域热岛;地表温度;景观格局;时空演变

## Impact of urban agglomeration development on spatial pattern evolution of regional heat islands

XU Linli<sup>1,2</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>, ZHOU Weiqi<sup>1,2,3,\*</sup>

1 School of Life Sciences, Division of Life Sciences and Medicine, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Numerous studies have demonstrated that urban development exacerbated the urban heat island effect. With the implementation of new urbanization strategies, urban agglomerations have gradually become the predominant form of China's urbanization process. Does the development of urban agglomerations cause the change of regional thermal environment and intensify the urban heat island effect? How does the development of urban agglomeration affect the evolution of regional heat island spatial pattern? These questions are crucial for the sustainable development of urban agglomeration and urgently require scientific answers. This study focused on four urban agglomerations in China: Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) urban agglomeration, Yangtze River Delta (YRD) urban agglomeration, Changsha-Zhuzhou-Xiangtan (CZT) urban

**基金项目:**“十四五”国家重点研发计划(2022YFF1301104);国家野外站建设项目(SZDL2023000962);中国生态学会青年人才托举工程(2021-2023)项目(STQT2021C04)

**收稿日期:**2024-03-04; **网络出版日期:**2024-09-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@rcees.ac.cn

agglomeration, and Pearl River Delta (PRD) urban agglomeration. Using the land surface temperature data from the summer months of 2000 to 2020, we first identified the regional heat islands within these urban agglomerations, then explored the spatial pattern characteristics and their changes over time, and finally analyzed the quantitative relationship between the patterns and the proportion of impervious surface in the four urban agglomerations. The results revealed that: (1) From 2000 to 2020, the scale of these urban agglomerations increased rapidly, leading to a significant rise in the area of regional heat islands. (2) There was significant change in the spatial pattern of regional heat islands, with the BTH urban agglomeration and the PRD urban agglomeration showing agglomeration characteristics, as evidenced by an increase in the average size of heat island patches and a decrease in their average nearest distance. In contrast, the YRD urban agglomeration and CZT urban agglomeration showed an increase in both the average size of heat island patches and their average nearest distance. (3) With the development of urban agglomerations, the regional heat island patch connectivity levels of the four urban agglomerations increased significantly. However, the trends of temperature similarity level among urban areas in the four urban agglomerations were different. Among them, with the development of YRD urban agglomeration and CZT urban agglomeration, the temperature similarity among cities increased rapidly at first. When the proportion of impervious surface in urban agglomerations reached 20% and 4%, respectively, the temperature similarity among the urban areas was high and tended to be stable. The research can enhance the understanding on how urban agglomeration development affects the regional thermal environment, and thereby provide scientific evidence for the coordinated management and mitigation strategies to address urban agglomeration thermal environment issues for sustainable regional development.

**Key Words:** urban agglomeration; regional heat islands; land surface temperature; spatial pattern; spatio-temporal evolution

目前全球一半以上的人口居住在城市,预计到 2050 年将达到近 70%<sup>[1]</sup>。城市化过程中硬化地表扩张,侵占或替代原有自然地表,加之城市各种人类活动向城市环境释放了大量的人为热,导致城市温度升高,形成城市热岛效应<sup>[2]</sup>。城市热岛效应对城市植被生长<sup>[3]</sup>、能源消耗<sup>[4]</sup>、城市居民身心健康等均存在负面影响<sup>[5]</sup>。随着快速城市化进程,城市热岛面积显著增加,城市温度不断上升。通过分析我国 84 个城市在 1960—2017 年间城市热岛效应的年际变化,结果显示大部分城市的年均热岛强度呈现明显的增加趋势,增长速率约为每十年上升 0.04℃<sup>[6]</sup>。此外,全球气候变化进一步加剧了城市热岛效应<sup>[7]</sup>,使其成为城市可持续发展的巨大挑战。

2014 年我国实施的新型城镇化战略,明确将城市群作为我国城市化发展的主体形态。城市群发展过程中城市建设用地连接成片、空间集聚,城市生态环境问题开始呈现区域化特征<sup>[8]</sup>。例如随着城市群发展,原本孤立的区域热岛相互连接,逐渐发展为区域热岛,已有研究在长三角城市群<sup>[9]</sup>、珠三角城市群<sup>[10]</sup>均发现了类似的现象。在城市群尺度探究区域热环境问题已成为当前相关研究的热点,尤其是针对区域热岛效应的研究。饶胜等较早地阐明了区域热岛的定义,其基于珠三角地区的研究表明随着城市连片发展,区域高温热岛逐渐形成<sup>[11]</sup>。Yu 等的研究进一步提出在城市群发展背景下,“区域热岛”可以更好地表征区域热环境<sup>[12]</sup>。借鉴城市热岛强度的量化方法,当前研究聚焦于分析城市群区域热岛强度大小及其时间变化规律,通过采用城市群自然森林温度<sup>[13–14]</sup>、城市群农村(或农田)温度<sup>[15–17]</sup>以及城市群区域平均温度<sup>[12, 18–19]</sup>作为参照,量化城市群热岛强度并探究其变化规律。如 Li 等研究发现郑州都市圈区域热岛面积在 2002—2020 年间呈显著上升趋势<sup>[20]</sup>。然而,当前研究主要关注城市群发展对于区域热岛面积变化的影响,但对于如何影响区域热岛空间格局演变过程缺乏深入的认知。城市群发展如何影响区域热岛斑块的连通性?是否导致城市群各城市间的温度越来越相似?此外,城市发展对城市热岛的影响存在规模效应<sup>[21–22]</sup>,城市群发展对区域热岛的影响是否也存在规模效应?这些问题尚未得到很好的解答。

本研究选取了四个不同气候背景的城市群——京津冀、长三角、长株潭和珠三角城市群作为研究对象,基

于 2000—2020 年夏季平均地表温度数据,分析了 2000—2020 年各城市群不透水面占比的变化,分析了各城市群区域热岛空间格局特征及其随时间变化的趋势,分析了城市群发展对区域热岛景观连通性、各城市温度相似性水平的影响,并探索是否存在规模效应。本研究有利于深入认识城市群发展对区域热环境的影响,可为城市群热环境问题协同治理与缓解、促进区域的可持续发展提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区

以京津冀、长三角、珠三角和长株潭四个城市群为主要研究对象(图 1)。京津冀城市群主要包括北京、天津等 11 个城市,总面积为 21.68 万  $\text{km}^2$ ,属于温带季风气候,2020 年该地区总人口约为 1.10 亿,占全国总人口的 7.81%,地区生产总值为 8.64 万亿元,占全国的 8.50%。长三角城市群(传统边界)主要包括上海市、江苏东南部和浙江北部共 15 个城市,总面积为 10.59 万  $\text{km}^2$ ,属于亚热带湿润季风气候,2020 年该地区总人口约为 1.16 亿,占全国总人口的 8.05%,地区生产总值为 16.03 万亿元,占全国的 15.77%。珠三角城市群主要包括广州、深圳等 9 个城市,总面积为 5.49 万  $\text{km}^2$ ,属于亚热带湿润季风气候,2020 年该地区总人口约为 0.65 亿,占全国总人口的 4.33%,地区生产总值为 8.95 万亿元,占全国的 8.81%。长株潭城市群包括长沙、株洲和湘潭 3 个城市,总面积为 2.81 万  $\text{km}^2$ ,属于亚热带季风气候,2020 年人口达 0.16 亿人,地区生产总值为 1.76 万亿元。

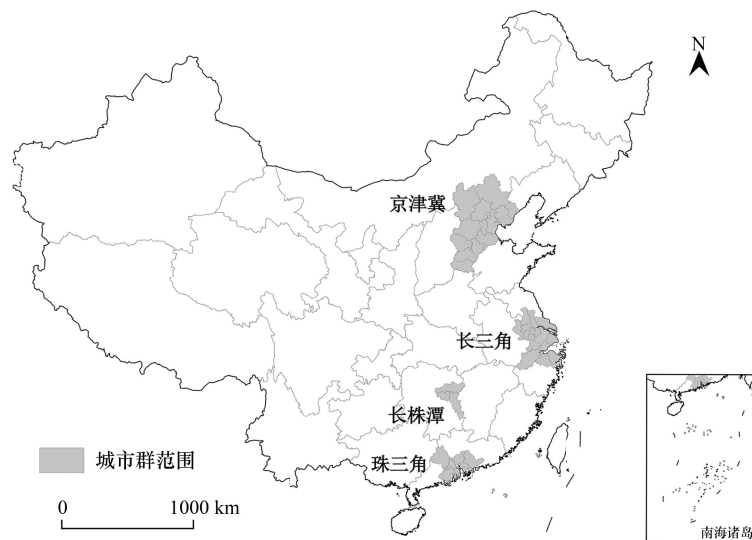


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the study area

### 1.2 数据来源与预处理

以地表温度数据作为主要数据源来量化城市群热环境,该数据来源于中国陆域及周边逐日 1 km 全天候地表温度数据集<sup>[23]</sup>。数据集以 Aqua MODIS LST 作为主要输入数据,并同时结合植被指数、地表反照率等,基于卫星热红外遥感-再分析数据集成方法构建了全天候地表温度数据。该数据集空间无缝、图像质量良好。以当前学术界广泛采用的逐日 1 km Aqua MODIS LST 产品为参考,该数据集的平均偏差(MBE)为 0.08  $^{\circ}\text{C}$  至 0.16  $^{\circ}\text{C}$ ,具有较高的精度,适用于较大范围的热环境研究与分析。基于该数据集,提取 2000—2020 年逐年 6 月 1 日—9 月 30 日之间日间温度数据的均值,用于城市群夏季热环境时空演变规律分析,像元分辨率均统一在 1 km 尺度。

本研究以城市群不透水地表占比表征城市群发展程度。数据来源于全球人造不透水面数据(Global Artificial Impervious Area-GAIA),用于计算各城市群逐年的不透水面占比。该数据以长时间序列 Landsat 影像

为主要数据源,辅以夜间灯光数据等,通过空间掩膜和特征评价,实现了逐年不透水地表的快速提取与制图<sup>[24]</sup>。数据的空间分辨为 30m,平均总体精度超过 90%。本研究基于该数据集,逐年提取 2000—2020 年各城市群不透水面并计算其占比,用于表征各城市群发展程度的时间变化。

基于城市边界数据(Global Urban Boundary-GUB)提取各城市群城区范围<sup>[25]</sup>。该数据集以 GAIA 为基础数据,划定了全球所有面积超过 1 平方公里的逐五年城市边界。以该数据集为基础,提取各城市群城区范围。为保证数据在时序上具备可比性,本研究以 2020 年 GUB 城市边界数据来提取各城市群研究时段内的城区范围,用于后续计算各城区间温度变异系数。

基于 NDVI 数据来分析各城市群植被的变化。数据来源于 MOD13A3,其中包含 1km 分辨率的全球月度 NDVI 数据,该数据基于 16d 的合成算法生成。基于 Google Earth Engine 平台,计算每年夏季最大植被指数。即比较每年 6—8 月位于影像相同位置的 NDVI 像元,选择该位置 NDVI 的最大值作为该像元的值。最终获得逐年的夏季最大植被指数,用于 2000—2020 年植被变化的趋势分析,该分析基于 MK 趋势检验完成。此外,研究使用的 DEM 数据来自资源环境科学与数据中心平台发布的中国海拔高度(DEM)空间分布数据,该数据集参考了最新的 SRTM V4.1 数据,并通过重采样方法得到<sup>[26]</sup>。

1.3 城市群区域热岛提取方法

提取的区域热岛是指相对城市群平均温度高于 10% 的范围<sup>[27–28]</sup>。为减小逐年气候变化的影响,以研究时段内城市群的平均温度作为参考值,分别计算逐年、逐像元相对温度,并利用如下公式提取区域热岛范围:

$$\frac{LST_{ij} - LST_a}{LST_a} > 10\% \tag{1}$$

式中,  $LST_{ij}$  为研究区域内第  $i$  个像元在第  $j$  年的地表温度值,  $LST_a$  为各城市群在研究时段(2000—2020 年)的平均温度。

1.4 城市群区域热岛格局量化方法

在提取区域热岛的基础上,参考景观生态学分析方法,探究了区域热岛景观格局时空变化规律。所考虑景观格局指标包括:区域热岛面积占比、平均斑块面积、最大斑块指数、面积加权平均形状指数和斑块平均最近距离(表 1)。

表 1 区域热岛景观格局量化指标

Table 1 Landscape metrics used in this study to quantify the pattern of regional heat islands

| 景观格局指标类型<br>Landscape metrics types | 景观格局指标<br>Landscape metrics | 计算公式<br>Computing equation                                                                                   |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 组成<br>Composition                   | 区域热岛面积占比                    | $\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{A} \times 100$                                                                      |
|                                     | 平均斑块面积                      | $\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}$                                                                                 |
| 配置<br>Configuration                 | 最大斑块指数                      | $\frac{\max a_i}{A} \times 100$                                                                              |
|                                     | 面积加权平均形状指数                  | $\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{0.25 \times P_i}{\sqrt{a_i}} \right) \right] \left( \frac{a_i}{A} \right)$ |
|                                     | 斑块平均最近距离                    | $\frac{\sum_{i=1}^n l_{ij}}{n}$                                                                              |

式中,  $a_i$  为逐年各城市群第  $i$  个区域热岛斑块的面积,  $n$  为逐年各城市群热岛斑块的数量,  $P_i$  为第  $i$  个热岛斑块的周长,  $A$  为各城市群行政全域的总面积,  $l_{ij}$  为逐年任一热岛斑块  $i$  到斑块  $j$  之间的最短距离。

研究借鉴景观生态学测度连通性的方法,分析 2000—2020 年城市群内热岛斑块连通性的动态变化。景观连通性是指景观促进或阻碍生态流的程度,目前常用的表征指标有:整体连通性指数(Integral Index of

Connectivity, IIC)、可能连通性指数(Probability of Connectivity,  $PC$ )<sup>[29]</sup>。利用 IIC、 $PC$  度量城市群热岛斑块景观连通度水平及其时间变化。利用 Conefor sensinode 2.6 软件,根据研究区域的大小以及热岛斑块的分布情况,以 3000m 作为距离阈值,设定连通概率为 0.5。IIC 和  $PC$  的具体计算公式如下:

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \times a_j}{1 + n l_{ij}}}{A_L^2} \quad (2)$$

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (3)$$

式中,  $n$  为研究区域中斑块总数;  $nl_{ij}$  为斑块  $i$  和斑块  $j$  之间存在的最少链接节点数,如果斑块之间不存在连接,则  $nl_{ij} = \infty$ ;  $p_{ij}^*$  为斑块  $i$  和斑块  $j$  之间各个扩散途径的最大概率值;  $a_i$  和  $a_j$  为斑块  $i$  和斑块  $j$  的属性值,这里取值为斑块面积;  $A_L$  为研究区域的总属性值,这里取值为城市群行政全域总面积。

基于所提取的城区范围,利用变异系数来量化城市群内各城区之间温度相似性水平。在提取城市群各城区的平均温度时,为排除海拔、植被变化所带来的干扰,研究仅提取同时满足位于各城区平均海拔  $\pm 50m$  内<sup>[30]</sup>、2000—2020 年间 NDVI 变化率小于  $\pm 0.005$  的范围<sup>[31]</sup>。变异系数是测度数据离散程度的相对统计量,主要用于比较不同样本数据的离散程度<sup>[32]</sup>。变异系数大,说明数据的离散程度也大,其计算公式如下所示:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

其中,  $\sigma$  为各城区间温度的标准差,  $\mu$  为各城区间温度的均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 2000—2020 年城市群不透水面演变特征

2000—2020 年各城市群的不透水面占比迅速上升,城市群迅速扩张(图 2)。长三角城市群不透水面占比最高、增速最快,其不透水面占比从 2000 年的 7.14% 增长到 2020 年的 25.33%。珠三角城市群不透水地表增速其次,其不透水面占比从 2000 年的 6.43% 增长到 2020 年的 15.97%。京津冀城市群不透水面的增长相对较慢,从 2000 年的 5.62% 增长到 2020 年的 12.99%。长株潭城市群的不透水面虽然占比较低,但增长率较快,2000—2020 年其不透水面占比扩大了 5.2 倍。

从空间分布来看,长三角城市群不透水面扩张以各城市同步蔓延扩张为主。2000 年,长三角城市群的不透水面主要集中于上海市,到 2020 年,多个地市的不透水面跨越了行政边界,与周边地级市的不透水面相连,从而形成在空间上覆盖多个地市的不透水面连片区(图 3)。长株潭城市群扩张方式与此类似,三个城市的扩张导致城市群不透水面逐渐连接成片。京津冀城市群、珠三角城市群以核心城市的快速扩张为主。2000 年京津冀城市群的不透水面主要位于北京、天津以及各地市的城镇地区,到 2020 年,京津冀城市群仅北京和天津的不透水面占比较高,其余城市仍较低。珠三角城市群在 2000 年其不透水面主要分布于广州、佛山、深圳、东莞和中山市,到 2020 年仍呈现类似的分布格局,这五个城市间不透水面逐渐跨越行政边界、形成连片区(图 3)。

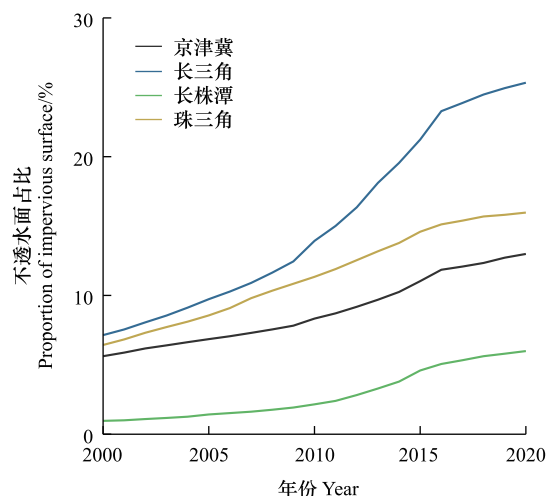


图 2 2000—2020 年各城市群不透水面占比变化

Fig.2 The proportion of impervious surface in urban agglomerations from 2000 to 2020

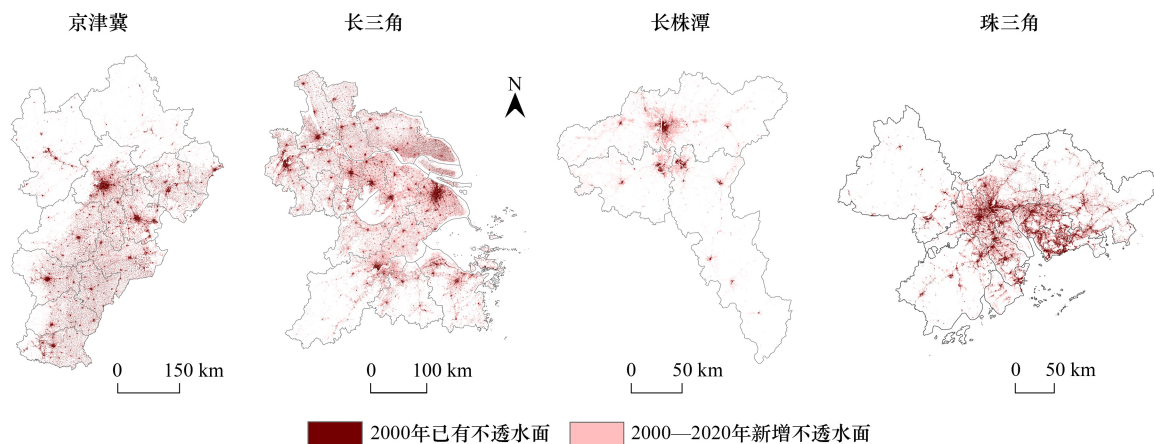


图3 2000—2020年各城市群不透水面空间分布

Fig.3 Spatial pattern of impervious surface in urban agglomerations from 2000 to 2020

## 2.2 2000—2020年城市群区域热岛景观格局演变特征

### 2.2.1 区域热岛景观特征时空变化

2000—2020年,各城市群热岛斑块面积占比均呈显著上升趋势( $P < 0.05$ ) (图4)。京津冀城市群热岛斑块面积占比最大,且增速最快。2000—2020年京津冀城市群区域热岛面积占比从10%显著增加至32%,增加的热岛区域主要分布于北京、天津等城市区域和京津冀城市群东南部耕地区域(图5)。长三角、珠三角城市群增速其次,2000—2020年热岛斑块面积占比基本增加了一倍(图4,图5)。

2000—2020年,各城市群区域热岛斑块景观格局发生显著变化( $P < 0.05$ ),主要呈现平均斑块面积增加、最大斑块指数增加、形状越加复杂的变化趋势(图6)。各城市群区域热岛的平均斑块面积逐年增加,2000—2020年,京津冀城市群区域热岛平均斑块面积从2075增加至11988,增加近五倍,其余城市群平均斑块面积扩张约为两倍。区域热岛斑块的最大斑块指数逐年增

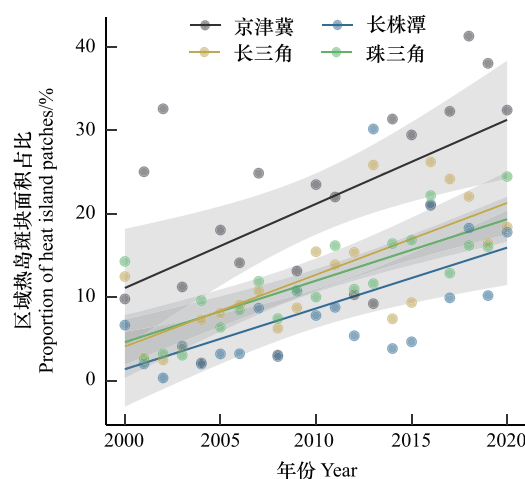


图4 2000—2020年各城市群区域热岛斑块面积占比变化

Fig.4 The change of heat island patch area proportion during 2000—2020

图中灰色阴影代表95%置信区间

加,尤其京津冀、珠三角城市群最大斑块指数逐年显著增加、增速最快,即城市群范围内最大的热岛斑块面积持续增加。各城市群面积加权形状指数逐年增加,其中京津冀、珠三角城市群面积加权平均形状指数增速最为明显,而长株潭城市群面积加权形状指数呈现上升趋势但不显著( $P > 0.05$ )。各城市群区域热岛斑块最近距离逐年显著变化,但变化趋势存在较大差异。珠三角、京津冀城市群斑块平均最近距离逐年下降,而长株潭、长三角城市群斑块平均最近距离逐年上升(图6)。

### 2.2.2 区域热岛景观连通性

2000—2020年,各城市群区域热岛景观连通性逐年增加,区域热岛斑块的整体连通性指数、可能连通性指数均呈显著增加趋势,表现为原本相对孤立的热岛斑块逐渐连通,过渡到区域热岛连片区(图7)。京津冀城市群区域热岛的IIC从2000年的5039增加到2020年的62557,增加了6.66倍,为四个城市群中增加最多。长三角城市群热岛斑块的IIC增长其次,增加了6.62倍。与此类似,四大城市群区域热岛斑块的可能连通性

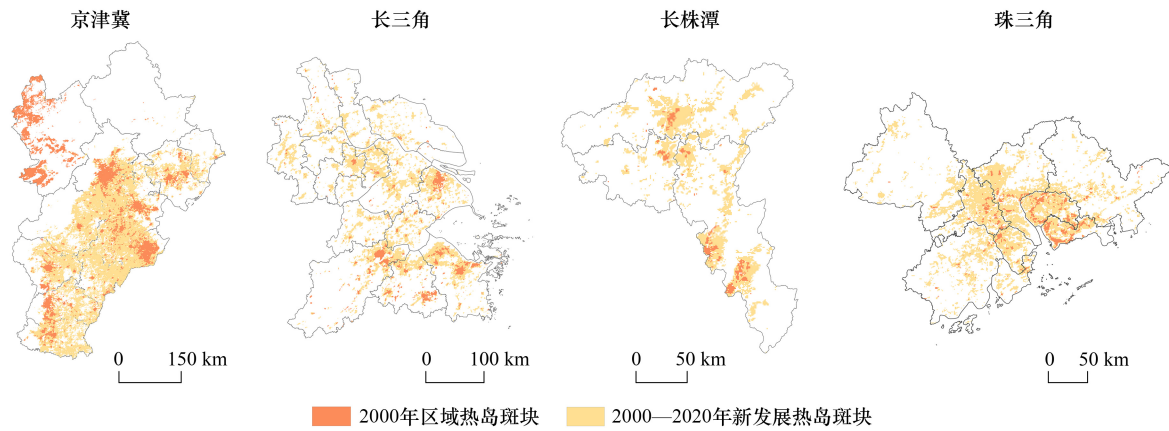


图5 各城市群区域热岛斑块变化空间格局

Fig.5 Spatial pattern of regional heat island patch changes across urban agglomerations

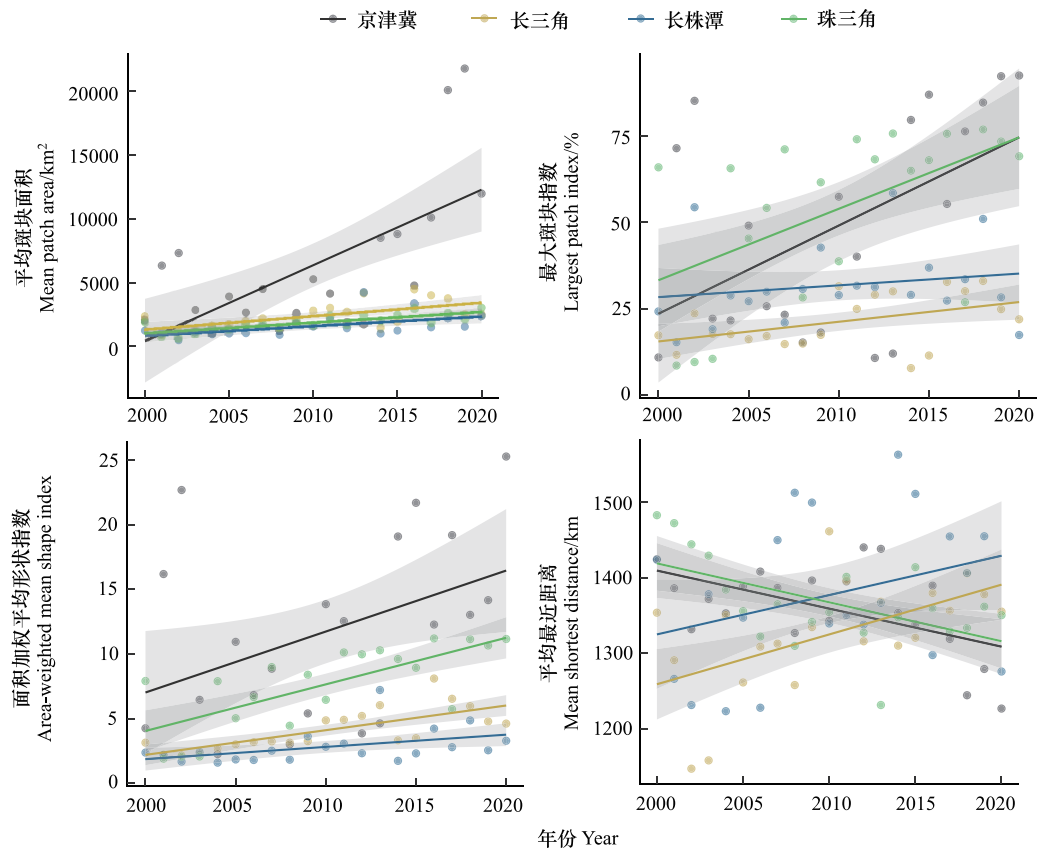


图6 2000—2020年各城市群区域热岛景观格局指数变化

Fig.6 Changes of landscape pattern index in the regional heat islands during 2000—2020

图中灰色阴影代表95%置信区间

指数  $PC$  也显著增大,其中增长率最高的为长三角城市群, $PC$  在 2000—2020 年增加了 7.22 倍。其次为京津冀城市群, $PC$  从 2000 年的 5468 增长到 2020 年的 66874,增加了 4.96 倍。长株潭城市群  $PC$  的增长率同样是四个城市群中最低的,仅为 3.79。

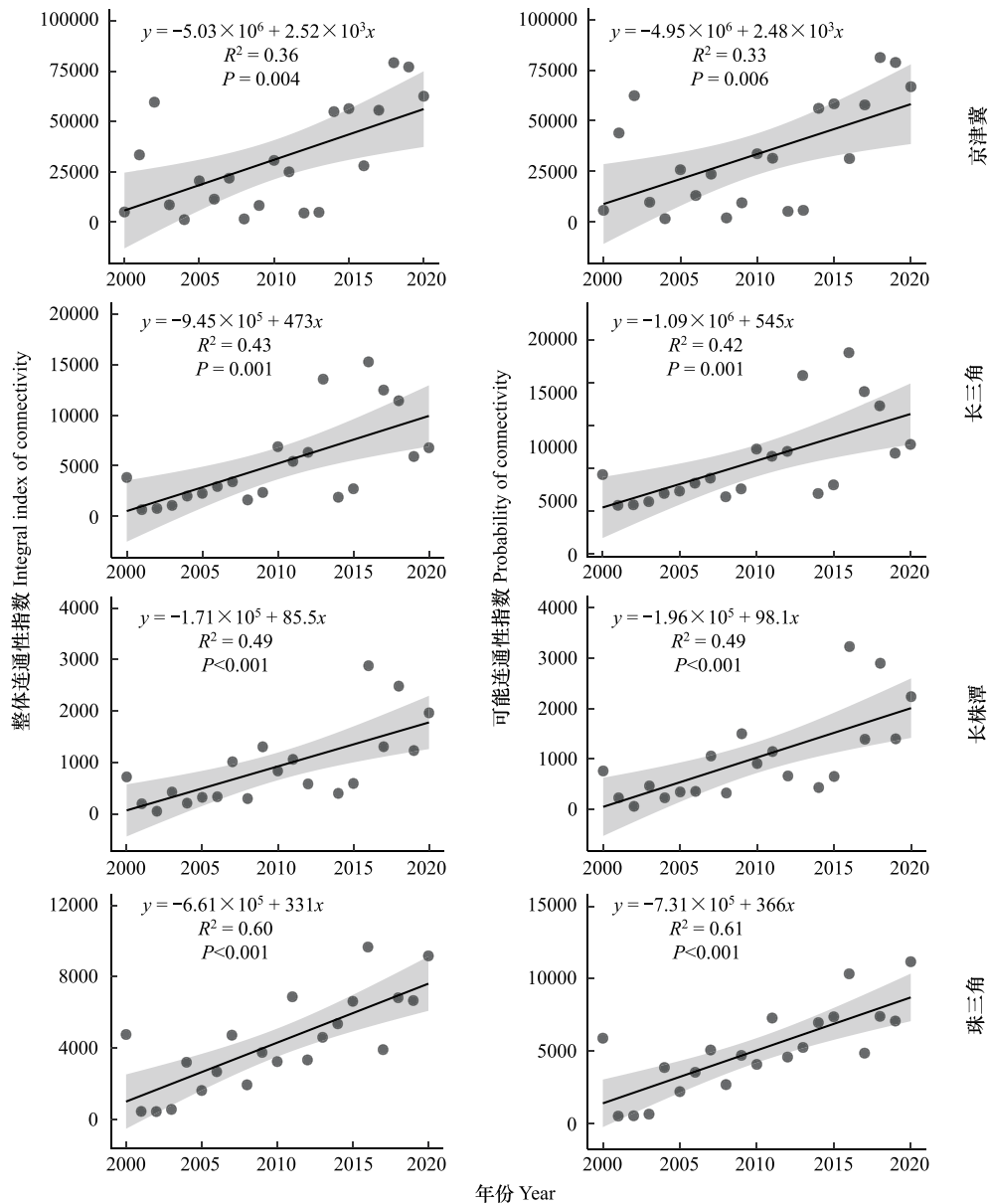


图7 2000—2020年间各城市群区域热岛斑块连通性指数变化

Fig.7 Changes of regional heat island patches connectivity index during 2000—2020

图中灰色阴影代表 95%置信区间

### 2.3 区域热岛空间格局特征与城市群发展的关系

2000—2020年随着城市群发展,各城市群的区域热岛斑块连通性水平线性增加( $P < 0.05$ ) (图8)。珠三角城市群不透水面占比与连通性水平拟合优度最高,其增加对IIC增加、PC增加的解釋程度分别为60%、61%。其次为长株潭城市群、长三角城市群,城市群不透水面占比对区域热岛斑块连通性水平的增加的解釋程度约为50% (图8)。

2000—2020年各城市群快速发展,长三角城市群、长株潭城市群各城市间温度的变异系数呈非线性下降趋势( $P < 0.05$ ),各城市间温度的相似性水平逐渐增加 (图9)。随长三角城市群不透水面扩张,区域热岛斑块连通性水平迅速增加 (图8),进而导致各城市间温度相似性水平增加,温度变异系数呈现为幂函数下降的趋势 (图9)。当城市群不透水面占比较低时,长三角城市群各城市间温度的变异系数随城市群不透水面增加而迅速下降,当城市群不透水面占比达到20%时,各城市间温度的变异系数保持0.04上下波动变化。与此类

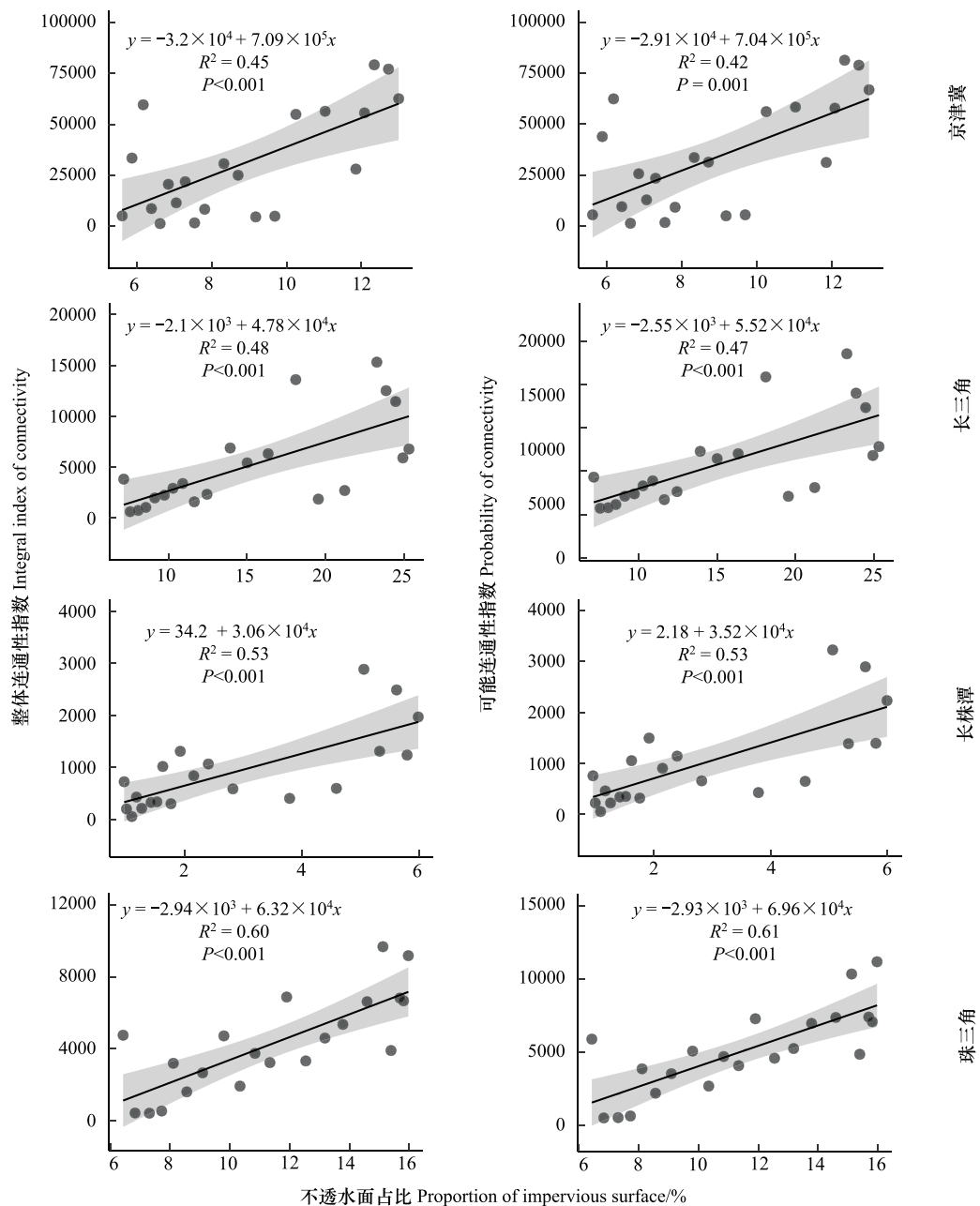


图 8 2000—2020 年各城市群热岛斑块连通度指数与不透水面占比的关系

Fig.8 The relationship between the connectivity index of heat island patches and the proportion of impervious surface from 2000 to 2020

图中灰色阴影代表 95% 置信区间

似,长株潭城市群各城市间温度变异系数也呈现幂函数下降趋势,存在变化拐点(图 9)。当城市群不透水面占比达到约 4% 时,温度的变异系数保持在 0.015 上下波动,各城市间温度相似性稳定在较高水平。与长三角城市群、长株潭城市群不同的是,随城市群发展,京津冀城市群、珠三角城市群各城市间温度变异系数呈波动上升的变化趋势,但变化率很小,且都不显著( $P > 0.05$ )(图 9)。

### 3 讨论

#### 3.1 城市群区域热岛景观演变规律

2000—2020 年,四个城市群均快速发展,城市群区域热岛景观格局显著变化,区域热岛面积显著增加。

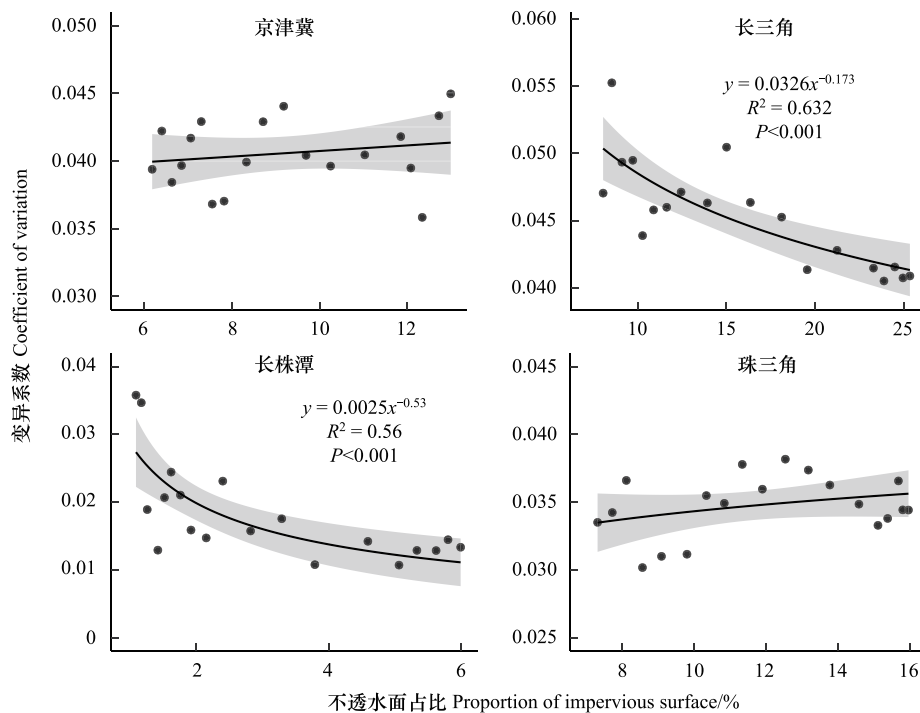


图9 2000—2020年各城市群温度变异系数与不透水占比的关系

Fig.9 The relationship between the coefficient of variation in temperature and the proportion of impervious surface from 2000 to 2020

图中灰色阴影代表 95% 置信区间

本研究以高于城市群多年平均温度 10% 为阈值提取了热岛区域, 研究结果显示, 各城市群区域热岛面积占比均呈现显著上升趋势。2000—2020 年间, 各城市群不透水地表持续扩张, 相对于植被和水体, 不透水地表的蒸散发能力下降、储热能力上升<sup>[33]</sup>, 地表温度明显上升。这与已有研究结果类似, 以往研究普遍发现武汉、北京、上海等城市、长三角城市群、珠三角城市群等区域的热岛强度、热岛面积均随城市发展、城市群扩张呈显著上升趋势<sup>[34—36]</sup>。

各城市群区域热岛景观格局特征演变规律在城市群之间存在一定差异。四个城市群由于气候本底特征和发展模式不同<sup>[37]</sup>, 区域热岛斑块扩张类型也呈现出不同的规律: 各城市群热岛斑块的平均斑块面积、最大斑块指数均呈现增加趋势, 即热岛斑块面积持续增加, 但是珠三角城市群、京津冀城市群热岛斑块平均最近距离呈现下降趋势, 而长三角城市群、长株潭城市群热岛斑块平均最近距离呈上升趋势。类似于城市/城市群扩张模式<sup>[38]</sup>, 本研究发现城市群区域热岛景观存在两种典型的扩张类型: 单中心扩张增长、多中心扩张增长(图 10)。单中心扩张增长是指以单个或少数热岛斑块为基础, 随城市群发展, 原有热岛斑块逐渐蔓延扩张, 面积逐渐增加, 并与相邻热岛斑块逐渐连通。京津冀城市群区域热岛景观演变规律符合此扩张类型, 以 2000 年热岛斑块为基础, 2000—2020 年间热岛斑块面积不断扩增而距离缩减(图 5), 因此呈现热岛斑块平均斑块面积、最大斑块指数持续增加, 而热岛斑块平均最近距离不断减小的变化规律(图 6)。多中心扩张增长是指以多个热岛斑块为基础, 随城市群发展, 原有热岛斑块面积逐渐增加并不断连接, 同时, 周围不断涌现新的热岛斑块。长三角城市群区域热岛景观演变规律符合此扩张类型。以 2000 年热岛斑块为基础, 2000—2020 年间, 一方面, 多个热岛斑块彼此连接成面积更大的斑块, 另一方面, 城市周边不断出现新的热岛斑块(图 5), 使得最大斑块面积缓慢增加的同时斑块平均最近距离也呈增加趋势(图 6)。同一城市群区域热岛景观演变类型是否在不同发展阶段存在差异? 不同城市群区域热岛景观演变类型对区域环境的影响是否相同? 这些问题的解答将有助于深入认识城市群发展对区域热环境的影响, 未来研究仍需进一步探索。

随城市群发展, 各城市群内区域热岛斑块连通性水平显著增加。这与已有研究结果类似, 如珠三角城市

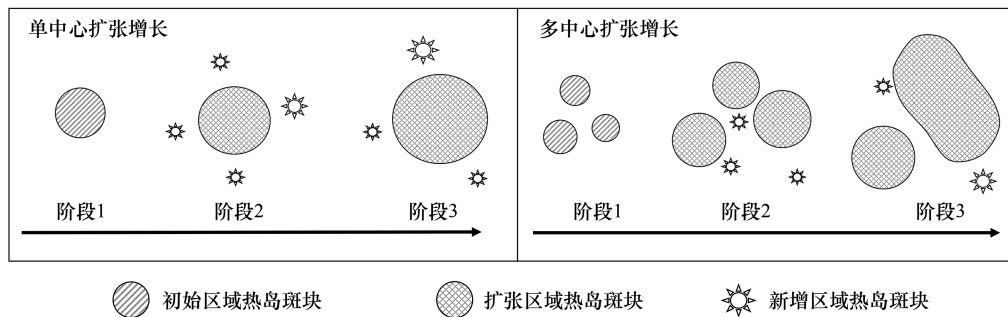


图 10 城市群区域热岛变化类型

Fig.10 The classification of variation types in regional heat islands

群发展背景下孤立的都市热岛逐渐连接成为区域热岛<sup>[10]</sup>。这可能会导致热量在不同热岛斑块间变得更易扩散、流动<sup>[39]</sup>,从这个角度看,我国区域热环境问题的治理面临着巨大挑战。Yu 等<sup>[40]</sup>通过结合形态空间模式分析(MSPA)和电路理论方法,构建城市热岛网络以识别重要的城市热岛斑块及廊道,提出通过打破该网络以缓解城市热环境问题。在城市群尺度,可以借鉴该方法,识别区域热岛景观重要的斑块及廊道,提出城市群热环境优先改善区域。各城市群需要实施系列区域一体化措施,促进多个区域之间的合作,以解决城市群内大范围区域热岛聚集的问题,如限制城市土地的扩张,防止模糊城乡边界<sup>[41]</sup>,构建分散的、多核的城市群网络空间结构<sup>[42]</sup>。另一方面,各区域可以通过增加城市植被覆盖度,采用高反照率建筑材料,改善城市 and 区域通风来缓解区域热环境问题<sup>[43]</sup>。此外,保护现有生态用地(尤其是林地)尤为重要,已有研究指出新增的生态用地所提供的降温效应要低于被破坏的生态用地所损失的降温效应<sup>[10]</sup>。本研究提取的城市群区域热岛斑块中,不仅包括因城市群发展和不透水面积扩张而导致的斑块面积扩增,京津冀城市群的热岛斑块还涵盖了部分耕地区域。耕地相对林地有较低的潜热通量和储热能力,是导致其白天增温效应的主要原因<sup>[44]</sup>。一定程度上导致了京津冀城市群相比较于其他城市群具有更高的区域热岛面积占比。本研究暂未讨论农田发展对区域热环境的影响,未来需要进一步探究。

需要说明的是,尽管长三角城市群、长株潭城市群区域热岛斑块平均最近距离持续增加(图 6),但城市群内热岛斑块的平均斑块面积的变化对连通性指数的影响更大(图 11),其增大导致热岛斑块连通性逐渐提升。

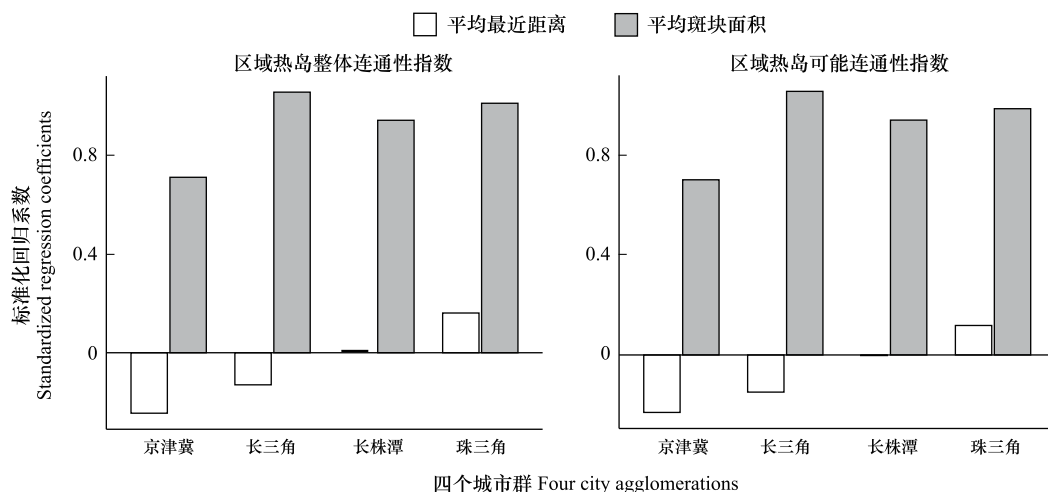


图 11 斑块平均面积、平均最近距离对区域热岛连通性指数影响的相对重要性

Fig.11 The relative importance of mean patch size and mean nearest distance on regional heat island connectivity index

### 3.2 城市群对热环境影响的规模效应

研究结果表明随着城市群发展,长三角、长株潭城市群内各城市之间温度相似性水平显著变化,并存在规模效应。各城市间温度变异系数随城市群发展呈幂函数下降趋势。随城市群不透水面增加,变异系数起初快速下降,即各城市之间温度相似性水平快速上升,当城市群不透水地表占比分别达到 20%、4%时,其下降趋势趋于平稳,表明此时各城市温度相似性水平高且保持相对稳定变化。长三角城市群发展快速,多个核心城市不断扩张,导致其不透水面跨越了行政边界<sup>[45]</sup>,使得热岛斑块在不同城市之间逐渐连通。进一步导致热量在不同城市间流动、扩散<sup>[39]</sup>,使各城市间的温度的差异呈现减小的趋势。当城市群扩张到一定程度时,如不透水地表占比达到 20%时,虽然区域热岛依然呈变化趋势,但各城市已演变为一个集群,各城市间温度的相似性保持在较高水平稳定变化。与之类似,本研究认为长株潭城市群的长沙、株洲和湘潭三个城市的城区距离较近,在 2000—2020 年间这三个城区快速扩张,形成城市集群,导致长株潭城市群各城市间的温度越来越相似。

本研究并未在京津冀城市群、珠三角城市群发现该规模效应。这与城市群发展类型有关,京津冀城市群、珠三角城市群区域热岛以单个或少数斑块扩张增长为主,各城市并未形成一个集群,甚至温度差异依旧呈波动上升趋势(图 9)。这两个城市群的区域热岛变化为单中心扩张增长型,尽管随城市群发展热岛斑块逐渐连通,但其扩张仍集中于某一个或某几个斑块,并未导致各城市之间温度差异减小,如珠三角城市群区域热岛扩张主要集中于城市群中部的五个城市。本研究进一步在这两个城市群中选择了部分核心城市来探究温度变异系数的变化情况(图 12)。珠三角城市群选择深圳、广州、东莞、佛山和中山这五个相邻的城市<sup>[46]</sup>,京津冀城市群选择北京、天津、廊坊和唐山这四个相邻的城市<sup>[47]</sup>。结果显示,珠三角城市群核心城市间温度的变异系数呈现幂函数非线性下降趋势( $P < 0.05$ ),而京津冀城市群核心城市间温度的变异系数呈波动上升趋势( $P > 0.05$ )。这也就意味着,珠三角核心城市间温度的变异程度在 2000—2020 年间显著减小,各城区温度的差异越来越小,呈现作为一个集群发展的态势。相反,京津冀城市群核心城市间温度的变异系数在 2000—2020 年间依旧呈现增大的趋势,各城区间温度的差异越来越大、温度未呈现作为集群而变化的趋势,即使相邻的四个核心城市,其温度差异性依旧增加(图 12)。

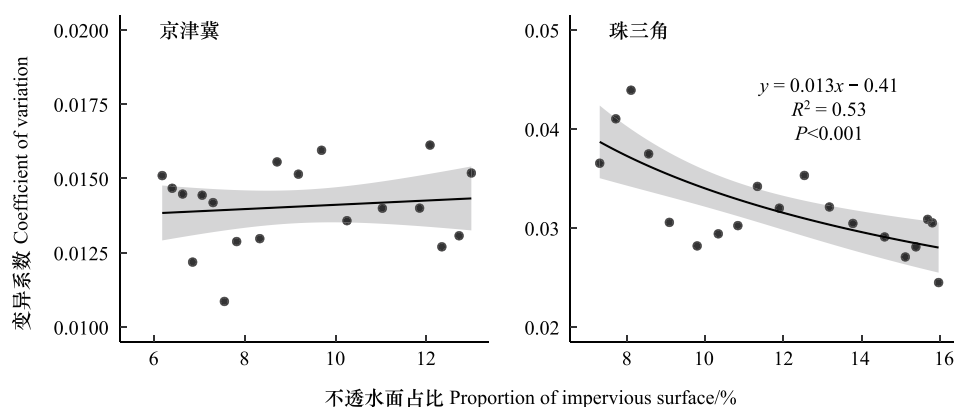


图 12 2000—2020 年珠三角和京津冀核心城市间温度变异系数变化

Fig.12 The change of coefficient of variation in temperature between core cities from 2000 to 2020

图中灰色阴影代表 95% 置信区间

研究尽量保证了研究数据和分析方法的可靠性,但仍有部分不确定性亟需进一步探究:(1)研究基于逐日的地表温度数据计算四个城市群夏季平均温度,但由于地表温度数据可能受到传感器精度、云层遮挡等因素影响,该逐日数据集经处理尽管精度较高,但数据准确度仍存在误差。此外,在区域热岛阈值计算过程中,研究选择比 2000—2020 年夏季平均温度高 10% 的值作为阈值,但京津冀城市群平均温度相对更低,阈值和均温的  $\Delta T$  也更低,这也在一定程度上造成京津冀城市群筛选出的区域热岛面积更大。在未来的研究中,将参

考已有研究,选择多个阈值提取不同强度热岛斑块,进一步分析不同强度热岛斑块连通性水平随城市群发展的变化规律。(2)研究试图以不透水地表占比作为城市群发展程度的参考指标,探究城市群发展对区域热环境影响的规模效应。研究仅基于长三角、长株潭城市群的分析发现了城市群发展对区域热环境影响的规模效应。未来将增加更多城市群样本,进一步验证城市群发展对区域热环境影响的规模效应。

#### 4 结论

(1)2000—2020 年间,随着城市群快速发展、不透水面扩张连片,各城市群的区域热岛面积显著增加。

(2)2000—2020 年间,各城市群区域热岛空间格局显著变化,京津冀城市群、珠三角城市群热岛景观呈单中心扩张增长,热岛斑块平均斑块面积、最大斑块指数、面积加权平均形状指数增加、平均最近距离减小,区域热岛逐渐呈现面积大且形状不规则的斑块聚集分布;长三角、长株潭城市群区域热岛变化规律呈多中心扩张增长,热岛斑块平均斑块面积、最大斑块指数、面积加权平均形状指数增加、但平均最近距离增加,区域热岛呈现为面积大且形状不规则的斑块分布,且新的热岛斑块不断涌现。

(3)随着城市群发展,区域热岛斑块连通性水平显著上升。城市群发展对各城区温度相似性水平的影响在长三角、长株潭城市群存在规模效应,随不透水面扩增,长三角、长株潭城市群各城市间温度变异系数呈幂函数下降趋势,当不透水面占比分别高于 20%、4%时,各城市温度相似性水平较高且相对稳定变化。

#### 参考文献(References):

- [1] Mahtta R, Fragkias M, Güneralp B, Mahendra A, Reba M, Wentz E A, Seto K C. Urban land expansion: the role of population and economic growth for 300+ cities. *NPJ Urban Sustainability*, 2022, 2(1): 5.
- [2] 彭少麟,周凯,叶有华,粟娟.城市热岛效应研究进展. *生态环境*, 2005, 14(4): 574-579.
- [3] Li X C, Zhou Y Y, Asrar G R, Mao J F, Li X M, Li W Y. Response of vegetation phenology to urbanization in the conterminous United States. *Global Change Biology*, 2017, 23(7): 2818-2830.
- [4] Sedaghat A, Sharif M. Mitigation of the impacts of heat islands on energy consumption in buildings: a case study of the city of Tehran, Iran. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 76: 103435.
- [5] Bai L, Ding G Q, Gu S H, Bi P, Su B D, Qin D H, Xu G Z, Liu Q Y. The effects of summer temperature and heat waves on heat-related illness in a coastal city of China, 2011-2013. *Environmental Research*, 2014, 132: 212-219.
- [6] 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. *环境科学*, 2021, 42(10): 5037-5045.
- [7] Georgescu M, Morefield P E, Bierwagen B G, Weaver C P. Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2909-2914.
- [8] Liang L W, Wang Z B, Li J X. The effect of urbanization on environmental pollution in rapidly developing urban agglomerations. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117649.
- [9] Zhou W Q, Yu W J, Qian Y G, Han L J, Pickett S T A, Wang J, Li W F, Ouyang Z Y. Beyond city expansion: multi-scale environmental impacts of urban megaregion formation in China. *National Science Review*, 2021, 9(1): nwab107.
- [10] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, Wang X R, Vejre H. Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution. *Forest Ecology and Management*, 2019, 446: 214-225.
- [11] 饶胜,张惠远,金陶陶,窦浩洋.基于 MODIS 的珠江三角洲地区区域热岛的分布特征. *地理研究*, 2010, 29(1): 127-136.
- [12] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, Wang X R, Vejre H. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995-2015) of Southern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 242-254.
- [13] Zhou D C, Bonafoni S, Zhang L X, Wang R H. Remote sensing of the urban heat island effect in a highly populated urban agglomeration area in East China. *Science of the Total Environment*, 2018, 628-629: 415-429.
- [14] Zhou D C, Li D, Sun G, Zhang L X, Liu Y Q, Hao L. Contrasting effects of urbanization and agriculture on surface temperature in Eastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(16): 9597-9606.
- [15] Chen Y, Xie M M, Chen B, Wang H H, Teng Y L. Surface regional heat (cool) island effect and its diurnal differences in arid and semiarid resource-based urban agglomerations. *Chinese Geographical Science*, 2023, 33(1): 131-143.
- [16] Liu Y H, Fang X Y, Xu Y M, Zhang S, Luan Q Z. Assessment of surface urban heat island across China's three main urban agglomerations. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 133(1): 473-488.
- [17] Wu W B, Yu Z W, Ma J, Zhao B. Quantifying the influence of 2D and 3D urban morphology on the thermal environment across climatic zones. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 226: 104499.
- [18] Xiang Y, Huang C B, Huang X, Zhou Z X, Wang X S. Seasonal variations of the dominant factors for spatial heterogeneity and time inconsistency of land surface temperature in an urban agglomeration of central China. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103285.

- [19] Xu H C, Li C L, Wang H, Zhou R, Liu M, Hu Y M. Long-term spatiotemporal patterns and evolution of regional heat islands in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Remote Sensing*, 2022, 14(10): 2478.
- [20] Li Y L, Qiao X N, Wang Y, Liu L. Spatiotemporal patterns and influencing factors of remotely sensed regional heat islands from 2001 to 2020 in Zhengzhou Metropolitan area. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111026.
- [21] Zhou B, Rybski D, Kropp J P. The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4791.
- [22] Cao J, Zhou W Q, Yu W J, Hu X F, Yu M, Wang J, Wang J. Urban expansion weakens the contribution of local land cover to urban warming. *Urban Climate*, 2022, 45: 101285.
- [23] Zhang X D, Ding L R, Zhou J, Tang W B, Zhang X, Ma J. Daily 1-km all-weather land surface temperature dataset for the Chinese landmass and its surrounding areas (TRIMS LST; 2000-2022). 2023.
- [24] Gong P, Li X C, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Liu X P, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.
- [25] Li X C, Gong P, Zhou Y, Wang J, Bai Y, Chen B, Hu T, Xiao Y, Xu B, Yang J. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094044.
- [26] Jing C W, Shortridge A, Lin S P, Wu J P. Comparison and validation of SRTM and ASTER GDEM for a subtropical landscape in Southeastern China. *International Journal of Digital Earth*, 2014, 7(12): 969-992.
- [27] Yang Z W, Chen Y B, Qian Q L, Wu Z F, Zheng Z H, Huang Q Y. The coupling relationship between construction land expansion and high-temperature area expansion in China's three major urban agglomerations. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 40(17): 6680-6699.
- [28] 陈康林, 龚建周, 陈晓越. 广州市热岛强度的空间格局及其分异特征. *生态学报*, 2017, 36(3): 792-799.
- [29] Peng J, Hu Y X, Dong J Q, Liu Q Y, Liu Y X. Quantifying spatial morphology and connectivity of urban heat islands in a megacity: a radius approach. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136792.
- [30] Li L, Zhan W F, Hu L Q, Chakraborty T C, Wang Z H, Fu P, Wang D Z, Liao W L, Huang F, Fu H Y, Li J F, Liu Z H, Du H L, Wang S S. Divergent urbanization-induced impacts on global surface urban heat island trends since 1980s. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 295: 113650.
- [31] Liu H M, He B J, Gao S H, Zhan Q M, Yang C. Influence of non-urban reference delineation on trend estimate of surface urban heat island intensity: a comparison of seven methods. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 296: 113735.
- [32] Jamei Y, Rajagopalan P, Sun Q C. Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 1335-1351.
- [33] 王煜, 唐力, 朱海涛, 麦有全, 何伟彪, 王伟民, 刘凯, 苏红波. 基于多源遥感数据的城市热环境响应与归因分析——以深圳市为例. *生态学报*, 2021, 41(22): 8771-8782.
- [34] Chen M X, Zhou Y, Hu M G, Zhou Y L. Influence of urban scale and urban expansion on the urban heat island effect in metropolitan areas: case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3491.
- [35] Geng S B, Yang L, Sun Z Y, Wang Z H, Qian J X, Jiang C, Wen M L. Spatiotemporal patterns and driving forces of remotely sensed urban agglomeration heat islands in South China. *Science of the Total Environment*, 2021, 800: 149499.
- [36] Hou L, Yue W Z, Liu X. Spatiotemporal patterns and drivers of summer heat island in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 7516-7527.
- [37] Li Y, Ye H P, Gao X, Sun D Q, Li Z H, Zhang N H, Leng X J, Meng D, Zheng J. Spatiotemporal patterns of urbanization in the three most developed urban agglomerations in China based on continuous nighttime light data (2000-2018). *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2245.
- [38] Fang C, Yu D. Urban agglomeration: an evolving concept of an emerging phenomenon. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 126-136.
- [39] Li Z R, Liu L C, Dong X F, Liu J N. The study of regional thermal environments in urban agglomerations using a new method based on metropolitan areas. *Science of the Total Environment*, 2019, 672: 370-380.
- [40] Yu Z W, Zhang J G, Yang G Y. How to build a heat network to alleviate surface heat island effect? *Sustainable Cities and Society*, 2021, 74(3): 103135.
- [41] Shen Z C, Xu X L, Xu S W, Sun D W. A comparative study of land development patterns and regional thermal environments (RTEs) in typical urban agglomerations of China and America: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and Boswash. *Science of the Total Environment*, 2022, 803: 149735.
- [42] 王芳, 郭梦瑶, 牛方曲. “动-静”结合视角下都市圈多层次空间格局研究——以黄河“几”字弯都市圈为例. *地理科学进展*, 2023, 42(7): 1243-1255.
- [43] 孙宗耀, 孙希华, 徐新良, 黄宇钰, 吴晨, 乔治. 土地利用差异与变化对区域热环境贡献研究——以京津冀城市群为例. *生态环境学报*, 2018, 27(7): 1313-1322.
- [44] Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*, 2018, 9: 679.
- [45] Li W F, Han C M, Li W J, Zhou W Q, Han L J. Multi-scale effects of urban agglomeration on thermal environment: a case of the Yangtze River Delta Megaregion, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136556.
- [46] 王少剑, 高爽, 王宇渠. 基于流空间视角的城市群空间结构研究——以珠三角城市群为例. *地理研究*, 2019, 38(8): 1849-1861.
- [47] 姚永玲, 朱甜. 都市圈多维界定及其空间匹配关系研究——以京津冀地区为例. *城市发展研究*, 2020, 27(7): 113-120.