#### DOI: 10.5846/stxb202109172619

刘婷,欧阳帅,勾蒙蒙,项文化,雷丕锋,李艳兵.基于 MSPA 模型的新型城市热景观连通性分析.生态学报,2023,43(2):615-624. Liu T, Ouyang S, Gou M M, Xiang W H, Lei P F, Li Y B.Analysis connectivity of urban heat island in a new-type urbanization based on MSPA model. Acta Ecologica Sinica,2023,43(2):615-624.

# 基于 MSPA 模型的新型城市热景观连通性分析

刘 婷1,欧阳帅<sup>1,2,\*</sup>,勾蒙蒙<sup>3</sup>,项文化<sup>1,2</sup>,雷丕锋<sup>1,2</sup>,李艳兵<sup>4</sup>

1 中南林业科技大学生命科学与技术学院,长沙 410004

2 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站,会同 438107

3 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所,国家林业和草原局森林生态环境重点实验室,北京 100091

4 株洲云龙示范区管理委员会,株洲 412006

摘要:基于土地利用景观格局对城市热岛效应的影响研究较多,但准确识别对城市热岛效应具有重要影响的关键斑块和节点方面的研究亟待开展。以新型中小城市株洲云龙示范区为例,以城市热岛网络构建为切入点,应用形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)与景观连通性模型识别城市发展进程中核心热景观斑块和关键节点,并分析其时空演变特征。研究结果表明:(1)2007—2018年云龙示范区热岛斑块趋于集中,热岛面积较研究初期有明显增加,从地表温度空间分布上体现为城区与周边农村的温度对比更加鲜明,表明城市化进程中建设用地呈聚集扩散趋势。(2)研究期间热岛核心区占热景观面积比最大,且比例有明显上升趋势。而边缘、支线、孤岛、桥接、环线以及孔隙形态类型面积占比均呈现出不同程度的下降趋势,表明热岛斑块之间聚集程度不断提高。(3)识别出景观连通度重要性值较高的前20热景观斑块,其中前3斑块的重要性值和面积占比较大,属于极重要与重要两个热岛核心斑块重要性等级,值得重点关注与优化。(4)对重要性值高的热岛核心区域可优先采取降温措施,可以打断节点之间连接减缓整个区域的热岛效应。本研究结果对我国中小城市规划和可持续发展具有重要的实践指导意义。

关键词:热岛效应;形态学空间格局;景观连通性;云龙示范区

# Analysis connectivity of urban heat island in a new-type urbanization based on MSPA model

LIU Ting<sup>1</sup>, OUYANG Shuai<sup>1,2,\*</sup>, GOU Mengmeng<sup>3</sup>, XIANG Wenhua<sup>1,2</sup>, LEI Pifeng<sup>1,2</sup>, LI Yanbing<sup>4</sup>

1 Faculty of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Huitong National Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong 438107, China

3 Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

4 Management Committee of Yunlong Demonstration Zone, Zhuzhou City, Zhuzhou 412006, China

Abstract: Many previous studies have concerned with the effects of land use/land cover changes and landscape patterns on the urban heat island. However, accurate identification of key patches and nodes with high contribution to urban heat island need to be urgently studied. Using Yunlong Demonstration Zone of Zhuzhou, a new-type city, as the case study area based on morphological spatial pattern analysis (MSPA) and landscape connectivity model, this study constructed an urban heat island network to identify the spatio-temporal dynamic characteristics of core thermal landscape patches and nodes in process of urban development. The results showed that: (1) from 2007 to 2018, heat island patches tended to be concentrated in

**基金项目:**湖南省科技创新计划湖湘青年英才项目(2021RC3104);湖南省研究生科研创新基金项目(CX20210895);株洲云龙示范区生态廊道专 项规划项目(HNHXZZ-20171109)

收稿日期:2021-09-17; 网络出版日期:2022-09-23

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yangshuai8613@163.com

http://www.ecologica.cn

Yunlong Demonstration Zone, and the area of heat island increased significantly compared with the initial stage of the study. From the spatial distribution of land surface temperature, the contrast between urban area and surrounding countryside was more distinct. (2) During the study period, the area of heat island core class was the largest, and the area proportion showed an obviously rising trend. While the area proportion of edge class, branch class, islet class, bridge class, loop class and perforation class showed a decreasing trend to varying degrees, which was largely related to the increase of aggregation degree between heat island patches. (3) The top 20 thermal landscape patches with higher importance value of landscape connectivity were identified, and the importance value and area of the top 3 patches were relatively large, which should be deserved more attention and optimization. (4) Patch-based cooling measures adopted to avoid the connection between node could effectively alleviate the heat island effects in the whole region. The results of this study have important practical significance for the planning and sustainable development of small and medium-sized cities in China.

Key Words: heat island effect; morphological spatial pattern analysis; landscape connectivity; Yunlong Demonstration Zone

随着全球城市化、工业化进程不断加快,城市迅速扩张导致了土地利用格局发生了深刻改变,进而引发生态系统结构和功能变化,导致了城市热岛效应等一系列生态环境问题<sup>[1-4]</sup>。城郊之间不断增加的温差使热力环流导致的城市大气污染加剧,增加了极端恶劣天气的机率<sup>[5-6]</sup>。另一方面高温对居民的身体健康和日常生活造成了巨大影响<sup>[7-8]</sup>。在此背景下,如何缓解城市热岛以促进社会可持续发展和提高人们生活质量逐渐成为城市生态学、景观生态学、地理学等多学科研究的热点。

由于遥感技术的深入发展,基于土地利用景观格局的城市热岛效应研究得到了广泛应用。多数研究表明 土地利用是决定城市热岛效应的决定因素,其中城市不透水面对地表热环境的贡献最大<sup>[9-10]</sup>,而森林和水体 等蓝绿空间有利于缓解城市热岛效应<sup>[11]</sup>。具体到不同土地类型的景观结构与配置,有研究表明当生态用地 覆盖率超过 70%时,降温效果相对明显<sup>[12]</sup>。还有学者指出位于地表城市热岛区的不透水面斑块形状复杂、密 度高、面积大同时聚集程度也比较高,从而增强局部升温;处于地表城市热汇区的森林斑块也表现出形状复 杂、面积大和聚集程度高的特点,则在区域降温方面发挥了较大的作用<sup>[13]</sup>。然而,目前的城市热岛研究更加 侧重于在整体区域尺度上或者简单的斑块水平上进行统计分析,难以揭示城市热岛区域的热景观格局,由于 忽略了景观网络的作用,相关研究成果难以在实践中有效应用。

近年来,形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)的方法开始被应用于城市热 岛效应研究。MSPA采用数学形态学原理对栅格图像的空间格局进行度量、识别和分割,精确分辨景观类型 与结构,在原理上更强调生态过程和生态网络<sup>[14]</sup>。余兆武等在<sup>[15-16]</sup>对珠江三角洲城市群、中山市和东莞市 的案例研究中,论证了将 MSPA应用于城市热岛研究的可行性。研究指出利用 MSPA 特点能够有效地对城市 热岛网络的结构类型进行分析,在全面了解核心网络斑块间连通性和可达性的基础上,通过针对性地减少关 键斑块之间的联系,可以达到缓解城市热岛效应的作用<sup>[15-16]</sup>。整体连通性指数(Integral Index of Connectivity, IIC)、可能连通笥指数(Probability of Connectivity, PC)等连接度指数的提出则能基于景观图论在 一定程度上更加精准的评价研究区内的景观连接度;同时结合 MSPA 计算得到对维持景观连接度具有重要意 义的斑块和廊道,确定优先优化等级<sup>[14]</sup>。目前已有的少数 MSPA 结合景观连通性分析的城市热岛研究集中 于较大的城市尺度上,但以新型小城镇为对象的研究还未展开。中小城市虽然人口数量和城市规模不大,但 城市数量众多,聚集了庞大的人口、资源、产业、环境等发展要素,城市的扩张必定会引起地表覆被类型的变 化,进而改变城市的热岛格局<sup>[17]</sup>。为了避免盲目扩张,减缓城市建设过程中的负环境效应,对中小城市发展 过程中出现的生态问题亟需加强关注。

株洲云龙示范区作为国家两型社会建设的先行探索者,株洲产业升级引领者同时也是长株潭城市群中的 中小城市,全面了解其行政范围内的热岛空间格局和网络,并制订科学的可持续发展规划,对于全国快速城镇 化区域的发展都具有重要的借鉴意义。基于此,本研究以株洲云龙示范区为研究对象,分析了 2007、2013 和 2018 年城市热岛效应演变特征,通过引入 MSPA 和景观连通性指数,分析城市热岛网络的时空演变特征,进 一步探索影响热岛网络的关键斑块,明晰城市热岛网络中的关键点以针对性地提出缓解城市热岛效应措施。

#### 1 研究区概况与数据处理

#### 1.1 研究区概况

云龙示范区(27°51′53″—28°1′43″ N, 113°7′25″—113°17′9″ E)位于株洲市东北部,总面积约178km<sup>2</sup> (图1)。该区域在株洲与长沙的对接发展中,起着重要的连接作用,同时也是2008年国务院批准的"长株潭 两型社会建设综合配套改革试验区"五大示范区之一,包括云田镇和学林、龙头铺两街道,共23个社区,约16 万人。云龙示范区所处气候类型属于亚热带季风湿润性气候,年平均气温位于17.1℃—18.9℃之间,年平均 降水量1400.6mm,年平均湿度80%。夏季多为南风,冬季多为西北风,多年平均风速2.2m/s<sup>[18]</sup>。自2009年 正式挂牌成立起,株洲云龙示范区就着手推进城镇化建设,区内建成区规模显著增加,城市下垫面变化很大。 因此,云龙示范区可以视为是一个城市化进程中研究景观变化与人类活动影响的典型案例区,对本区域进行 城市热岛研究意义更加重大。



图 1 研究区地理位置 Fig.1 Location of the study area

#### 1.2 数据处理

以研究区城市发展的不同阶段为节点,本研究选取了 2007 年 8 月 8 日、2013 年 7 月 31 日、2018 年 7 月 29 日三个时期夏季云量<5%的 Landsat 影像数据(行编号 41/条带号 123;来源于美国地质调查局 http://glovisusgs.gov/),经辐射定标、大气校正的预处理后反演地表温度(Land Surface Temperature, LST)<sup>[19]</sup>。

采用基于影像的反演算法将热红外波段影像的原始像元亮度值转换成地表地物的真实温度值(Landsat ETM+的第6波段,Landsat OLI/TIRS 的第10波段为热红外波段)。该算法在天气晴朗且区域较小的情况下, 假定大气的影响是一致的,因此对大气影响造成的辐射误差不敏感<sup>[20-21]</sup>。相对于其他反演算法,基于影像的 反演算法经过比辐射率的校正,反演过程较为简便,可操作性较强。本研究的 LST 反演是在 ENVI5.3 中进行 的,其计算公式如下:

$$T_{s} = \frac{T_{B}}{1 + (\lambda \times T_{B}/\rho) \times \ln\varepsilon} - 273.15$$
(1)

*T*<sub>s</sub>为 LST,单位是 C;*T*<sub>B</sub>为热红外波段的亮温;λ 为热红外波段的中心波长(Landsat ETM+第6 波段的中心 波长为 λ=11.438 μm,Landsat OLI/TIRS 第10 波段的中心波长 λ=10.985 μm); $\rho = h \times c/\sigma = 1.438 \times 10^{-2}$  mk (其中,普朗克常数  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  Js,光速  $c = 2.998 \times 10^8$  m/s,玻尔兹曼常数  $\sigma = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K); $\varepsilon$  为地表反 射率,其计算公式为:

$$\varepsilon = 0.004 \times P_v + 0.986 \tag{2}$$

P<sub>v</sub>为植被覆盖度,其计算公式为:

$$P_{v} = \left(\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}}\right)^{2}$$
(3)

其中 NDVI 为归一化差值植被指数(Normalized Difference Vegetation Index),反映土地上的植被密度。NDVI<sub>max</sub> 与 NDVI<sub>min</sub>分别表示区域内最大和最小的 NDVI 值,根据频率统计表,分别选取累积频率为 95%和 5%的 NDVI 作为 NDVI<sub>max</sub>和 NDVI<sub>min</sub><sup>[22]</sup>。NDVI 可根据 Landsat 影像中的红色与近红外波段计算得出,使用的公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$
(4)

 $\rho_{\text{NB}}$ 为近红外波段的反射率, $\rho_{\text{Red}}$ 为红色波段的反射率。

为了更加直观比较不同时期研究区的地表热环境,避免反演结果误差带来的影响,首先对 LST 数值进行标准化处理,通过比较某一栅格标准化 LST 与平均 LST 以及温度标准差之间的数量关系,划分热岛区域和非热岛区域<sup>[23]</sup>。具体划分方法如下:

$$T_s = \frac{T_i - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}$$
(5)

其中 T<sub>s</sub>代表标准化后的地表温度;T<sub>i</sub>为第 i 个像素的实际地表温度值;T<sub>min</sub>为整个研究区地表温度影像中最低 温度值;T<sub>max</sub>为地表温度影像中最高温度值。对标准化后的地表温度值进行等级划分,划分标准如表 1 所 示<sup>[23]</sup>。本研究将高于平均温度的高温区与次高温区合并为热岛区域,作为 MSPA 分析的前景数据,其余温度 等级合并为非热岛区域,作为 MSPA 分析的背景数据。

Table 1         Ranking of land surface temperature (LST) levels						
等级 Grade	划分标准 Division standard	等级 Grade	划分标准 Division standard			
高温区 High temperature zone	$T_s > (a+2std)$	次低温区 Sub-low temperature zone	$(a-2std) \leq T_s < (a-0.5std)$			
次高温区 Sub-high temperature zone	$(a+0.5std) < T_s \leq (a+2std)$	低温区 Low temperature zone	$T_s < (a-2std)$			
常温区 Normal temperature zone	$(a-0.5std) < T_s < (a+0.5std)$					

表1 地表温度划分等级

T<sub>s</sub>:标准化地表温度 standardized land surface temperature; a:平均标准化地表温度 mean standardized land surface temperature; std:标准差 standard deviation

#### 2 研究方法

## 2.1 形态学空间格局分析

MSPA 是基于数学形态学对二值图像像素进行分类的处理方法,可运用于任何规模和应用领域的数字图像<sup>[24]</sup>。该方法从像元的层面提取具有景观连通性意义的区域作为核心区<sup>[25]</sup>,对结构性连接做出了明确的强调。以往相关研究大多依靠土地利用数据,通过将其重新分类后,提取重要的自然生态要素(特定的土地利用类型)作为前景,其他用地类型则作为背景,再利用 Guidos 分析软件将前景按形态分为七种类型<sup>[26-28]</sup>。本研究是将 MSPA 分类模型应用于城市热岛的研究,根据 MSPA 方法的需要,利用 AreGIS 把地表温度分级结果转换成为空间分辨率为 30 m 的二值 TIFF 数据,将热岛区作为 MSPA 分析的前景,非热岛区作为背景。使用

Guidos 分析软件,采用8 邻域分析方法,边缘宽度设置为30 m,在进行骨架抽取、腐蚀运算等一系列的数学运算后,得到互不重叠的7类形态类型<sup>[27]</sup>:核心、边缘、支线、孤岛、桥接、环线、孔隙(表2)。

Table 2         Spatial morphological types and their ecological implications of MSPA					
形态类型	生态学含义				
Morphological types	Ecological implications				
核心 Core	前景像元中较大的生境斑块,是多种生态过程的"源"				
桥接 Bridge	连通相邻核心区的狭长区域,具有廊道的特征,代表了能量交换和物质流动的通道,对景观连接具有重要意义				
边缘 Edge	核心区与外围非研究景观区域之间的过渡区域,保护核心区的生态过程和自然演替,减少外界景观人为干扰带 来的冲击				
支线 Branch	前景研究景观的延伸区域,且只有一端与边缘区、连接桥、环岛或者穿孔相连的区域,是其与外围景观进行能量 交流的通道				
环线 Loop	连接同一核心区的内部通道,也具有廊道的特征,是核心区内部进行能量交流的通道				
孤岛 Islet	彼此互不相连的孤立、破碎、连接度较低的小斑块,其内部物质、能量交流和传递的可能性较小				
孔隙 Perforation	核心区与其内部背景数据景观之间的过渡区域,同样具有边缘效应				

表 2 MSPA 的空间形态类型及其生态学含义

# 2.2 景观连通性分析

景观连通性是指景观促进或阻碍生态流的程度,保持良好的连通性有助于生态系统的稳定<sup>[29-31]</sup>。目前, 经常使用整体连通性指数(Integral Index of Connectivity,IIC)、可能连通性指数(Probability of Connectivity,*PC*) 和斑块重要性指数(Patch importance indice,*dI*)来反映景观连接度水平以及斑块对景观连接性的重要性,作 为衡量景观格局与功能的重要指标<sup>[32-33]</sup>。文中,将研究区的地表热环境作为一个热景观,如果能够量化去除 特定城市热岛斑块对热景观连通性的影响,从而精确定位重要斑块节点的位置,采取措施破坏热景观连通性 水平,区域城市热岛效应可以得到有效地缓解<sup>[15]</sup>,因此使用指数 IIC、*PC*、*dI*来评估区域地表城市热岛的连通 性水平。利用 Conefor sensinode 2.6 软件,根据研究区域的大小以及斑块的分布情况,选择以 1000m 作为距离 阈值,设定连通概率为 0.5,IIC、*PC* 和 *dI* 具体计算公式如下:

IIC = 
$$\frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} (a_i a_j / 1 + n l_{ij})}{A_i^2}$$
(6)

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_i a_j P_{ij}^*}{A_i^2}$$
(7)

$$dI(\%) = \frac{I - I_{\text{remove}}}{I} \times 100\%$$
(8)

其中,n代表景观当中斑块的总数, $a_i$ 与 $a_j$ 依次代表为斑块i与斑块j的面积, $nl_{ij}$ 表示斑块i与斑块j之间 的连接数; $P_{ij}^*$ 代表为斑块i与斑块j间途径概率乘积的最大值, $A_L$ 为景观研究区总面积;I为景观中存在景观 要素时的连通性指数值, $I_{remove}$ 为去除该景观要素后的指数值(如某一热岛斑块消失后)。0 $\leq$ IIC $\leq$ 1,IIC 的值 为0时,表示各热岛斑块之间没有连接;IIC 等于1时,表示整个景观都为热岛斑块。0 $\leq$ PC $\leq$ 1,PC 值越大, 代表斑块连接程度就会愈大。通过测度每个斑块消失后连通性指数值的相对变化率 dI 来表征斑块的结构重 要性,该值越高表示节点对景观连通性越重要,这对区域地表热岛缓解研究至关重要。选择不同的连通性指 数类型I,计算得出的各斑块重要性值会有所不同,本文选择的变量I为PC 与 IIC,分别用 dPC 和 dIIC 表示。

本研究根据 IIC 与 PC 的重要性计算结果遴选出每个年份斑块连接度重要性最高的 20 个城市热岛源地。 并且将核心区域城市热岛斑块的重要性进行可视化,基于自然间断分类法,将此类城市热岛斑块分为极重要、 重要、一般重要、不太重要、不重要 5 个等级<sup>[15]</sup>。

# 3 研究结果

3.1 地表温度时空变化特征

由图 2 可知,2007—2018年,最初破碎零散的高温区、次高温区逐渐趋于成片密集分布。2007年,高、次

43 卷

高温度区以小斑块形式散布于研究区。次低温区和低温区主要分布在东部山地和中部农田。2013年,南部高、次高温区明显扩张,并于研究区西北部增加新的区域。2018年,高温区在城市南部面积有所增加、分布更为集中,低温区则向东部和北部聚集。地表温度随时间的变化表明,云龙示范区主城区与周边农村的温度差异越来越明显。本研究将地表高温区与次高温区提取为城市热岛区域,通过比较城市热岛区域的年际变化,能明显观察到热岛区域于城市南、北两个特定地区面积不断增加。这两个地区恰为发展最快速的商、教中心与文化旅游景区,其他地区的热岛斑块则不断缩小、消失。



图 2 2007 年至 2018 年城市地表温度分类与热岛区域 Fig.2 Urban land surface temperature classification and heat island region from 2007 to 2018

# 3.2 基于 MSPA 的城市热岛分布结构特征提取

2007—2018 年基于 MSPA 的城市热岛的时空分布格局如图 3 和表 3 所示。结果表明,核心区域所占面积 最大,2007—2018 年核心区域面积分别为 12.57km<sup>2</sup>、30.98 km<sup>2</sup>、30.89 km<sup>2</sup>;占热岛斑块总面积比例分别为 40.33%、68.72%、73.93%。面积和比例的年际变化表明核心区域面积在 2007—2013 年期间快速增加,在 2013—2018 年期间没有增加,但该类型占整个城市热岛斑块的比例一直呈现上升趋势。核心区域在空间分 布上呈现出明显地向南部和北部聚集的现象。边缘区域是面积仅次于核心区域的类型,面积比例逐渐降低 (依次为 33.94%、23.84%、19.73%),出现这种情况可能是由于边缘区域通常围绕着核心区域,因此核心区域 的形态分布将显著影响边缘区域的面积变化趋势。MSPA 分类中,面积位于第三和第四的为支线和孤岛区 域,面积占比依次为 11.45%、2.46%、1.82%以及 9.91%、1.07%、0.82%。两者都呈现出随着时间的推近,面积 逐渐减少的趋势,但孤岛区域面积减少速度更快。桥接、环线和孔隙区域所占热岛斑块的面积比例都比较小, 其中环线区域是面积最小的类型(面积比例依次为 0.83%、0.15%、0.18%)。桥接区域由于热岛斑块趋于聚 集,面积占比下降较为明显,依次为 2.86%、0.64%、0.40%。孔隙区域的面积比例随着核心区域形态的变化, 呈现出增加的趋势,依次为 0.67%、3.13%、3.11%。综合以上结果可以看出,在 MSPA 模型分类中,核心类型 占据热岛区域的绝大部分,且对其余类型的影响显著,是决定城市热岛网络稳定性的重要因素。





Fig.3 Results of the MSPA-based surface urban heat island patch classification from 2007 to 2018

Table 3         MSPA-based classification and statistics results								
类型 Type	2007 年面积/km <sup>2</sup> Area of 2007	占城市热岛 总区域面积/% Area proportion of urban heat island	2013 年面积/km <sup>2</sup> Area of 2013	占城市热岛 总区域面积/% Area proportion of urban heat island	2018 年面积/km <sup>2</sup> Area of 2018	占城市热岛 总区域面积/% Area proportion of urban heat island		
核心 Core	12.57	40.33	30.98	68.72	30.89	73.93		
边缘 Edge	10.58	33.94	10.75	23.84	8.25	19.73		
支线 Branch	3.57	11.45	1.11	2.46	0.76	1.82		
孤岛 Islet	3.09	9.91	0.48	1.07	0.34	0.82		
桥接 Bridge	0.89	2.86	0.29	0.64	0.17	0.40		
环线 Loop	0.26	0.83	0.07	0.15	0.07	0.18		
孔隙 Perforation	0.21	0.67	1.41	3.13	1.30	3.11		

表 3 基于 MSPA 的分类和统计结果

# 3.3 景观连通性分析结果

2007—2018年间,核心区热岛斑块基于景观连通度的重要性等级划分以及重要性值排名前 20 斑块的具体数值如图 4 和表 4 所示。从空间分布上看,2007年云龙示范区极重要核心区主要分布在南部城市中心和 主干道交汇处,重要核心区零散分布于主干道周边与东部农村居民点聚集区。从 dIIC 值和 dPC 值的结果上 看,前 2 个斑块的连通度重要性相比于其他斑块更大。2013年极重要核心区由南部城市中心向北发展,逐渐 形成网络;重要核心区由于当地旅游项目的开展落地,大部分分布于北部云峰湖生态度假区附近。表 3 中该 时期前 3 个斑块的重要性较大,并且排名第一的斑块重要性值远大于其他斑块。2018年极重要核心区又转 而向南部聚集,在云龙示范区的南部主城区位置面积扩大,网络连接更加复杂;重要核心区在 2013年的基础 上继续发展。对该年份的所有核心区斑块进行连通性计算,发现前 3 个斑块的连通度重要性数值偏大,且第 1 个斑块数值极大。从整体上来看,前 20 个斑块中头部斑块的重要性越来越大,所占的面积比例越来越大; 同时剩余的热景观斑块重要性程度越来越低,斑块面积也越来越小,说明头部斑块在城市规划发展中具有较 大影响力,因此首先针对其进一步采取有效适当的措施,对缓解城市热岛意义重大。



图 4 城市热岛核心斑块重要性等级划分图

Fig.4	Map of	<i>importance</i>	levels 4	of urban	heat	island	core	patches
		1						

表 4	云龙示范区 2	007-2018	年排名前2	0个斑块	重要性指数	如计算结果
-----	---------	----------	-------	------	-------	-------

Table 4 Top 20 patch importance index ranking results from 2007 to 2018 in Yunlong Demonstration Zone

	2007		2013		2018	
序号 Number	整体连通性指数 变化率/% dIIC	可能连通性指数 变化率/% <i>dPC</i>	整体连通性指数 变化率/% dIIC	可能连通性指数 变化率/% <i>dPC</i>	整体连通性指数 变化率/% dIIC	可能连通性指数 变化率/% <i>dPC</i>
1	29.40	28.28	76.94	77.04	85.30	87.18
2	22.29	29.01	20.77	25.05	17.89	17.78
3	8.74	12.94	12.51	17.22	15.39	21.52
4	7.44	8.31	5.42	6.45	4.90	10.48
5	7.29	6.98	3.43	3.47	2.74	2.61
6	5.84	6.37	2.88	4.12	1.70	2.24
7	4.70	4.59	2.09	2.48	1.35	1.77
8	4.05	3.63	1.87	2.33	0.93	1.36
9	3.77	3.92	1.30	1.53	0.92	1.12
10	2.56	2.67	1.26	1.37	0.77	0.74
11	2.39	2.96	1.06	1.14	0.75	0.97
12	2.31	2.24	1.02	1.18	0.70	1.03
13	2.20	2.34	0.95	1.09	0.63	0.55
14	2.11	2.11	0.93	1.58	0.52	0.75
15	1.93	2.34	0.92	1.10	0.47	0.47
16	1.93	1.62	0.87	1.22	0.40	0.45
17	1.83	1.66	0.87	1.09	0.38	0.38
18	1.78	1.84	0.87	1.03	0.38	4.29
19	1.76	2.12	0.72	0.82	0.37	0.43
20	1.57	2.11	0.72	0.95	0.34	0.37

# 4 讨论

不少城市热岛的相关研究选择从景观斑块角度切入研究,探究斑块的组成与配置对城市热岛效应的影响,通过找到最优解实现对城市热环境的最佳缓解效果<sup>[12,34]</sup>。然而余兆武<sup>[15]</sup>指出,在现实中实施缓解措施时,最重要的是首先识别出对城市热岛贡献最大的景观斑块所处的位置,再优先对这些斑块进行处理改造。 为实现关键斑块的精确定位,本文选用了 MSPA 分析与景观连通性分析相结合的方法。以往这种方法多用于

相比于直接从斑块角度入手的研究方法,本文选择的研究方法是从城市热岛的网络形态开始分析。在城 市热岛网络中,每个热岛斑块的相对位置、连接角色和重要性都不尽相同[15]。将研究视角上升到整个热岛网 络,对网络中的节点与链接进行全面评估之后,可以确定构建并维持起目前热岛网络的关键斑块。而基于热 岛斑块的研究结果(如土地利用类型面积阈值、城市景观格局优化)可重点应用于这些关键斑块,这样便形成 了从网络到斑块的研究闭环,使得整个研究更为全面,实践应用价值更高。本研究结果显示,2007 年至 2018 年间极重要的城市热岛斑块主要位于研究区南部城区,并且面积不断扩大,斑块之间连接更加复杂。可在了 解 2018 年城市热岛网络现状的基础上,对云龙示范区如何缓解热岛效应提出相应的建议,更好地与城市设计 与规划相结合。基于研究结果,应把城市南部作为改造重点,为提高整体热环境优化效率,可优先对重要性值 排在前3名的斑块采取措施。从整个城市的发展规划中了解到,云龙示范区南部大力推动科教创新与创业, 作为教、商中心投入建设较快,地表人工建筑表面明显增加。结合此前大量的研究经验与结论,在南部地区大 量招商引资、开发项目基地时,在上述斑块内部要避免热源区域的集中分布,可以通过布置绿地或水体,改善 目前热岛斑块内土地利用结构;设立形状不规则的小型热汇斑块,以增强表面热量交换,帮助吸收城市运作过 程中产生的热量[36-37]。不仅如此,由于中部科技园区诸多项目的推进,为了避免城市热岛斑块进一步向北延 伸,还可加强热源斑块中建设用地的集约利用,进一步鼓励拓展地上和地下空间。此外,在这些关键热岛斑块 的周边,非建设用地区域,增加生态用地比重,实现对蓝绿景观的构建和强化也是较为可行的方法,通过阻断 热量流动的途径,减少热量吸收,从而抑制热岛效应<sup>[16]</sup>。最后,建议在城市建设中使用具有高反射率的建筑 新材料,推动绿色屋顶和墙壁的普及<sup>[38-41]</sup>,进一步打造生态型发展城市名片。本文利用形态学空间格局分析 和景观连通性分析以云龙示范区的城市热岛研究为例,研究结果可为广大中西部中小城市的可持续发展建设 提供更为科学的实践指导。

### 5 结论

以反演的 LST 为基础,应用 MSPA 划分热岛区域连通性功能类型,分析量化热岛核心区斑块在 2007—2018 年的景观连通度的重要性,主要结论如下:

(1)2007—2018 年株洲云龙示范区的地表城市热岛区域面积呈现出先增加后稳定的趋势;空间上,快速 发展的南部主城区与北部方特旅游度假区是热岛斑块的主要分布区,且热岛形态逐渐清晰。

(2)研究区热岛核心类的面积在 2013 年至 2018 年间虽无增加,但其占热岛区域的面积比例不断增加,表明热岛核心呈逐渐聚集的趋势;而边缘、支线、孤岛、桥接、环线、孔隙六种类型面积占比较小,并且除孔隙类型外面积均呈缩小趋势,对城市热景观影响不大。以上系列变化表明城市建设方案偏向定点集中,并对规划区以外的地区实行生态保护。

(3)城市热岛网络中的关键斑块,仍主要分布在研究区南部且面积有所增加。在实施热缓解措施时,可 以优先改造重要性值处于靠前位置的斑块,从而获得比较好的缓解效果。

(4)将 MSPA 分析与景观连通性分析有机结合,能够适用于城市热岛的相关研究,为中小城市的发展提供科学指导。但在之后的研究中,还需要构建更为细化和精准的城市热岛网络,找出其关键节点与通道,以便更为有效地控制减缓城市化进程下的热岛效应。

#### 参考文献(References):

[2] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic

<sup>[1]</sup> Roth M, Oke T R, Emery W J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(11): 1699-1720.

effect of urbanization. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(9): 1663-1681.

- [3] Carlson T N, Arthur S T. The impact of land use land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: A satellite perspective. Global and Planetary Change, 2000, 25(1/2): 49-65.
- [4] Gui X, Wang L C, Yao R, Yu D Q, Li C. Investigating the urbanization process and its impact on vegetation change and urban heat island in Wuhan, China. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(30): 30808-30825.
- [5] Bokaie M, Zarkesh M K, Arasteh P D, Hosseini A. Assessment of urban heat island based on the relationship between land surface temperature and Land Use/Land Cover in Tehran. Sustainable Cities and Society, 2016, 23: 94-104.
- [6] Feng Y J, Yang Q Q, Tong X H, Chen L J. Evaluating land ecological security and examining its relationships with driving factors using GIS and generalized additive model. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1469-1479.
- Jenerette G D, Harlan S L, Buyantuev A, Stefanov W L, Declet-Barreto J, Ruddell B L, Myint S W, Kaplan S, Li X X. Micro-scale urban surface temperatures are related to land-cover features and residential heat related health impacts in Phoenix, AZ USA. Landscape Ecology, 2016, 31(4): 745-760.
- [8] Heaviside C, Macintyre H, Vardoulakis S. The urban heat island: implications for health in a changing environment. Current Environmental Health Reports, 2017, 4(3): 296-305.
- [9] Mathew A, Khandelwal S, Kaul N. Spatial and temporal variations of urban heat island effect and the effect of percentage impervious surface area and elevation on land surface temperature: Study of Chandigarh city, India. Sustainable Cities and Society, 2016, 26: 264-277.
- [10] 崔林林,李国胜, 戢冬建. 成都市热岛效应及其与下垫面的关系. 生态学杂志, 2018, 37(05): 1518-1526.
- [11] 张建明, 王鹏龙, 马宁, 张超. 河谷地形下兰州市城市热岛效应的时空演变研究. 地理科学, 2012, 32(12): 1530-1537.
- [12] Peng J, Xie P, Liu Y X, Ma J. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: a case study in the Beijing metropolitan region. Remote Sensing of Environment, 2016, 173: 145-155.
- [13] Chen Y J, Yu S X. Impacts of urban landscape patterns on urban thermal variations in Guangzhou, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 54: 65-71.
- [14] 林鸿煜, 钱晶, 严力蛟, 黄绍荣. 基于形态学空间格局分析与 CA-Markov 模型的武义县绿色基础设施时空格局变化及情景模拟. 浙江农业学报, 2019, 31(7): 1193-1204.
- [15] Yu Z W, Zhang J G, Yang G Y, Schlaberg J. Reverse thinking: a new method from the graph perspective for evaluating and mitigating regional surface heat islands. Remote Sensing, 2021, 13(6): 1127.
- [16] 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: 103135.
- [17] 魏雪梅,马卫春,孔丽.中小城市地表温度变化与下垫面关系.遥感信息,2019,34(03):115-119.
- [18] 王光军,莫蕙榕,张洪江,赵月,扶杰.株洲云龙示范区绿地系统生态服务功能评价与优化.中南林业科技大学学报,2015,35(02): 59-65.
- [19] 高静, 龚健, 李靖业. "源-汇"景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例. 地理科学进展, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [20] 丁凤, 徐涵秋. 基于 Landsat TM 的 3 种地表温度反演算法比较分析. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2008, 24(1): 91-96.
- [21] 王宏博,李丽光,赵梓淇,蔡福,武晋雯,许申来,姜鹏.基于 TM/ETM+数据的沈阳市各区城市热岛特征. 生态学杂志, 2015, 34(1): 219-226.
- [22] 宋挺,段峥,刘军志,石浚哲,严飞,盛世杰,黄君,吴蔚. Landsat8 数据地表温度反演算法对比.遥感学报,2015,19(3):451-464.
- [23] Zhao H B, Zhang H, Miao C H, Ye X Y, Min M. Linking heat source-sink landscape patterns with analysis of urban heat islands: Study on the fast-growing Zhengzhou City in Central China. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1268.
- [24] 张玉红,张策,臧淑英.形态学图像处理方法在扎龙湿地景观格局分析中的应用.地理与地理信息科学,2011,27(4):103-106.
- [25] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. 生态学报, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [26] 李空明,李春林,曹建军,王昊,刘森,吕久俊,郝真.基于景观生态学的辽宁中部城市群绿色基础设施 20 年时空格局演变.生态学报, 2021,41(21):8408-8420.
- [27] 张启舜,李飞雪,王帝文,李满春,陈东.基于生态网络的江苏省生态空间连通性变化研究.生态学报,2021,41(8):3007-3020.
- [28] 黄雪飞,吴次芳,游和远,肖武,钟水清.基于 MCR 模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建.农业工程学报,2019,35(10):243-251. [29] 傅伯杰,陈利顶,马克明,王仰麟.景观生态学原理及应用.北京:科学出版社,2001.
- [30] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. Urban Ecosystems, 2017, 20(3): 701-714.
- [31] 吴茂全, 胡蒙蒙, 汪涛, 凡宸, 夏北成. 基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别. 生态学报, 2019, 39(13): 4720-4731.
- [32] 代继平,朱坤,周天宇,彭建松.腾冲市中心城区生态空间网络构建.林业资源管理,2021,(5):131-138.
- [33] 何侃,林涛,吴建芳,随梦飞,刘恋,丁国昌.基于空间优先级的福州市中心城区绿色基础设施网络构建.应用生态学报,2021,32 (04):1424-1432.
- [34] Zhou W Q, Wang J, Cadenasso M L. Effects of the spatial configuration of trees on urban heat mitigation: A comparative study. Remote Sensing of Environment, 2017, 195: 1-12.
- [35] 何建华, 潘越, 刘殿锋. 生态网络视角下武汉市湿地生态格局分析. 生态学报, 2020, 40(11): 3590-3601.
- [36] Li W F, Cao Q W, Lang K, Wu J S. Linking potential heat source and sink to urban heat island: Heterogeneous effects of landscape pattern on land surface temperature. Science of the Total Environment, 2017, 586: 457-465.
- [37] 陆晓君,刘珍环.城市"源-汇"热景观变化及其空间作用强度特征——以深圳西部地区为例. 生态学报, 2021, 41(16): 6329-6338.
- [38] Morini E, Castellani B, Presciutti A, Anderini E, Filipponi M, Nicolini A, Rossi F. Experimental analysis of the effect of geometry and façade materials on urban district's equivalent albedo. Sustainability, 2017, 9(7): 1245.
- [39] Morini E, Castellani B, De Ciantis S, Anderini E, Rossi F. Planning for cooler urban canyons: Comparative analysis of the influence of façades reflective properties on urban canyon thermal behavior. Solar Energy, 2018, 162: 14-27.
- [40] Synnefa A, Dandou A, Santamouris M, Tombrou M, Soulakellis N. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(11): 2846-2856.
- [41] Hoag H. How cities can beat the heat. Nature, 2015, 524(7566): 402-404.