

长沙市主城区绿色空间格局演变 与地表温度的空间关系

朱格格,陈雨如,杨 佩,王升红,陆东芳*

(福建农林大学,福建 福州 350100)

摘要:利用长沙市主城区2000年、2011年和2022年的Landsat遥感影像进行地表温度反演和土地利用分类,利用相关空间分析理论方法,探讨研究区绿色空间与地表温度的格局特征以及2者的空间关系。结果表明:2000—2022年,研究区绿色空间面积减少,破碎化程度先减弱后增强,景观多样性增加,边界形状复杂程度降低;绿色空间与地表温度均呈显著的空间正相关性;绿色空间聚集的山地丘陵,地表温度较低,而绿色空间分布较少的城市建成区,地表温度较高;绿色空间各面积指数与地表温度为负向关系,斑块密度与地表温度为正向关系,且相关性增强;边界密度、香农均匀度、景观形状指标、景观分割度与地表温度2000年为负向关系,2011年及2022年为正向关系,且相关性先增强后减弱。绿色空间是生态环境的重要组成部分,探索其对地表温度的影响机制,对有效缓解城市热环境意义重大。

关键词:绿色空间;地表温度;格局演变;空间自相关;空间自回归模型

中图分类号:P901;X144;X16

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2023.02.007

Spatial relationship between evolution of green space pattern and land surface temperature in the main urban area of Changsha

Zhu Gege, Chen Yuru, Yang Pei, Wang Shenghong, Lu Dongfang*

(Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: By using Landsat remote sensing images of Changsha City's main urban area from 2000, 2011, and 2022, land surface temperature inversion and land use classification were conducted. And the characteristics of green space and land surface temperature patterns in the study area and the spatial relationship between them were discussed. The results showed that from 2000 to 2022, the area of green space in the study area decreased, the degree of fragmentation first weakened and then increased, and the landscape diversity increased, and the complexity of boundary shapes decreased. There was a significant positive spatial correlation between green space and land surface temperature. Mountains and hills with green space cluster had lower surface temperature while urban built-up areas with less green space distribution had higher surface temperature. The area index of green space was negatively related to surface temperature, although patch density had a positive relationship with surface temperature and the correlation increased; In 2000, boundary density, Shannon evenness, landscape form index, and landscape segmentation index were negatively related to land surface temperature, but positively related in 2011 and 2022, and the correlation first increased and then weakened. Green space is an important component of the ecological environment, and exploring its mechanism of influence on land surface temperature is of great importance for effective mitigation of urban thermal environments.

Key words: Green space; Land surface temperature; Pattern evolution; Spatial autocorrelation; Spatial autoregressive model

收稿日期:2023-02-05;修回日期:2023-03-05

基金项目:福建省社科规划项目“泉州海洋文化景观网络构建与整体性保护研究”(FJ2022BF061);福建农林大学校级重点教改项目“架构智慧4D生态系统,助推风景园林教育数字化转型”(115/111422128)

作者简介:朱格格(1999—),女,河南周口人,硕士研究生。主要研究方向为园林与景观设计。E-mail:910931409@qq.com

* **通信作者:**陆东芳(1977—),女,福建仙游人,副教授,硕士生导师。主要从事风景园林规划与设计研究。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究选取长沙市区芙蓉区、天心区、开福区、岳麓区和雨花区作为研究区域,面积约为 1 226 km²(如图 1)。长沙市属于亚热带季风气候,雨热同期,盛夏酷热,严寒期短。地势起伏较大,水系发达,东北、西北部山地高峻,中部较平缓,湘江由南至北贯穿中部。土地覆被类型主要为林地、耕地。至 2021 年末,长沙市常住人口占全省 15.45%,地区生产总值占全省 28.81%,城镇化率由 2000 年 42.5%增至 83.16%。城市化水平快速提高,研究区热岛效应问题随之增强。

1.2 数据来源与处理

本研究的数据来源于美国地质调查局网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),下载了成像时间接近且云量较小的 2000 年 9 月 13 日和 2011 年 7 月 26 日 Landsat 5 影像,2022 年 7 月 24 日及 8 月 9 日 Landsat 8 影像。并进行预处理,如辐射定标、大气

校正和镶嵌剪裁等^[1]。

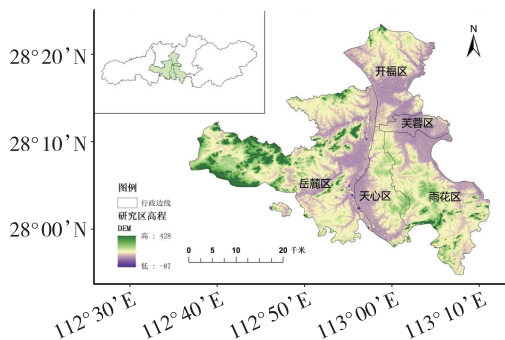


图 1 研究区位置

1.2.1 绿色空间提取 利用 ENVI 5.3 软件,使用最大似然法监督分类,根据长沙市土地利用现状,对其土地利用类型进行绿地、水体、耕地、未利用地及建设用地划分,3 期解译结果的 Kappa 系数均大于 0.9,精度符合要求。利用 Arcgis10.5 软件进行重分类,分为绿色空间和非绿色空间,将绿地和耕地作为绿色空间提取出来(如图 2),进行绿色空间的景观格局分析^[2]。

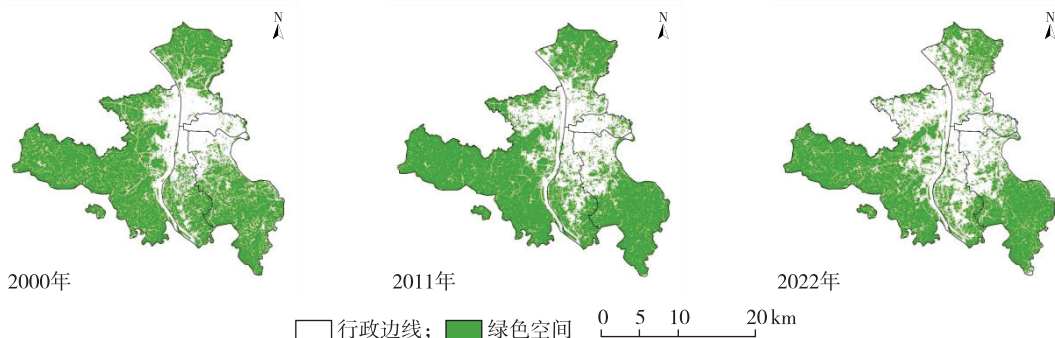


图 2 2000—2022 年研究区绿色空间时空分布

1.2.2 地表温度反演 基于 ENVI 5.3 软件使用大气校正法对长沙市主城区 2000 年、2011 年及 2022 年的地表温度进行反演。首先利用获取的植被归一化指数(NDVI)可计算出植被覆盖度(FVC),进而求出地表比辐射率(ϵ),然后将其与大气校正后得到的热红外波段辐射定标结果相结合,获得黑体辐射亮度(T_a),最终依据普朗克函数进行地表温度计算^[3]。

1.3 研究方法

1.3.1 移动窗口法分析 景观格局一般指各景观组成单元在空间上的分布组合,景观格局指数是指能浓缩反映景观格局空间结构特征的定量指标。在充分理解各景观格局指数生态学意义的前提下并参照前人研究,为分析研究区绿色空间与地表温

度的关系,选取如下景观格局指数:景观类型比例(PLAND)、斑块密度(PD)、最大斑块面积比例(LPI)、边界密度(ED)、平均斑块面积(AREA_MN)、香农均匀度(SHEI)、景观形状指标(LSI)和景观分割度(DIVISION)^[4-6]。通过使用 Fragstats

4.2.1 软件的移动窗口功能,设定 300 m×300 m 的正方形分析窗口,从研究区的左上角开始^[7],逐步向右下角移动,以计算出窗口中绿色空间的景观指数,然后将其赋予一个中心栅格,从而得到每个景观指数的栅格图。接着运用 Arcgis10.5 软件,可统计出每个窗口地表平均温度、景观指数,并将它们进行归一化处理,后将 2 者耦合,分析其关系。

1.3.2 空间自相关分析 空间自相关研究空间变量与其周围变量之间的空间相关性,从而分析这些

空间变量的空间分布特征。依据空间变量的属性值存在趋同聚集、趋异聚集还是随机分布,分为正相关、负相关和空间无关。关于空间自相关分析的方法,有全局空间自相关和局部空间自相关,常用的空间相关性指数为 *Moran's I*。全局空间自相关主要度量在整个研究区域内各区域单元与邻近区域空间单元之间的相似性^[8],反映的是空间依赖性。但空间整体分布通常趋于不平稳,使用局部空间自相关可识别不同空间位置上存在的局部空间聚集,反映的是空间异质性。此外,双变量空间自相关分析,可有效反映 2 个不同的空间属性在研究区域的空间相关性。本研究借助 GeoDa1.18 软件中的空间分析模块进行相关分析。

1.3.3 空间自回归模型 借助 GeoDa1.18 软件中的回归分析模块,利用地表温度与绿色空间景观格局指数进行空间自回归分析,公式为:

$$y = \rho W_1 y + \beta x + \mu + a$$

$$\mu = \lambda W_2 \mu + \varepsilon$$

在公式中, y 是因变量即地表温度, x 是自变量即各类绿色空间景观指数, W_1 和 W_2 分别代表因变量本身和残差的空间权重矩阵, ρ 是空间滞后项 $W_1 y$ 的系数, β 是自变量的回归系数, a 是一个常数, μ 是随机误差项, ε 是一个服从均值 0、方差 σ^2 的随机误差, λ 是空间误差项的回归系数。

公式中不同参数设置为 0,能形成 4 种空间模型,本研究仅对其中 3 种进行考虑。当 $\rho=0, \lambda=0$ 时,即普通线性回归模型 (OLS);当 $\rho \neq 0, \lambda=0$ 时,即空间滞后模型 (SLM);当 $\rho=0, \lambda \neq 0$ 时,即空间误差模型 (SEM)^[9]。

对 OLS 模型回归后的残差应用 *Moran's I* 检验,用于判断显著空间依赖性是否存在,若存在则需考虑 SLM 与 SEM 模型。为判断 2 者何为更合适的回归模型,首先比较 LM-lag 与 LM-error、robust LM-lag 与 robust LM-error 统计量的显著性,若 4 者的显著性相同,最终选择拉格朗日乘子 (LM) 检验结果大的模型。此外,通过对比最大似然对数 (LIK)、

赤池信息量准则 (AIC)、Schwartz 指标 (SC) 也可衡量模型优劣。LIK 越大,AIC、SC 数值越小,即模型拟合效果越好。

2 结果与分析

2.1 绿色空间与地表温度的空间分布

2.1.1 绿色空间的格局特征分析 如表 1 所示,景观类型比例 (PLAND)、最大斑块面积比例 (LPI) 和平均斑块面积 (AREA_MN) 均先增后降,PLAND 从 2000 年 61.736 2 增至 2011 年 64.158 3,又下降至 2022 年 53.822 1,LPI 从 2000 年 27.848 1 增至 2011 年 28.805 5,又下降至 2022 年 24.076 8,AREA_MN 从 2000 年 16.915 8 增至 2011 年 19.781 8,又下降至 2022 年 16.877 7。表明研究区绿色空间面积先增后减,整体上绿色空间比例、最大斑块面积和平均斑块面积均降低,优势度下降。

斑块密度 (PD)、边界密度 (ED) 与景观分割度 (DIVISION) 均先降后增,PD 从 2000 年 5.9116 降至 2011 年 1.511 6,又增至 2022 年 2.057 0,ED 从 2000 年 51.696 7 下降至 39.241 1,又增至 2022 年 48.816 6,DIVISION 由 2000 年 0.919 4 降至 2011 年 0.876 9,又增至 2022 年 0.918 6。表明研究区绿色空间被分割程度高,破碎化程度先减弱后增强,整体上略有好转。

香农均匀度 (SHEI) 可以作为反映空间中景观各类型斑块分布均匀程度的指标,其值越趋近于 1,说明斑块分布越均匀。如表 1 所示,SHEI 由 2000 年的 0.959 9 降至 2011 年 0.941 4,又增至 2022 年的 0.995 8,研究区内绿色空间的景观多样性增加,空间分布趋向均衡。

景观形状指标 (LSI) 能够反映斑块形状复杂性。如表 1 所示,LSI 呈下降趋势,2000 年、2011 年、2022 年分别为 47.773 1、45.335 3 和 45.269 4。结果表明研究区绿色空间形状边界不规则,离散较为严重,但整体上形状复杂程度逐渐降低。

表 1 绿色空间景观格局指数

年份	景观类型比例	斑块密度	最大斑块面积比例	边界密度	平均斑块面积	香农均匀度	景观形状指标	景观分割度
2000	61.736 2	5.911 6	27.848 1	51.696 7	16.915 8	0.959 9	47.773 1	0.919 4
2011	64.158 3	1.511 6	28.805 5	39.241 1	19.781 8	0.941 4	45.335 3	0.876 9
2022	53.822 1	2.057 0	24.076 8	48.816 6	16.877 7	0.995 8	45.269 4	0.918 6

景观类型比例 ($PLAND$) 可反映绿色空间占景观总面积的比例,以绿色空间的 $PLAND$ 为变量进行全局与局部空间自相关分析,其全局 $Morans' I$ 值如表 2 所示从 2000 年 0.642 增至 2022 年 0.689,具有较强的正向空间自相关关系,表现出绿色空间趋于聚集的现象。由图 3 可知,长沙市主城区绿色空间的高-高聚集主要分布于西部、东南部和北部的山地丘陵地区,低-低聚集主要分布在中部和东部城区,网格数量都略有增加,不显著的网格数量减

少。高-低聚集和低-高聚集所占比例较少,散布于研究区。

表 2 绿色空间全局空间自相关

	2000 年	2011 年	2022 年
$Moran's I$	0.642	0.673	0.689
$z\ scores$	38.852 8	40.025 4	41.538 5
P 值	<0.001	<0.001	<0.001

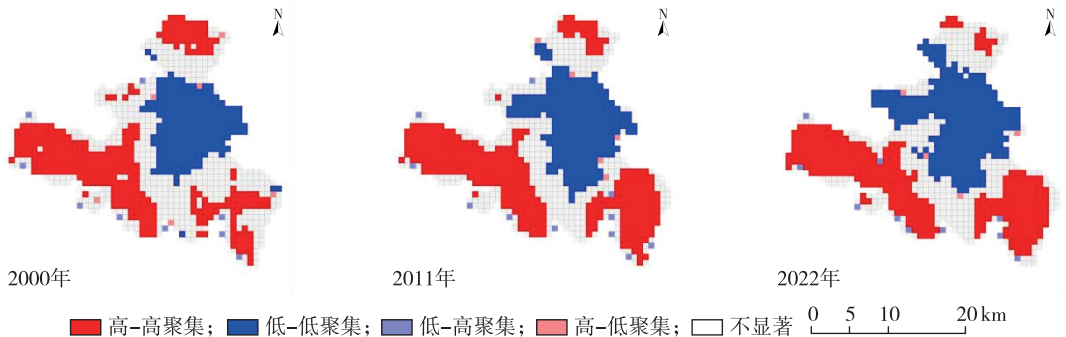


图 3 绿色空间 LISA 分布

2.1.2 地表温度空间格局分析 以地表温度为变量,进行空间自相关分析。如表 3 所示,地表温度的全局 $Morans' I$ 值在 2000 年、2011 年和 2022 年分别为 0.797、0.858 和 0.750,表明地表温度有着显著的正向空间自相关。其局部空间自相关结果如图 4,2000—2022 年不显著的网格数量先减后增,高-高聚集主要分布区从中部、东部向北部、南部扩展,多为城市建成区,低-低聚集主要分布区从北部与西部转移成西部与东南部,多为植被

覆盖的山地丘陵,两者网格数量都有所增加。高-低聚集和低-高聚集网格数量较少,分布比较零散。

表 3 地表温度全局空间自相关

	2000 年	2011 年	2022 年
$Moran's I$	0.797	0.858	0.750
$z\ scores$	48.310 0	50.904 3	44.912 7
P 值	<0.001	<0.001	<0.001

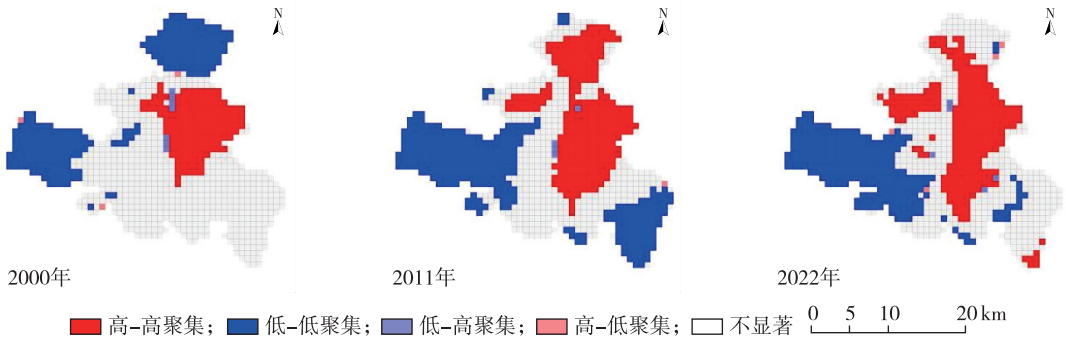


图 4 地表温度 LISA 分布

2.2 绿色空间景观指数对地表温度的影响机制

2.2.1 相关性与双变量空间自相关分析 使用研究区地表温度和绿色空间景观格局指数,进行相关

性与双变量空间自相关分析,结果见表 4。2000 年,2011 年和 2022 年,景观类型比例 ($PLAND$)、最大斑块面积比例 (LPI)、平均斑块面积 ($AREA_MN$) 和地

表温度之间的相关系数以及双变量 *Moran's I* 均为负值,表明随着地表温度的增加,绿色空间的面积降低且优势度减弱。且数值呈降低趋势,表明其与地表温度上升的负向作用程度增强。

斑块密度(*PD*)和地表温度之间的相关系数以及双变量 *Moran's I* 均为正值,且数值波动增加,说明绿色空间斑块密度提高对地表温度上升有促进作用,且此正向作用程度增强。

2000 年,边界密度、香农均匀度、景观形状指标、景观分割度和地表温度之间的相关系数以及双变量 *Moran's I* 均为负值,但在 2011 年及 2022

年转变为正值。表明在 2000 年随着地表温度增强,景观破碎化程度、形状复杂程度与多样性减弱,在 2011 年与 2022 年却随着地表温度上升而增强。其相关系数与双变量 *Moran's I* 均先增后降,表明其与地表温度上升的影响程度先增强后减弱。

研究区绿色空间面积比例与优势度的降低,以及斑块密度、景观破碎化程度、形状复杂程度与多样性的增强,均会促进地表增温。但研究时期不同,各指数与地表温度的相互影响程度不同。

表 4 绿色空间景观指数与地表温度的相关性 及双变量空间自相关分析

景观格局指数	相关系数			<i>Moran's I</i>		
	2000 年	2011 年	2022 年	2000 年	2011 年	2022 年
景观类型比例	-0.572 **	-0.612 **	-0.628 **	-0.525 *** (-38.630 4)	-0.574 *** (-40.944 3)	-0.558 *** (-39.864 6)
斑块密度	0.176 **	0.561 **	0.428 **	0.121 *** (10.153 2)	0.511 *** (37.201 0)	0.353 *** (27.156 3)
最大斑块面积比例	-0.574 **	-0.623 **	-0.636 **	-0.524 *** (-38.557 0)	-0.584 *** (-41.411 6)	-0.562 *** (-40.061 2)
边界密度	-0.167 **	0.497 **	0.254 **	-0.189 *** (-15.572 0)	0.449 *** (33.629 1)	0.174 *** (14.089 2)
平均斑块面积	-0.572 **	-0.637 **	-0.645 **	-0.517 *** (-37.951 3)	-0.597 *** (-42.004 3)	-0.566 *** (-40.146 0)
香农均匀度	-0.161 **	0.382 **	0.130 **	-0.183 *** (-15.318 7)	0.342 *** (26.584 7)	0.077 *** (6.345 6)
景观形状指标	-0.167 **	0.356 **	0.088 **	-0.189 *** (-15.718 1)	0.310 *** (24.412 7)	0.027 *** (2.246 2)
景观分割度	-0.132 **	0.380 **	0.134 **	-0.157 *** (-12.925 1)	0.345 *** (26.808 8)	0.084 *** (6.855 1)

2.2.2 空间自回归分析 为进一步分析绿色空间景观格局对地表温度的影响,将绿色空间各景观格局指数作为自变量,地表温度作为因变量,进行空间回归分析。为避免自变量之间的多重共线性,选用逐步回归的方法,剔除未通过显著性检验的自变量,得到多元逐步回归模型。由表 5 可知,边界密度、香农均匀度的回归系数为正值,最大斑块面积比例、平均斑块面积、景观分割度的回归系数为负值,表明绿色空间的斑块面积越大、布局越紧密、形状复杂程度和破碎化程度越低,*LSI* 越低。比较分析 3 个模型的数值,得知 *OLS* 中 *R*² 和 *LIK* 偏小,而 *AIC* 和 *SC* 值偏大,且 *Moran's I* 检验出残差存在空间自相关性,说明 *OLS* 并不适用于作为分析各变量之间相互关系的回归模型。*SLM* 的 *LIK* 较大,*AIC*, *SC* 较小,且 *R*² 大于 *OLS*,因此 *SLM* 的拟合效果最优,能更好地解释绿色空间景观格局指数与地表温度的空间关系。在 *SLM* 中,地表温度的回归系数 ρ 始终为正值且显著,表明局部地区的地表温度受到相邻地区地表温度的正影响^[10]。

表 5 绿色空间景观指数与地表温度的空间自回归模型参数

参数	普通线性回归模型	空间滞后模型	空间误差模型
景观类型比例	-	-	-
斑块密度	-	-	-
最大斑块面积比例	-0.158 1 ***	-	-0.073 7 ***
边界密度	0.498 8 ***	0.233 5 ***	0.224 9 ***
平均斑块面积	-	-0.052 7 ***	-
香农均匀度	0.323 0 ***	0.143 3 ***	0.158 4 ***
景观形状指标	-	-	-
景观分割度	-0.690 8 ***	-0.320 5 ***	-0.311 9 ***
<i>R</i> ²	0.523 4	0.791 0	0.796 6
<i>LIK</i>	1 435.510 0	1 785.160 0	1 769.178 5
<i>AIC</i>	-2 861.020 0	-3 558.310 0	-3 528.360 0
<i>SC</i>	-2 836.540 0	-3 528.940 0	-3 503.880 0
ρ	-	0.761 0	-
λ	-	-	0.874 4
截距	0.487 3 ***	0.107 3 ***	0.475 2 ***
<i>Moran's I</i> (error)	0.473 4 ***	-	-

3 讨论

本研究对景观格局与地表温度空间关系进行分析,表明景观格局变化与地表温度变化存在正向或负向的相关性,*PLAND*、*LPI*、*AREA_MN*与地表温度均呈显著的负向相关性,*PD*与地表温度呈显著的正向相关性,与钟芳芳等^[11-14]的研究结果基本一致。但有些景观格局指数与地表温度的相关性随着时间发生了改变,*ED*、*SHEI*、*LSI*、*DIVISION*与地表温度在2000年呈显著的负相关关系,而在2011年及2022年呈显著的正相关关系,表明研究区前期绿色空间破碎化程度、形状复杂程度与景观多样性随温度上升而下降,但随着城市化进程进一步发展,绿色空间的斑块趋于破碎等原因,开始随温度上升而增强。

有研究表明,绿地对地表温度的缓解作用,主要与其斑块规模面积、周长、形状和破碎化程度有关^[15],结合本研究对绿色空间景观格局与地表温度空间关系的分析结果,提出以下建议:将破碎化绿地空间转化为整体绿色空间,可通过建设生态廊道连接破碎斑块,对其进行集中规划,如森林公园等,提高降温效果^[16];在当今城市用地趋于紧张,难以增加绿色空间面积的前提下,建议通过合理优化绿色空间景观格局来加强其对城市地表温度的调节,从而缓解热岛效应。

4 结论

在2000—2022年,研究区绿色空间面积减少,优势度降低,破碎化程度先减弱后增强,景观多样性增加,空间分布趋向均衡,边界形状不规则,离散较为严重,但整体形状复杂程度逐渐降低。

研究区绿色空间与地表温度均呈现显著的正向空间自相关性。绿色空间的高-高聚集主要分布于研究区西部和东南部的山地丘陵,这些地区多为地表温度低-低聚集区。绿色空间的低-低聚集区主要分布在中部和东部城市建成区,而这些地区多为地表温度高-高聚集区。

从绿色空间景观指数与地表温度的相关性 with 双变量空间自相关性来看,景观类型比例、最大斑块面积比例、平均斑块面积与地表温度为负向关

系,斑块密度与地表温度为正向关系,且其对地表温度上升的影响程度均增强。2000年,边界密度、香农均匀度、景观形状指标、景观分割度与地表温度均为负向关系,但在2011年及2022年为正向关系,且其与地表温度上升的影响程度先增强后减弱。

参考文献:

- [1] 陈天,谭凝.基于Landsat数据的蓝绿空间改善城市热环境分析——以天津市为例[J].南方建筑,2022,209(3):19-27.
- [2] 姚侠妹,陈媛媛,偶春,等.城市绿色空间时空演变及其生态效益研究——以合肥市区为例[J].长江流域资源与环境,2023,32(1):51-61.
- [3] 刘思煜,吴焱,许娟,等.延安市地表热环境与下垫面指数的关系研究[J].西北林学院学报,2022,37(6):207-214,265.
- [4] 杜航.西安市地表景观格局的热环境效应研究[D].西安:陕西师范大学,2019.
- [5] 卢惠敏,李飞,张美亮,等.景观格局对杭州城市热环境年内变化的影响分析[J].遥感技术与应用,2018,33(3):398-407.
- [6] 赵禾苗.基于RS的喀什市地表热力景观空间格局及驱动力分析[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2022.
- [7] 沈中健,曾坚,任兰红.2002—2017年厦门市景观格局与热环境的时空耦合关系[J].中国园林,2021,37(3):100-105.
- [8] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J].生态学报,2019,39(7):2366-2377.
- [9] 许剑辉,赵怡,肖明虹,等.基于空间自回归模型的广州市NDVI和NDBI与气温关系研究[J].国土资源遥感,2018,30(2):186-194.
- [10] 沈中健,曾坚,梁晨.闽南三市绿地景观格局与地表温度的空间关系[J].生态学杂志,2020,39(4):1309-1317.
- [11] 钟芳芳,刘传立,王颖娜.景观格局对城市热环境的影响——以南昌市为例[J/OL].桂林理工大学学报:1-9[2023-03-22].
- [12] 杨鹏,高祺,张艳品,等.基于Fragstats4的景观格局指数与地表温度的相关性——以石家庄市为例[J].气象科技,2021,49(3):464-474.
- [13] 王茹.城市新区地表景观格局与热环境变化特征及关系研究[D].西安:陕西师范大学,2020.
- [14] 马小亮.昆明市主城区地表城市热岛对土地利用/土地覆盖变化的响应机制[D].昆明:云南师范大学,2022.
- [15] 赵选.西安城市热环境效应及绿地缓解作用研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [16] 奥勇,王周航,赵永华,等.不同城市化水平下绿地景观要素对温度的影响——以关中平原城市群为例[J/OL].生态学杂志:1-15[2023-03-22].