城市森林与城市热缓解

林木树冠覆盖与热环境动态变化及相关性

赵 奇[1] 李松辉[2] 彭建松[1]

1 西南林业大学园林园艺学院 昆明 650224

2 腾冲市林业和草原局 云南腾冲 679100

摘要:【目的】树冠覆盖对区域热环境有显著缓解作用，揭示树冠覆盖对热环境的调节机制，为研究区绿地结构优化提供数据支撑和理论参考。【方法】以昆明市呈贡区为研究对象，基于 2014—2023 年多时期卫星和遥感影像数据，运用多尺度分割和辐射传输方程法等方法，分析树冠覆盖与地表温度的时空演变特征，并定量研究两者间的相关性。【结果】1）2014—2023 年，研究区林木树冠覆盖斑块中巨型斑块面积最大，树冠覆盖面积总体增长 11.07 km^2，其中 2020 年树冠覆盖面积最小、斑块数量最多、破碎化程度最高；2）近 10 年来呈贡区平均温度呈“先降后升”趋势，次高温和高温长期占据主导，2017—2020 年变化最显著，平均温度上升 2.32℃，近年来热环境虽有所改善，但高温区域仍占较大比例，需优化绿地布局以缓解热环境；3）林木树冠覆盖和热环境的主轴始终保持在东北-西南方向，且方向变化不显著，空间格局呈放射状分布，热环境平均中心整体向西南方向发生迁移；4）研究区树冠覆盖斑块与降温率显著正相关，相关性表现为面积>形状指数>周长，降温效果表现为形状指数>周长>面积；斑块降温效果存在明显阈值效应，即面积>20 hm^2、周长>40 km 或形状指数>1.7 时，降温效果显著减弱。【结论】近 10 年来，研究区树冠覆盖斑块的破碎化程度呈现明显波动，平均温度呈“先降后升”趋势，树冠覆盖的空间格局呈现“核心区集聚强化”的变化模式，增加树冠覆盖斑块周长和形状指数的降温效果较好。基于研究结果，提出水平结构优化、垂直空间调控及系统协同布局的“三维协同”优化策略，通过多维度协同以提升降温效果，缓解热环境效应。

关键词：林木树冠覆盖；热环境；标准差椭圆；降温率；昆明呈贡区

DOI：10.12169/zgcsly.2025.05.12.0002

Correlation Analysis of Tree Crown Cover and Thermal Environment Dynamic Changes

Zhao Qi[1] Li Songhui[2] Peng Jiansong[1]

(1. College of Landscape and Horticulture, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2. Tengchong Forestry and Grassland Bureau, Tengchong 679100, Yunan, China)

Abstract:【Objective】Tree crown cover has a significant mitigating effect on the regional thermal environment. This study is to reveal the regulatory mechanism of tree crown cover on the thermal environment, providing data support and theoretical references for the optimization of green space structure in the study area. 【Method】Taking Chenggong District of Kunming City as the research object, this study uses multi-scale segmentation and radiative transfer equation methods to analyze the spatio-temporal evolution characteristics of tree canopy cover and land surface temperature, based on multi-period satellite

收稿日期：2025-05-12

* 基金项目：云南省高校质量工程项目（515006056）

第一作者：赵奇（1998- ），男，硕士生，研究方向为城市森林与热环境。Email：2799264894@qq.com

通信作者：李松辉（1972- ），男，高级工程师，研究方向为森林调查规划与森林城市研究。Email：3k8888@163.com

and remote sensing image data from 2014 to 2023, and quantitatively investigates the correlation between them.【Result】1) From 2014 to 2023, the giant patches in the study area had the largest area among tree crown cover patches, while crown cover area increased by 11.07 km^2. In 2020, the crown cover area is the smallest, the number of patches is the largest, and the degree of fragmentation is the highest; 2) Over the past decade, the average temperature in Chenggong District presents a trend of "first decreasing and then increasing", with sub-high and high temperatures dominating for a long time. The most significant change occurred from 2017 to 2020, with the average temperature rising by 2.32 ℃. Although the thermal environment has improved in recent years, high-temperature areas still account for a large proportion, so it is necessary to optimize the layout of green spaces to alleviate the thermal environment; 3) The main axis of tree crown cover and thermal environment always remains in the northeast-southwest direction, and the direction change is not significant. The spatial pattern shows a radial distribution, and the average center of thermal environment shifts towards the southwest as a whole; and 4) There is a significant positive correlation between tree crown coverage patches and cooling rate in the study area, with the correlation as area>shape index>circumference, and the cooling effect as shape index>circumference>area; There is a significant threshold effect on the cooling effect of patches. When the area is greater than 20 ha, the circumference is greater than 40 km, or when the shape index is greater than 1.7, the cooling effect is significantly weakened.【Conclusion】Over the past decade, the fragmentation degree of canopy cover patches in the study area has obvious fluctuations, the average temperature shows the trend of "first decreasing then increasing", and the spatial pattern of tree canopy cover presents a change model of "agglomerated reinforcement in core area". Increasing the perimeter and shape index of tree canopy cover patches has better cooling effects. Based on the findings, a "three-dimensional collaboration" strategy is proposed for optimizing horizontal structure, regulating vertical space, and coordinating layouts, which could ameliorate the urban thermal environment through multi-dimensional collaboration to improve the cooling effect.

Keywords: tree canopy cover; thermal environment; standard deviation ellipse; cooling rate; Chenggong District of Kunming

随着城市化进程加快，城市热岛效应日益加剧，对生态环境构成了严重威胁。林木树冠作为绿地的重要组成部分，在调节城市热环境、缓解热岛效应等方面发挥着重要作用。城市热岛是指城市温度显著高于郊区的现象[1]，其加剧不仅影响城市气候，还对居民的健康等产生重大影响[2]。自城市热岛提出以来，相关研究主要集中在热岛效应模拟预测、时空特征分析、影响因素探究以及缓解策略制定等方面[3-7]。近年来，为进一步研究城市内环境温度的变化情况，提出了城市热环境的概念[8]，相关研究主要集中在热环境的缓解机制、动态变化以及格局演变和预测分析等方面[9-11]，为热环境的研究奠定了重要基础。

随着城市化发展，热环境已成为影响城市生态系统健康的重要因素之一[12]。林木树冠覆盖被视为衡量城市生态的关键指标，具有很好的降温效应[13]，相关研究主要聚焦于北京、成都等大都市区植物群落特征分析，内容包括叶面积指数、植被类型和群落结构等因子与降温效应的关系[14-18]，然而，缺乏对高原山地城市林木树冠覆盖与热环境动态变化的长期监测与系统性分析。本研究以呈贡区为研究对象，揭示林木树冠覆盖和热环境的动态变化规律，并定量评估两者之间的相关性，旨在为呈贡区及云南其他高原山地城市生态规划和绿地结构优化提供参考。

1　研究区概况

呈贡区("24°42′—25°00′N,102°45′—103°00′E")位于滇池东岸，隶属云南省昆明市，面积达 510.2 km^2。该区属低纬度高原季风气候，干湿季分明、夏无酷暑、雨量集中、秋季温凉，年平均气温 14.7 ℃，降水量 789.6 mm；地形东高西低，山地面积达 49%。近年来，城市化发展迅速，研

究区不透水地面面积从 2011—2015 年增长近 1 倍[19]；2016 年高铁开通进一步推动城市发展，但也带来城市用地无序扩张、不透水面急剧增加、土地破碎化加剧以及生态质量下降等问题[20]，这使城市绿地结构和生态格局发生改变，树冠覆盖斑块碎片化程度加剧。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

研究区高清历史卫星影像数据来源于谷歌地图；呈贡区行政边界矢量数据来源于规划云官网（提供全国各级行政区划边界数据、地图服务及相关规划信息的在线平台）；呈贡区 2014、2017、2020 和 2023 年 5 月的 Landsat8-9 OLI/TIRS 遥感影像数据来源于 USGS（https://EarthExplorer.usgs.gov）官网（表 1），其 NaN 条带号/行编号均为 129/43、分辨率均为 30 m×30 m，所选数据研究区云量均较低，以避免对后续研究造成影响。

利用 ENVI 对遥感影像数据进行辐射定标和大气校正预处理，以便进行地表温度反演。由于 NASA 官网（http://atmcorr.gsfc.nasa.gov/）已停止提供大气透过率、大气向上辐射亮度、向下辐射的反射亮度数据，本研究通过提取 Landsat8-9 OLI-TIRS C2/L2 影像中的 URAD、DRAD、ATRAN 数据，利用 ENVI 进行快速统计并计算平均值，再乘相应的比例参数，从而获取大气参数数据。

表 1 遥感影像条带信息

序号	数据标识	日期/(年-月-日)	云量/%
1	LC08_L1TP_129043_20140525_20200911_02_T1	2014-5-25	33.51
2	LC08_L1TP_129043_20170501_20200904_02_T1	2017-5-1	0.15
3	LC08_L1TP_129043_20200509_20200820_02_T1	2020-5-9	3.67
4	LC08_L1TP_129043_20230518_20230524_02_T1	2023-5-18	8.29

2.2 林木树冠覆盖的提取

本研究基于 e Cognition 多尺度分割技术进行影像解译，其精度取决于各项分割参数的选择，由于不同影像分辨率、地物特性和纹理复杂度等存在差异，较好的参数能够准确区分目标地物，避免影像被过多或过少分割，以确保分类精度。通过多次分割尝试得到最优分割参数（表 2），结合影像和实地调查情况，将地表覆盖类型分为树冠、水体、草地、不透水面、裸土地和耕地 6 类，重点对林木树冠覆盖进行提取与分析。

表 2 e Cognition 最优分割参数

年份	分割尺度	形状参数	紧致度参数
2014	55	0.3	0.7
2017	60	0.5	0.7
2020	70	0.4	0.6
2023	65	0.4	0.8

将树冠覆盖斑块划分为小斑块（$S \leqslant 0.1\ hm^2$）、中斑块（$0.1\ hm^2 < S \leqslant 0.3\ hm^2$），大斑块（$0.3\ hm^2 < S \leqslant 0.5\ hm^2$）、特大斑块（$0.5\ hm^2 < S \leqslant 1\ hm^2$）、巨型斑块（$S > 1\ hm^2$）5 个等级[21]。基于此分类体系，定量分析 2014—2023 不同等级斑块的数量和面积动态变化情况，以揭示树冠覆盖斑块的演变规律。

2.3 地表温度反演

关于地表温度的反演，辐射传输方程法较为常用，其基于物理模型，能够精确模拟大气辐射传输过程，并综合考虑气溶胶、水汽等多种大气参数，比其他方法反演精度更高[22-23]。辐射传输方程法的基本原理是首先评估大气对地表热辐射的影响，然后从卫星传感器观测到的热辐射总量中扣除大气对地表热辐射的影响，计算出地表热辐射强度，并将其转换为相应的地表温度[24]。具体公式如下：

$$L_\lambda = [\varepsilon B_{T_s} + (1-\varepsilon)L_\downarrow]\tau + L^\uparrow \quad (1)$$

$$B_{T_s} = [L_\lambda - L^\uparrow - \tau(1-\varepsilon)L_\downarrow]/\tau\varepsilon \quad (2)$$

$$T_s = K_2/\ln(K_1/B_{T_s} + 1) \quad (3)$$

$$\varepsilon = 0.004FVC + 0.986 \quad (4)$$

$$D_t = [b_2 - L^\uparrow - \tau(1-b_1)L_\downarrow]/\alpha b_1 \quad (5)$$

式（1）~（5）中：L_λ 代表热红外辐射亮度值；ε 代表地表比辐射率；T_S 代表地表真实温度

(K)；B_{T_s}代表黑体在热红外波段的辐射亮度；τ代表大气在热红外波段的透过率；$L^{\uparrow}$代表大气向上的辐射亮度；$L_{\downarrow}$代表大气向下辐射的反射亮度；不同影像 K_1、K_2值不同，对于 TIRS 影像的 Band10，$K_1=774.89$，$K_2=1321.08$；FVC 代表植被覆盖度；D（t）代表黑体辐射亮度；b_1代表地表比辐射率；b_2代表热红外波段 10 的辐射定标结果；α代表热红外透过率。

为消除时间序列上地表温度的基准差异，实现多期热环境对比，将研究区温度划分为低温区、较低温区、中温区、次高温区、高温区和极高温区 6 个等级[25]（表 3）。通过计算 2014—2023 年不同温度等级的面积及占比情况，定量分析热环境的动态演变规律。

表 3　均值-标准差法划分地表温度等级

序号	地表温度等级	取值范围
1	低温区	LST<M-std
2	次低温区	M-std<LST≤M-0.5std
3	中温区	M-0.5std<LST≤M
4	次高温区	M<LST≤M+0.5std
5	高温区	M+0.5std<LST≤M+std
6	极高温区	LST>M+std

注：M 为 LST 均值，std 代表标准差。

2.4　标准差椭圆模型

标准差椭圆属于空间格局统计分析方法，着重揭示地理要素空间分布的全局特征[26]。椭圆加权平均中心代表地理要素在空间分布中的相对位置，而方位角反映了地理要素在空间上的主要趋势方向，椭圆长轴则表示地理要素的离散程度[27]，长短轴差值越大，方向性越显著；标准差椭圆面积则代表图斑空间位置的离散程度，面积越大，离散性越强。基于标准差椭圆模型分析呈贡区树冠覆盖与热环境的空间格局演变规律，揭示其集聚特征、方向变化及重心迁移规律，一定程度反映生态保护政策成效与热岛效应蔓延趋势。

2.5　拟合回归分析

为探究树冠覆盖与热环境的相关性，利用 Arc GIS 计算林木树冠覆盖斑块的面积、周长和形状指数，并进一步计算不同斑块的降温率。运用 SPSS 软件进行 Pearson 相关性分析，对数据进行曲线估算，通过决定系数 R^2确定最优拟合回归方程，以揭示树冠覆盖对热环境的调节机制[28]。

3　结果与分析

3.1　林木树冠覆盖动态变化

e Cognition 平台精度验证显示，各时期 Kappa 系数介于 0.6～0.8，分类精度较好，可以满足研究需要。由图 1 和表 4 可知，2014—2023 年树冠覆盖率净增长 2.17%，阶段性变化显著。2017—2020 年，受地铁站和高铁站开通推动下城市化加速的影响，呈贡区树冠覆盖面积减少 12.23 km^2、斑块数量增长 3091 个；“见缝插绿”的短期绿化和大规模路网建设进一步使得树冠斑块的破碎化程度加剧。2020—2023 年受疫情影响，城市化发展放缓促使树冠覆盖面积回升 14.6 km^2。树冠覆盖以巨型斑块为主，面积显著高于其他等级斑块，中小型斑块次之，大型斑块面积最小（5～6 km^2），且小斑块的数量最多，分布广泛。2020 年树冠覆盖面积最小（168.63 km^2）、斑块数量最多（49 962 个）、破碎化程度最高，表明该时期快速城市化对树冠覆盖影响显著。总体而言，2014—2023 年呈贡区林木树冠覆盖面积净增长 11.07 km^2，区域生态环境得到整体的改善和提升。

3.2　热环境动态变化

图 2 和表 5 表明，近 10 年来研究区平均温度呈“先降后升”的变化趋势，次高温区和高温区始终占主导地位，其中 2014 年占比最高，占总面积的 54.16%。从面积变化情况来看，2014—2023 年低温区和次低温区分别增加 17.84、5.46 km^2，而中温区、次高温区和高温区分别减少 11.49、19.82 和 5.04 km^2（共计减少 36.35 km^2，占比下降 7.28%）；极高温区总体增加 13.04 km^2。其中，2017—2020 年热环境变化最为剧烈，低温区和次低温区面积净减 10.55 km^2，中温区和次高温区净增 13.36 km^2，平均温度上升 2.32 ℃，这种“低温缩减、高温扩张”的格局反映该时期城市化发展对区域热环境影响显著。尽管热环境有所缓解，但高温和极高温区占比仍较高，达 36.26%。未来需进一步优化城市绿地布局，营造更舒适的城市环境。

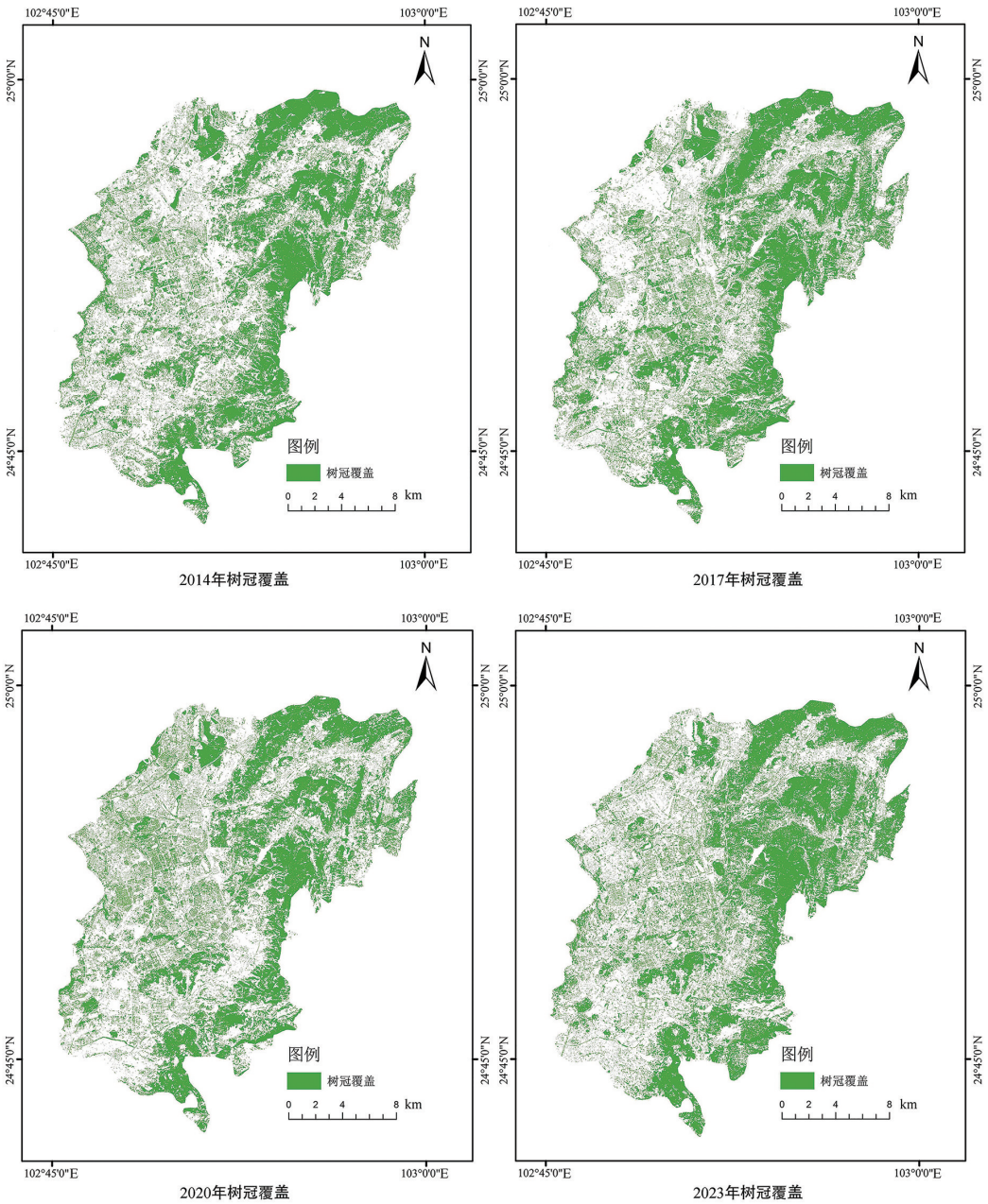


图 1　2014—2023 年呈贡区林木树冠覆盖分布

表 4　2014—2023 年林木树冠斑块面积和数量

树冠斑块等级	2014 年		2017 年		2020 年		2023 年	
	面积/km^2	数量/个	面积/km^2	数量/个	面积/km^2	数量/个	面积/km^2	数量/个
小斑块	11. 41	39 120	11. 155	36 941	11. 588	40 093	11. 288	35 984
中斑块	10. 47	6 281	11. 035	6 598	11. 058	6 629	11. 371	6 794
大斑块	5. 33	1 399	5. 292	1 391	5. 403	1 321	5. 643	1 466
特大斑块	6. 98	1 002	7. 138	1 037	6. 976	978	7. 241	1 046
巨型斑块	140. 98	996	146. 242	904	133. 785	941	147. 751	873
总和	172. 16	48 798	180. 86	46 871	168. 63	49 962	183. 23	46 163
树冠覆盖率	33. 74%		35. 45%		33. 05%		35. 91%	

注：研究区面积为 510. 2 km^2；树冠覆盖率=（树冠覆盖面积/研究区面积）×100%。

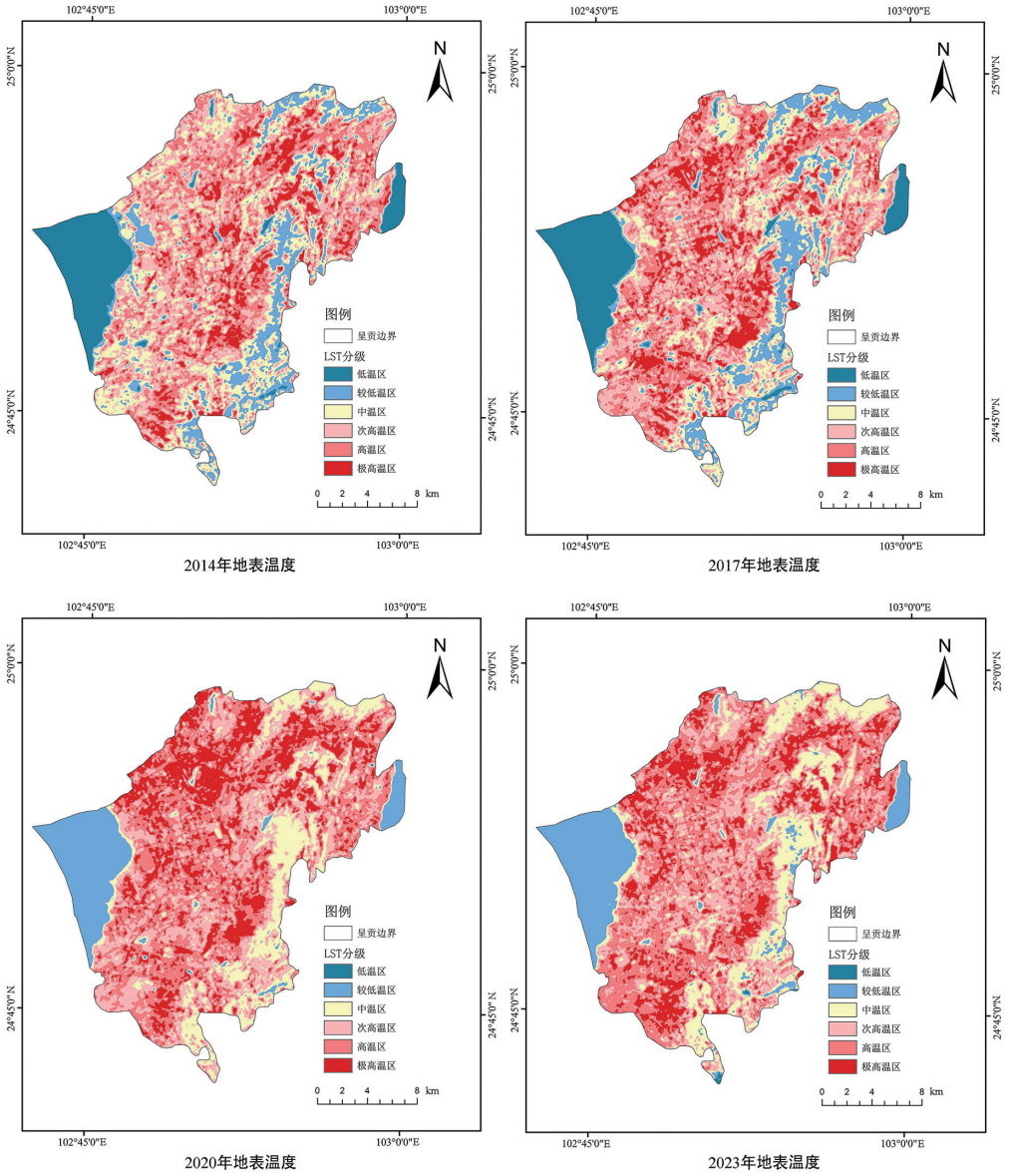


图 2　2014—2023 年呈贡区热环境分布

表 5　2014—2023 年呈贡区地表温度面积及占比

温度等级	2014 年		2017 年		2020 年		2023 年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
低温区	64. 61	12. 94	78. 59	15. 68	72. 57	14. 54	82. 45	16. 51
次低温区	39. 48	7. 91	47. 77	9. 53	43. 24	8. 66	44. 94	9. 00
中温区	79. 98	16. 02	69. 30	13. 82	75. 93	15. 21	68. 49	13. 72
次高温区	142. 20	28. 48	121. 06	24. 15	127. 79	25. 60	122. 38	24. 51
高温区	128. 25	25. 69	129. 89	25. 91	127. 35	25. 51	123. 21	24. 68
极高温区	44. 79	8. 97	54. 68	10. 91	52. 39	10. 49	57. 83	11. 58
平均温度/℃	32. 77		30. 69		33. 01		33. 53	

3. 3　林木树冠覆盖与热环境空间格局变化

3. 3. 1　林木树冠覆盖空间格局变化

图 3 表明，标准差椭圆的主轴方向始终保持在东北-西南方向，旋转角度为 28. 12°～30. 35°，椭圆面积呈“减少-增加-减少”的变化趋势。根据 GIS 计算结果，2014 年椭圆面积为 230. 36 km²，

2017 年减少 14.064 km^2，2020 年增加 7.902 km^2，2023 年减少 2.113 km^2，总体面积减少 8.28 km^2，表明其空间聚集度增强。长轴范围介于 10.613～11.181 km，短轴介于 6.187～6.725 km，长短轴差值介于 3.89～4.94，其中，通过计算椭圆长短轴差值发现 2017 年差值最大，表明其方向性分布最显著；加权平均中心除 2020 年位于洛龙街道外，其余均在吴家营街道，各方向变化显著。根据 2014—2023 年树冠覆盖面积净增 11.07 km^2（表 4），呈贡区生态环境呈“核心区集聚强化”的发展模式，区域生态向着更好的趋势发展。

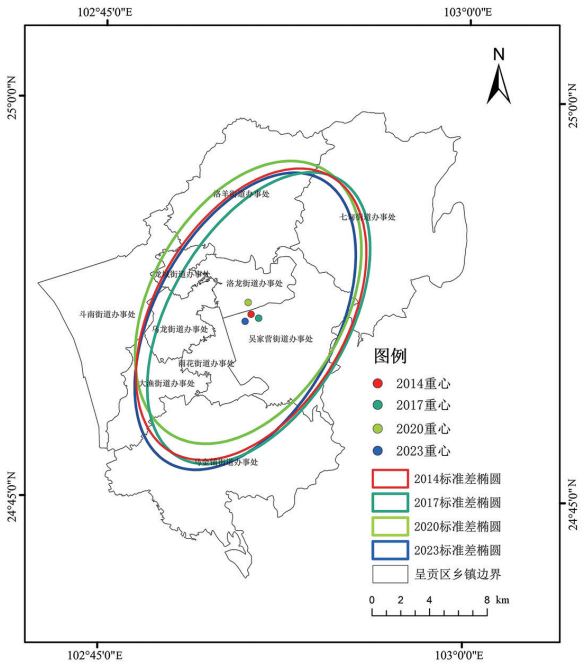


图 3 林木树冠覆盖标准差椭圆模型

3.3.2 热环境空间格局变化

图 4 表明，热环境空间分布稳定在东北-西南方向，旋转角度为 26.988°～29.383°，与树冠覆盖格局具有显著空间耦合性；标准差椭圆面积呈“减少-增加”的变化趋势。根据 GIS 计算结果，2014 年椭圆面积为 255.247 km^2，2017 年减少 1.736 km^2，2020 年增加 0.462 km^2，2023 年面积增加 2.409 km^2，总体面积增加 1.14 km^2，表明热环境的离散性增强，有向外扩张趋势。长轴范围介于 11.981～12.210 km，短轴介于 6.622～6.793 km，长短轴差值介于5.2～5.59，其中，通过计算椭圆长短轴差值发现 2020 年差值最大，表明其方向性分布最显著；热环境平均中心始终位于吴家营街道，并持续向西南方向偏移，表明城市化建设的核心主要集中在呈贡的西南地区。综上可知，热环境格局呈放射状扩张的变化趋势，区域热环境强度随城市化的发展而增强。

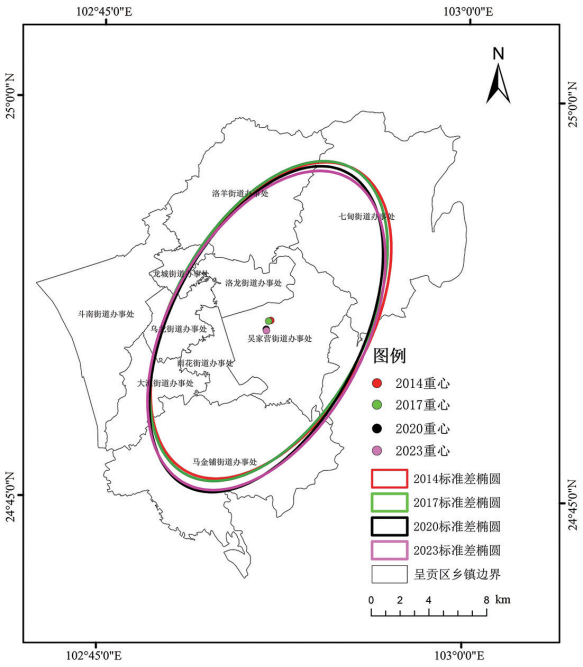


图 4 热环境标准差椭圆模型

3.4 林木树冠覆盖与热环境相关性

选取 2020 年城市化影响最显著时期的 45 个典型树冠覆盖斑块与降温率进行相关性分析，结果（表 6）表明，面积、周长和形状指数均与降温率呈显著（$P<0.01$）正相关。采用曲线估算，通过决定系数 R^2 确定最优拟合回归模型，结果（图 5）表明，面积与降温率符合对数模型，方程为 $Y_1 = 2.05\log X_1 + 2.10$（$R^2 = 0.459$），当面积>20 hm^{2}时，降温效果随面积增加而减弱；周长和形状指数与降温率均符合二次模型（图 6～7），方程分别为 $Y_2 = -0.01X_2^2 + 0.5X_2 + 1.86$（$R^2 = 0.452$），$Y_3 = -3.68X_3^2 + 13.36X_3 - 2.44$，（$R^2 = 0.373$），当斑块周长>40 km 或形状指数>1.7 时，降温效果随其值的增加而减弱。

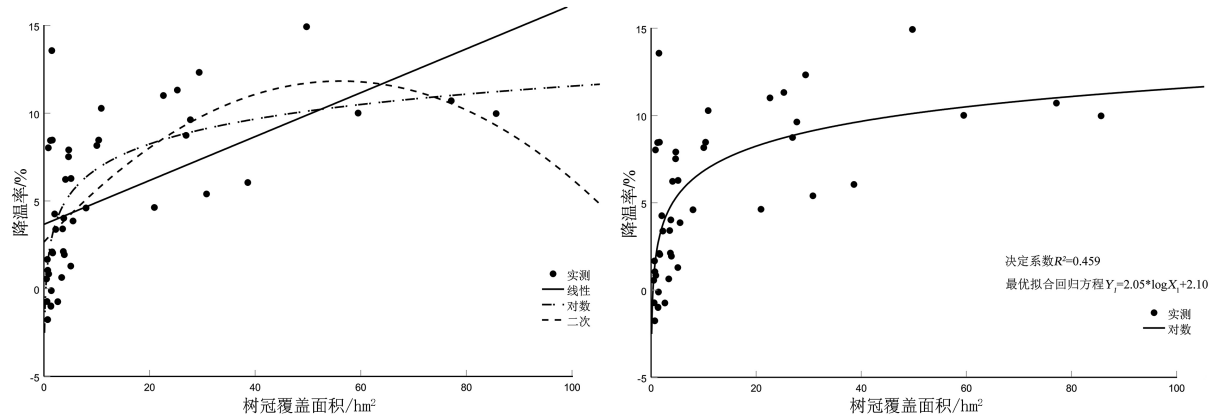
表 6 显示，三者的线性拟合回归模型决定系数（R^2）均超过 0.3，表明该模型具有一定解释力。基于线性拟合回归分析，结果表明：面积每增加 0.1 hm^2，降温率增加 0.013%；周长每增加 0.1 km，降温率增加 0.016%；形状指数每增加

0.1，降温率增加 0.525%。综上可知，在绿地建设面积受限的情况下，通过优化树冠斑块形态（提升形状复杂度和边缘效应）比单纯扩大面积更能提升树冠斑块的降温效果。

表 6　林木树冠覆盖斑块与降温率回归分析

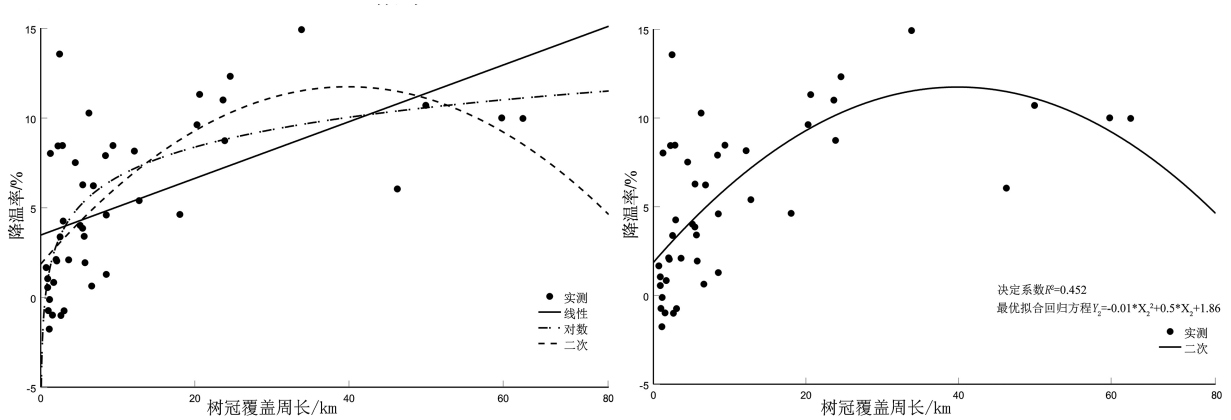
类型	回归模型	决定系数 R^2	F 值	Pearson 值	线性回归方程
降温率与斑块面积	线性	0.329	21.060	0.573 **	$Y_1=0.13X_1+3.67$
	对数	0.459	36.455		
	二次	0.435	16.140		
降温率与斑块周长	线性	0.314	19.675	0.560 **	$Y_2=0.158X_2+3.48$
	对数	0.449	35.059		
	二次	0.452	17.295		
降温率与斑块形状指数	线性	0.318	20.024	0.564 **	$Y_3=5.25X_3+0.95$
	对数	0.362	24.418		
	二次	0.373	12.492		

注：R^2越接近 1，拟合效果越好；F 值检验模型的总体显著性；** 表示相关性显著（$P<0.01$）。



树冠覆盖斑块面积　　斑块面积与降温率最优拟合回归

图 5　林木树冠覆盖斑块面积与降温率回归分析

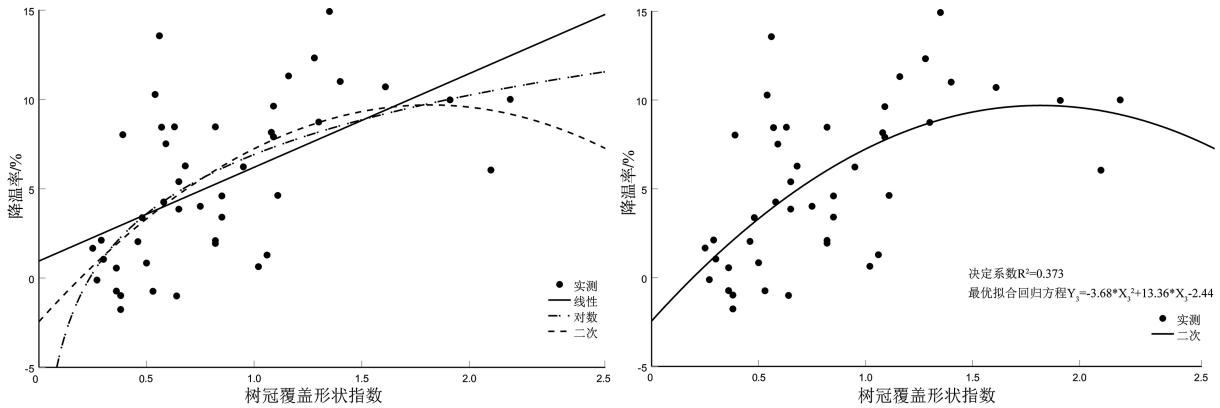


树冠覆盖斑块周长　　斑块周长与降温率最优拟合回归

图 6　林木树冠覆盖斑块周长与降温率回归分析

4　讨论

在建设用地受限的高原山地城市中，周天宇等[29]研究的曲靖马龙区案例与本研究共同发现，提升树冠斑块周长比单纯扩大面积降温效果更显著。本研究还发现，呈贡区树冠覆盖的形状指数降温效能最佳，这为研究区绿地建设提供了参考依据。同时，唐泽等[18]通过对树冠覆盖的垂直结



树冠覆盖斑块形状指数　　斑块形状指数与降温率最优拟合回归

图 7　林木树冠覆盖斑块形状指数与降温率回归分析

构研究发现，郁闭度与树高对降温效应影响显著，因此在城市建设中可科学配置乔-灌-草，优选更高的树种，最大化发挥植被降温效果。

针对呈贡区树冠斑块破碎化严重的问题，李承玺[28]和苏泳娴等[30]提出通过调整城市森林空间布局，构建有机生态廊道网络，增强斑块间的连通性和聚合度，进而从整体上改善城市热环境，提升城市的宜居性。目前，尽管人们对有机廊道有了新的认识，但廊道的连通方式和具体形式仍需深入讨论。在缓解城市热环境方面，有研究表明水体的降温效果显著[13,31]，向炀和周志翔[32]指出，水体形状越复杂、连通性越强，其降温效果越好。

综上，未来呈贡城市生态建设可实施“三维协同”优化策略：在垂直结构上，可通过增加乔木层郁闭度、选用更高的树种来增强降温效果；在水平格局上，优化斑块形态（形状指数控制在1.5~1.7）；在系统维度上，构建“复杂水体-高连通绿地”耦合系统，通过多维度协同优化，进一步缓解热环境效应，营造更舒适的人居环境。

受影像精度限制，研究未能区分乔木与灌木的热效应差异，未来建议采用更高分辨率影像数据，实现乔灌木分离监测。此外，由于研究篇幅的局限性，研究主要聚焦树冠斑块内部特征对降温效应的影响，后续可进一步分析外部因素对热环境调节机制，同时，建议开展三维立体分析，从群落结构等维度更全面、系统地揭示林木树冠对热环境的调节机制，为高原山地城市热环境改善提供更科学的规划依据。

5　结论

1）林木树冠覆盖与热环境动态变化。近 10 年来，研究区林木树冠覆盖面积有所增长，驱动生态环境显著提升；同时，热环境效应也得到改善，但高温区和极高温区仍占较大比例，热环境效应仍显著。

2）树冠覆盖与热环境的空间格局变化。2014—2023 年，林木树冠与热环境主轴均呈东北-西南方向，树冠覆盖呈“核心区集聚强化”的发展模式，生态得到改善；热环境空间离散性增强，有向外扩张的趋势，受城市化发展影响较大。

3）树冠覆盖与降温效果的关系。树冠斑块特征与降温率呈显著正相关，增加形状指数的降温效果最为突出；不同区间范围降温效果差异显著，且存在明显阈值效应。因此，在绿地建设受限的情况下，优化斑块形态比扩大面积更能提升降温效果。

参考文献

[1]黄曦涛,张瑜.西安市城市热岛效应强度定量研究与应用[J].测绘科学,2021,46(9):144-149.

[2]聂敬娣,张俊华,黄波.城市热岛效应对人体健康影响研究综述[J].生态科学,2021,40(1):200-208.

[3]王子安,孟庆岩,张琳琳,等.基于 CA-Markov 模型的海口市城市热岛模拟预测[J].中国科学院大学学报,2022,39(6):742-753.

[4]刘寿东,姜润,王成刚,等.南京夏季城市热岛时空分布特征的观测分析[J].大气科学学报,2014,37(1):19-27.

[5]徐晨曦,张曦文,吴玲玲.缓解城市热岛效应的通风廊道构建研究进展[J].中国城市林业,2024,22(2):42-48.

[6]邸俊楠,苏涛,雷波,等.基于“源-汇”景观格局的城市热岛效应及影响因素分析:以合肥市为例[J].中国环境科学,2023,43(11):6039-6050.
[7]赵晨晓,刘春卉,魏家星.缓解城市热岛效应的南京市绿色基础设施网络构建方法[J].浙江农林大学学报,2021,38(6):1127-1135.
[8]姚远,陈曦,钱静.城市地表热环境研究进展[J].生态学报,2018,38(3):1134-1147.
[9]李程蓉,陈天.缓解城市热环境的多层级“源-汇”景观网络构建[J].生态学报,2023,43(8):3068-3078.
[10]孟珂宇,徐丽华.基于 Landsat 数据的重庆市热环境时空格局变化研究[J].无线电工程,2024,54(3):751-758.
[11]郭继强,潘洁.基于 CA-Markov 模型的南京市热环境格局演变及预测分析[J].大气与环境光学学报,2020,15(2):143-153.
[12]王莹书,石培基,赵武生,等.兰州市热环境时空特征及影响因素研究[J].生态科学,2022,41(2):59-65.
[13]谢哲宇,黄庭,李亚静,等.南昌市土地利用与城市热环境时空关系研究[J].环境科学与技术,2019,42(增刊 1):241-248.
[14]贾宝全,王成,邱尔发,等.城市林木树冠覆盖研究进展[J].生态学报,2013,33(1):23-32.
[15]秦仲,巴成宝,李湛东.北京市不同植物群落的降温增湿效应研究[J].生态科学,2012,31(5):567-571.
[16]张艳丽,费世民,李智勇,等.成都市沙河主要绿化树种固碳释氧和降温增湿效益[J].生态学报,2013,33(12):3878-3887.
[17]丛丹,王蕾,贾佳,等.哈尔滨城市森林景观季节变化对地表温度影响的定量研究[J].中国城市林业,2024,22(1):34-42.
[18]唐泽,任志彬,郑海峰,等.城市森林群落结构特征的降温效应[J].应用生态学报,2017,28(9):2823-2830.
[19]李益敏,杨舒婷,吴博闻,等.昆明市呈贡区不透水面时空变化及驱动力分析[J].自然资源遥感,2022,34(2):136-143.
[20]徐高源,张磊,李正升.环滇池地区城镇用地时空演变及影响因素分析[J].生态经济,2025,41(5):99-107.
[21]姚佳,贾宝全,王成,等.北京的北部城市森林树冠覆盖特征[J].东北林业大学学报,2015,43(10):46-50,62.
[22]赵禾苗,阿里木江·卡斯木.基于 Landsat 数据的乌鲁木齐市热环境时空演化特征分析[J].生态科学,2021,40(6):21-29.
[23]JIMÉNEZ-MUÑOZ J C,SOBRINO J A,SKOKOVIĆD,et al.Land surface temperature retrieval methods from landsat-8 thermal infrared sensor data[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2014,11(10):1840-1843.
[24]李红,高皞,解韩玮.昆明市主城区热环境及其影响因素的时空演化特征[J].生态环境学报,2018,27(10):1916-1924.
[25]陈松林,王天星.等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J].地球信息科学学报,2009,11(2):145-150.
[26]贺三维,王伟武,曾晨,等.中国区域发展时空格局变化分析及其预测[J].地理科学,2016,36(11):1622-1628.
[27]赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.
[28]李承玺.北京首都功能核心区城市林木树冠覆盖对城市热环境的影响研究[D].北京:北京林业大学,2020.
[29]周天宇,朱坤,彭建松,等.曲靖市马龙区城市林木树冠覆盖与热环境的相关性[J].东北林业大学学报,2022,50(11):23-29.
[30]苏泳娴,黄光庆,陈修治,等.广州市城区公园对周边环境的降温效应[J].生态学报,2010,30(18):4905-4918.
[31]徐宏超,李春林,王昊,等.土地利用变化对京津冀热环境时空演变的影响[J].中国环境科学,2023,43(3):1340-1348.
[32]向炀,周志翔.蓝绿空间景观格局对城市热岛的影响[J].中国园林,2023,39(1):105-110.