不同城市热岛梯度下公园冷岛效应和景观特征的关联机制*

李春雨[1] 张 雨[1] 施 鹏[2] 陈思凡[1] 王钰茹[1] 梁 红[1] 王 凯[1,3]

1 青岛农业大学园林与林学院 山东青岛 266109
2 棕榈建筑规划设计（北京）有限公司 北京 100016
3 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

摘要：城市公园形成的冷岛效应已成为缓解城市热环境的重要途径之一。利用 Landsat 8 OLI-TIRS、Google Earth 遥感数据，通过辐射传导算法反演济南市 22 个公园的地表温度；采用缓冲区分析、多元统计和相关性分析等方法定量分析公园内部平均温度、公园冷岛效应与公园内部机理以及城市形态两大景观特征之间的关系；利用增长回归树模型初步探究景观特征的贡献能力。结果表明：1）不同城市热岛梯度下公园冷岛效应呈梯度变化，热岛等级高的公园，其冷岛效应更显著；2）当公园面积达到 200 hm^2、水体面积达到 45 hm^2、绿地面积在 80~100 hm^2时，公园的冷岛效应最佳，水体比绿地的冷却效果更强；3）建筑高度与冷岛效应相关性最显著，当建筑高度在 35~63 m 时，最大冷却距离随高度的增大而增加，过高过密且杂乱无序的建筑环境阻碍公园冷岛效应；4）内在机理对公园地表温度、最大冷却距离、冷却强度的贡献能力强于外部城市形态指标，外部城市形态对冷却梯度的贡献能力更强。因此，在不同城市热岛梯度下，将公园绿地、水体面积控制在阈值内，适当增加公园轮廓复杂度和不透水面积，并利用城市风廊增加公园冷空气溢出途径，能够改善公园周围热环境、提高人体舒适度。

关键词：热岛效应；城市公园；冷岛效应；公园地表温度；济南市
DOI：10.12169/zgcsly.2023.08.04.0004

Correlation Mechanism Between Parks' Cold Island Effect and Landscape Characteristics under Different Urban Heat Island Gradients

Li Chunyu[1] Zhang Yu[1] Shi Peng[2] Chen Sifan[1] Wang Yuru[1] Liang Hong[1] Wang Kai[1,3]
(1. College of Landscape Architecture and Forestry, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China; 2. Palm Architecture Planning and Design (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100016, China; 3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The cold island effect created by urban parks has become one of the important ways to alleviate the urban thermal environment. Using Landsat 8 OLI-TIRS and Google Earth remote sensing data, the paper inverted the surface temperature of 22 parks in Jinan City by means of a radiation transmission algorithm. The methods of buffer zone analysis, multiple statistics, and correlation analysis are adopted to quantify and analyze the relationship between the average temperature inside the parks, parks' cold island effect, the internal mechanism of parks, and two landscape features of urban morphology. The contribution of landscape characteristics is initially investigated using the growth regression tree model. The study finds:

收稿日期：2023-08-04
* 基金项目：国家自然基金青年基金（31800448）；青岛农业大学高层次人才科研基金（6631118009；6631119001）
第一作者：李春雨（1999-），女，硕士，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：lcy990127@163.com
通信作者：王凯（1980-），男，博士，副教授，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：dlwangkai@163.com

1) The park cold island effect presents the gradient changes under the different heat island gradients in the city. The park with higher level of heat island effect has the largely significant cold island effect; 2) When park area reaches 200 hm^2, water bodies reach the area of 45 hm^2, and the green area is between 80 and 100 hm^2, the best cool island effect of parks can achieve, while water bodies have better cooling effect than green spaces; 3) The correlation between the building height and the cold island effect is extremely significant. When buildings are 35-63 m high, the maximum cooling distance increases with the building height, and the overcrowded and disorderly buildings will not give play to parks' cold island effect; and 4) The internal mechanisms have greater contributions to park surface temperature, maximum cooling distance and cooling intensity than the external index of urban morphology, but urban morphology has a greater contribution to the cooling gradient. Hence, it is suggested that, under different urban heat island gradients, the thermal environment around parks as well as the human comfort could be improved through controlling the area of green spaces and water bodies in parks within the threshold, appropriately complicating park contours and increasing the impermeable area, and using urban wind corridors to make more cool air overflow.

Keywords: heat-island effect; city park; cold island effect; surface temperature of park; Jinan City

中国近几十年来的快速城市化导致城市地区地表温度升高，严重影响了环境的宜居性[1-3]。由于增加蓝绿空间被认为是缓解热岛现象最有前景的方法之一，城市公园整合了一部分蓝绿资源[4-6]。因此，城市公园对城市热环境的缓解作用受到广泛关注，而如何使城市公园发挥最大的降温作用成为解决城市热岛问题的焦点。

城市公园内的蓝绿空间，通过植被和水体的蒸腾、蒸发作用以及植被的遮荫功能调节城市热舒适度，使其比周围建成区更凉爽的现象被称为“冷岛效应”[7-10]。目前，国内外学者对公园冷岛效应的研究主要集中在公园冷岛效应的评估、驱动因素及规划设计[11-13]等方面。研究表明：公园的特征要素与冷岛效应相关，其冷岛效应主要受公园面积、公园形状、绿地水体覆盖率、下垫面组成等内在机理[14-16]的影响；景观格局和水体绿地的组成分布[17-18]对公园降温作用存在不同程度的影响；不同植被群落类型[19]对缓解热环境存在显著差异；相邻建筑类型（空间组成和配置）、高度等外部城市形态[20]也会对公园冷岛效应产生影响。然而，大部分学者对研究区的选择都忽略了区域气候这一条件，温度较高或者绿地覆盖率低的城市公园，其冷岛效应更强，因此需要对不同城市热岛梯度下公园冷岛效应的变化进行深入研究。

济南大规模城市建设加剧了城市热岛效应，如何利用有限的空间使城市公园的冷岛效应最大化是现阶段亟待解决的生态问题之一。本文基于 Landsat 8 影像采用辐射传导方程算法反演济南市的地表温度，基于 Google Earth 高分影像提取了 22 个城市公园作为研究对象，获取城市公园 9 个景观特征要素，采用缓冲区分析[21]、多尺度分割法[22]量化不同城市热岛梯度下公园的冷岛效应；利用相关性分析和增长回归树模型（BRT）[23]方法分析公园内在机理、外部城市形态指标对城市公园内部平均地表温度（LST）、冷岛效应的影响因素，并进一步探讨影响因素的贡献能力，以期为缓解城市热岛效应提供决策依据和参考。

1 研究区概况

山东省济南市总面积 10 244.45 km^2，素有“泉城”的美誉。随着城市化进程的加快，城市化率由 1992 年的 30.21% 增长至 2022 年的 74.3%，济南旧城区发展沿东西扩展，南北新主城区南起泰山、北至徒骇河。济南市以中心旧城区为城市中心，以章丘、平阴等为次中心城市，形成多中心城市空间格局。因此，本文选择的公园均在人口较多且建筑密集的新旧城区，热岛效应比较明显。

2 研究方法

2.1 数据来源

遥感数据来自地理空间数据云（www.gscloud.cn）的 Landsat 8 OLI-TIRS 卫星遥感影像数据和

2022 年济南市高分辨率 Google Earth 影像（www. earth. google. com）。影像数据预处理采用 ENVI 5. 3 和 ArcGIS10. 3 软件。成像时间为北京时间 2022 年 4 月 20 日 10 时 47 分，轨道号分别为 122/34、122/35，云量值分别为 0. 87、0. 66，云量较低，地面特征清晰，数据质量较好。

建筑 3D 模型数据来源于百度地图（www. map. baidu. com）、济南市规划和自然资源局（www. jinan. gov. cn）和水经注地图，包括建筑形态尺寸和占地面积等信息。

2. 2　地表温度反演

本文基于济南地区的 Landsat 8 影像以及辐射传导方程法对济南市地表温度进行反演。计算地表比辐射率（ε），进而计算体辐射亮度（$L\lambda$）和黑体热辐射亮度 B（T_S），并根据公式（1）计算济南市地表温度 LST。

$$LST = K_2/ln[K_1/B(T_S) + 1] \quad (1)$$

$$K_1 = 774.89W/(m^2\mu msr), \quad K_2 = 1\ 321.08K$$

式（1）中：LST 表示地表温度；B（T_S）表示为普朗克定律推到得到的黑体在 T_S 的热辐射亮度；K_1、K_2 分别表示 Landsat 8 卫星发射前预设的常量。

2. 3　城市热岛梯度划分

根据 Pan 等[22]的研究，利用 eCognition 软件采用分形网络演化算法（FNEA）对 LST 图像进行分割。FNEA 遵循异质性最小的原则，把光谱信息相似的邻近像元合并为一个同质的影像对象，分割后属于同一对象的所有像元都赋予同一含义。通过图像分割获得的具有均匀性和空间异质性的非重叠 LST 图像对象被称为热场元素，是城市热岛（Urban Heat Island，UHI）分析的基本单元。由于 LST 光栅数据缺乏灵活性，很难直接对 LST 图像进行空间分析，因此，用 FNEA 对 LST 图像进行分割而获得热场元素，便于后续对 LST 图像进行空间分析。

将 LST 图像导入 eCognition 软件，利用 ROC 曲线得到 LST 图像的最优分割尺度为 50，颜色及紧致度参数经过调试，分别取 0. 9、0. 5，最终获得 1 302 个热场元素。通过 Local Getis-Ord Gi * 指数识别统计显著性的热点和冷点，计算公式如下：

$$Gi^*(d)^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} W_{ij}(d)\, X_j}{\sum_{j=1}^{n} X_j} \quad (2)$$

式（2）中：W_{ij} 是 i 和 j 之间的空间连接矩阵；$W_{ij}=1$ 表示相邻；$W_{ij}=0$ 表示不相邻；X_j 是指 j 相对于 i 单位的观测值。

根据 Gi * 指数将 LST 图像划分成 7 个热岛梯度（图 1），将超高温区、高温区、次高温区、中温区定义为热岛区域。

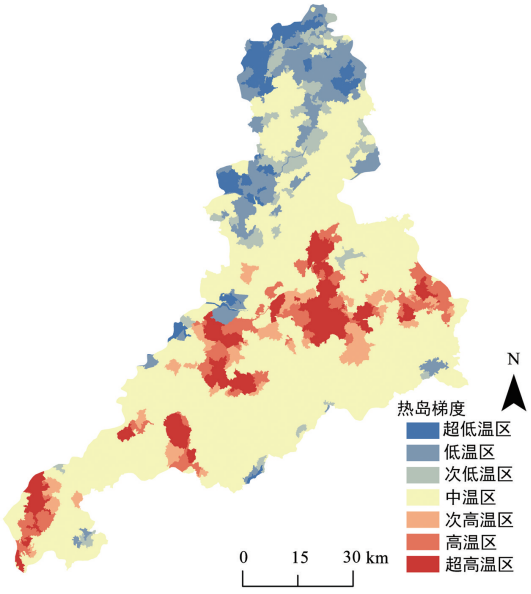


图 1　研究区城市热岛梯度

为保证公园样本选择的合理性、随机性，选取标准如下：1）位于城市热岛区域；2）公园周围不存在大面积水体、绿地、不透水面；3）山体公园海拔不超过 150 m；4）公园均在 2022 年建成开放，内部景观变化相对较少，近年来无明显变化；5）为探究公园冷岛效应与公园面积之间的关系，公园面积在 0~70 hm^2 均有选择，并根据 Zhu 等[24]的研究以及实际情况，按照面积将公园分为 4 大类：小型（0~4 hm^2）、中型（4~20 hm^2）、大型（20~50 hm^2）、超大型（>50 hm^2）。最终选取 22 个城市公园作为研究对象（表 1）。

2. 4　公园冷岛效应计算

利用缓冲区法计算城市公园的冷岛效应，利用最大冷却距离（L_{MAX}）、冷却强度（CPCI）和冷却梯度（CPCG）3 个指标量化公园的冷岛效应（表 2）。以公园边界，每间隔 30 m 建立环形缓冲带，提取公园和各个缓冲带的平均 LST。利用缓冲区和公园边界之间的距离以及每个缓冲带的平均 LST，建立平均地表温度与距离三次多项函数（图 2）。

表 1 济南热岛区域 22 个城市公园景观特征

公园名称	公园内在机理指标					外部城市形态指标				热岛梯度
	公园面积/hm²	公园周长/m	绿地/hm²	水体/hm²	不透水面/hm²	分形维数	高度/m	高度标准差	容积率	
黄台公园	3.72	941.54	2.80	0	0.92	0.025	23.64	15.21	0.90	中温区
人民公园	23.1	2 369.39	10.46	5.86	6.78	0.010	45.22	36.89	1.04	
洪山公园	36.23	4 651.53	30.14	0.05	6.04	0.012	56.61	41.54	1.75	
药山公园	42.14	3 555.10	34.79	0	7.35	0.008	21.09	12.55	0.90	
母亲河公园	55.23	3 440.71	25.93	5.58	23.72	0.006	20.30	16.44	0.92	
澄波湖公园	267.2	8 060.14	80.96	56.48	129.76	0.002	41.44	39.74	0.68	
万象运动体育公园	8.96	1 343.62	5.10	0.53	3.33	0.014	35.18	32.02	2.38	次高温区
奥舜公园	34.14	2 303.45	26.31	0	7.83	0.006	63.96	50.99	1.45	
舜玉公园	19.34	752.01	7.20	7.16	4.98	0.026	26.88	19.67	2.06	
百花公园	1.26	3 095.68	0.17	1.01	0.08	0.011	29.39	20.56	2.56	
泉城公园	73.9	3 824.89	53.75	2.74	17.41	0.005	24.29	24.46	1.65	
无影潭公园	1.98	696.49	0.64	0.93	0.41	0.032	29.60	22.10	2.56	高温区
还乡店公园	1.21	578.40	0.81	0	0.40	0.047	28.81	15.69	2.94	
金金公园	6.82	1 066.81	6.12	0	0.70	0.015	35.03	30.08	2.47	
云锦湖	39.46	2 682.98	15.62	12.18	11.66	0.006	22.52	18.65	1.74	
鲍山公园	53.33	3 384.66	44.47	0.82	8.04	0.006	38.05	27.71	0.40	
济南动物园	87.12	8 247.41	14.80	49.89	22.43	0.004	20.36	36.31	0.19	
中山公园	3.63	1 014.61	3.01	0	0.62	0.028	33.78	35.86	3.63	超高温区
唐冶公园	10.76	1 482.54	8.02	0	2.74	0.014	77.53	40.63	1.19	
花圃公园	12.33	1 575.18	10.28	0.14	1.91	0.012	30.06	25.39	2.00	
彩虹湖公园	49.36	2 921.70	26.59	14.65	8.12	0.005	25.10	14.24	0.47	
济南森林公园	79.06	4 120.07	62.65	4.01	12.40	0.005	12.64	20.10	1.38	

表 2 公园冷岛效应指数

类型	指数名称	公式
冷岛效应	最大冷却距离/m	L_{MAX} = 三次多项式第一转折点到公园边界的距离
	冷却强度/℃	$CPCI = T_{L_{MAX}} - T_G$
	冷却梯度/（℃/100 m）	$CPCG = \frac{CPCI}{LMAX}$

注：$T_{L_{MAX}}$表示三次多项式拟合曲线第一个峰值处的温度；T_G表示距三次多项式拟合曲线公园边界处温度。

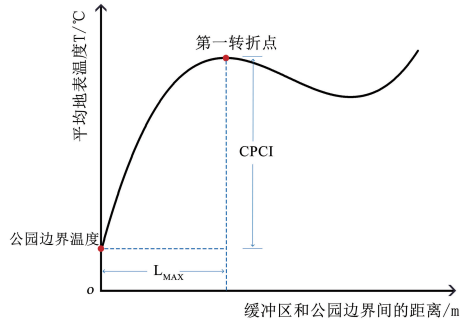


图 2 公园平均地表温度与距离三次多项式拟合曲线

2.5 数据处理

选用 BRT 评估公园 LST、冷岛效应与 9 个景观特征指标之间的耦合关系，并计算每个指标对 LST 和冷岛效应的贡献能力。BRT 迭代回归树的数量为 1 000，学习速率为 0.01，树的深度为 1，交叉验证为 10 倍，在 RStudio 中实现。

3 结果与分析

3.1 公园平均地表温度和冷岛效应的一般特征

图 3 显示，2022 年济南热岛区域呈多中心不规则式聚集分布。热岛区域内城市公园平均温度为 28.69 ℃，比市区平均温度低 2.12 ℃，具有明确的冷岛效应。图 4 显示，不同公园之间冷岛效应存在明显差异，公园 L_{MAX} 为 79.19～658.25 m，CPCI 为 0.8～4.91 ℃，CPCG 为 1.02～3.22 ℃ / 100 m。

本文从宏观层面出发，对不同热岛梯度下的公园冷岛效应进行比较，暂时不考虑绿地、水体、不透水面等公园内部结构异化所带来的影响。利用不同热岛梯度的公园冷岛效应平均值进行综合比较，结果（图 4）表明：不同城市热岛梯度下

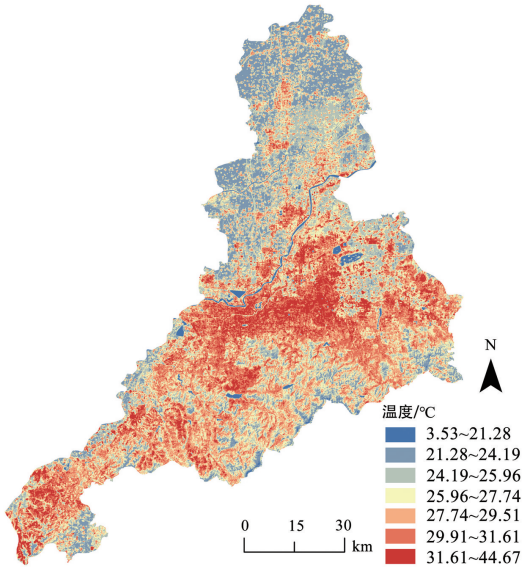
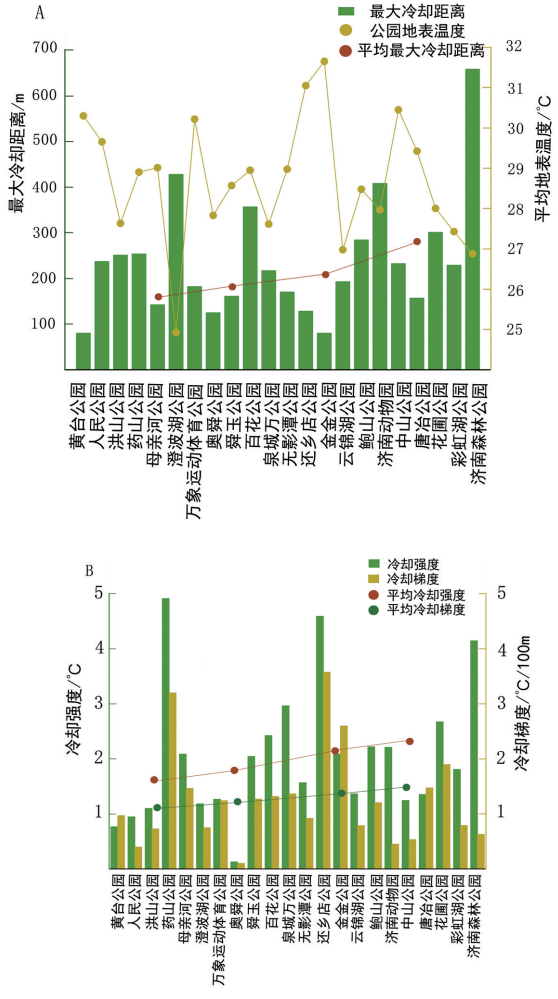


图 3　研究区地表温度反演



注：平均冷却距离、平均冷却强度、平均冷却梯度指中温区、次高温区、高温区和超高温区公园的平均 L_{MAX}、CPCI、CPCG。

图 4　公园平均地表温度和冷岛效应

公园冷岛效应呈梯度变化，其中热岛区域公园的平均 L_{MAX} 分别为 153.51 m、157.79 m、204.07 m 和 270.43 m；CPCI、CPCG 也随城市热岛梯度变化，热岛区域公园的平均 CPCI 分别为 1.18 ℃、1.76 ℃、2.34 ℃、2.24 ℃，平均 CPCG 分别为 1.1 ℃ /100 m、1.2 ℃/100 m、1.4 ℃ /100 m、1.5 ℃/100 m。

对比相同面积类型的公园在不同城市热岛梯度下的变化，发现选取的相同面积类型的公园内部机理。4 个超大型公园，中温区的澄波湖公园，次高温区的泉城公园，高温区的济南动物园，超高温区的济南森林公园 L_{MAX} 分别为 157.84 m，217.05 m，488.11 m，658.08 m，CPCI 分别为 1.19 ℃、2.21 ℃、2.96 ℃、4.15 ℃、CPCG 分别为 0.79 ℃/100 m、0.95 ℃/100 m、1.56 ℃/100 m、1.63 ℃/100 m。

公园冷岛效应呈梯度变化，这与城市热岛梯度息息相关。随着热岛等级的升高，温度每上升 1℃，公园平均 L_{MAX} 增加 38.92 m，平均 CPCG 增加 0.196 ℃，平均 CPCG 增加 0.121 ℃/100 m。中温区与次高温区之间，温度上升 1℃，公园 L_{MAX} 增加 2.11 m，CPCI 增加 0.007 ℃，CPCG 增加 0.008 ℃/100 m；次高温区与高温区之间，温度上升 1 ℃，公园 L_{MAX} 增加 77.55 m，CPCI 增加 0.962 ℃，CPCG 增加 0.249 ℃/100 m；高温区与超高温区之间，温度上升 1 ℃，公园 L_{MAX} 增加 173.35 m，CPCI 增加 0.249 ℃，CPCG 增加 0.11 ℃/100 m。

综上所述，超高温区的公园拥有最强的冷岛效应，中温区公园的冷岛效应较弱，在温度较高或者城市绿地覆盖较低的地方，城市公园的冷岛效应会更明显。

3.2　城市公园平均温度的影响因素

为探究公园 LST 和公园内部和城市外部景观特征之间的关系，对上述指标做拟合分析。图 5A～G 显示，公园 LST 与绿地面积的相关性最显著，R^2 为 0.651，与容积率的相关性较弱，R^2 为 0.309。

公园 LST 随公园周长（CPP）、面积（CPA）、绿地（CPG）、不透水表面（CPIL）面积的增大而减小，与分形维数（CPAR）、容积率（BPR）正相关。公园人工下垫面的适量增加，有利于空

气流通，能促进公园植被蒸腾和水体蒸发作用，降低公园 LST。图 5C、图 5G 显示：当 CPG 在 30 ~50 hm^2时，BPR 小于 1 时，公园 LST 基本无明显变化；CPG 达到 60 hm^2，随着 CPA 的增大，公园 LST 下降速率加快。图 5D 显示：公园 LST 与水体面积（CPW）呈三次多项式关系，当 CPW 在 0~12 hm^2时，CPW 与 LST 呈负相关；当 CPW 达到 40 hm^2，公园 LST 达到最大。

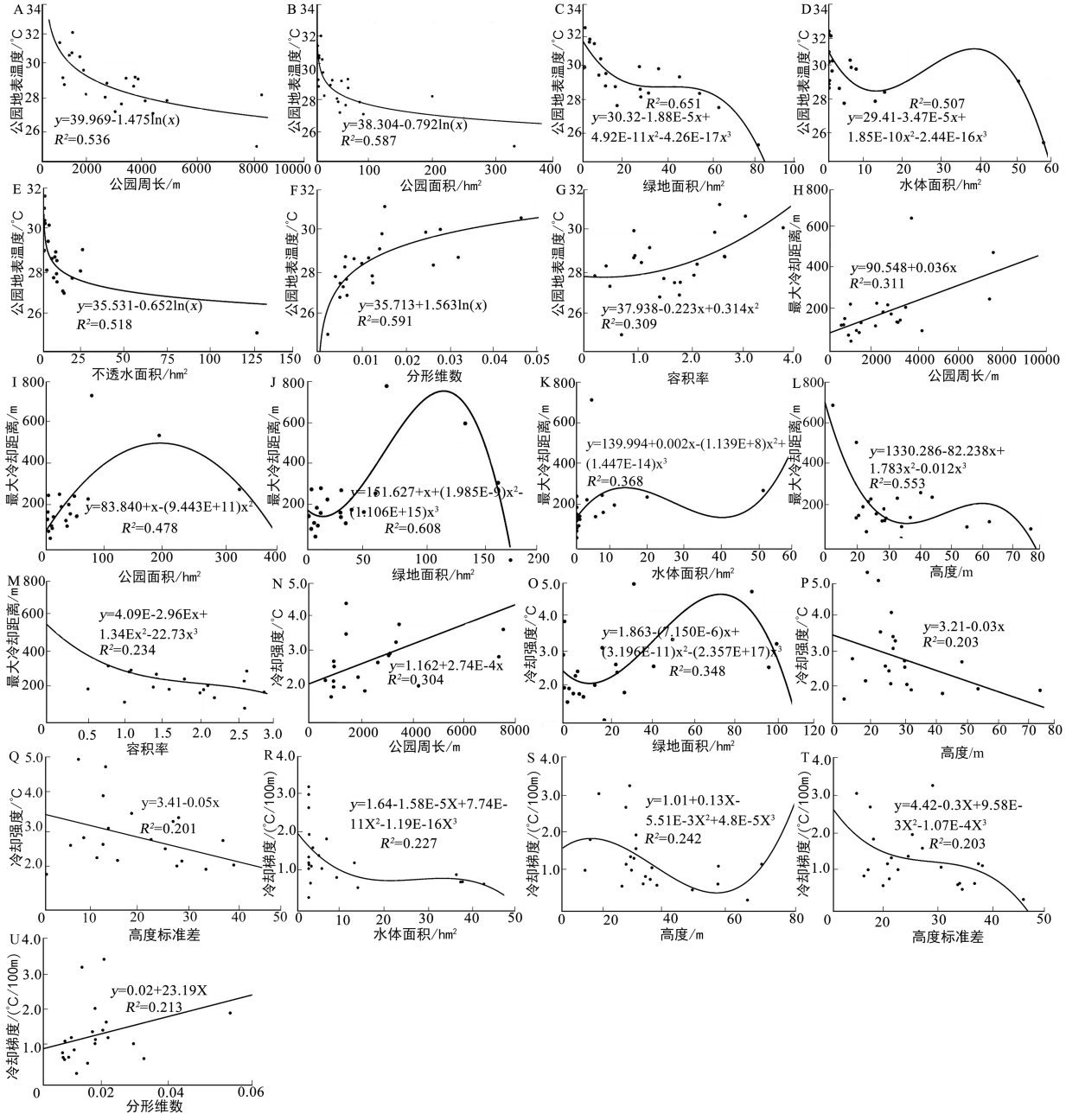


图 5　公园平均温度、冷岛效应与景观特征指标之间的关系

3.3　城市公园冷岛效应的影响因素

图 5H~M 显示：L_{MAX}与 CPG 的相关性最高，R^2为 0.608；与 BPR 的相关性最弱，R^2为 0.234。图 5I、图 5J 显示，当 CPA 达到 200 hm^2，CPG 达到 110 hm^2，L_{MAX}达到最大。图 5K、图 5L 显示，L_{MAX}与 CPW、MBH 呈三次多项式关系，当 CPW 在 15~40 hm^2时，L_{MAX}随 CPW 的增大而减小，MBH 在 35~63 m 时，L_{MAX}与 MBH 呈显著正相关。这是由于建筑越高，产生的阴影越大，能够遮挡部分太阳辐射以减少到达公园地表的净太阳辐射[33]，导致阴影区内公园 LST 降低，L_{MAX}增大。

图 5N~Q 显示：CPCI 与 CPG 的相关性最高，

R^2为 0.348；与标准差（BSD）的相关性最弱，R^2为 0.201。当 CPG 在 15～76 hm^2时，CPCI 与 CPG 正相关，CPG 达到 76 hm^2时，CPCI 达到最大。

图 5R～U 显示：公园 CPCG 与 CPAR、BSD 之间的相关性较弱，R^2分别为 0.213、0.203。CPCG 与 CPAR 正相关，公园形状越复杂，物质间的能量交换速率越快，公园“冷岛”与周边热环境的能量流交换效率越高，CPCG 增强。当 MBH 在 20～57 m 时，建筑越高，CPCG 反而越小，这是因为在此范围内，建筑高度越高，冷空气溢出范围越大，从而使公园内外温差变小，导致 CPCG 下降。

研究表明，当水体面积（CPW）达到 40 hm^2后，随着 CPW 的增大，L_{MAX}增大，CPCG 减小。其原因在于：水体可以吸收空气中热量并产生水蒸汽，降低公园 LST，随后通过地表水平压力的作用产生风，加速空气流动和热交换，使公园冷空气溢出范围增加；而 CPW 的增加，使公园与建成区之间的温差变小，导致 CPCG 降低。

3.4　城市公园平均温度、冷岛效应的 BRT

基于 RStudio 的 BRT 模型得到 9 个景观特征指标对公园 LST、冷岛效应的相对贡献，所有指标的贡献值和为 100。其中，分形维数（CPAR）对 LST 的贡献能力最强，相对贡献值为 36.94%；公园周长（CPP）、不透水面积（CPIL）的贡献能力最差，贡献值分别为 0.75%、0.47%。公园内部和城市外部景观特征对 LST 的贡献能力分别为 85.7%、14.3%。

数据处理分析结果表明，内在机理指标对公园冷岛效应的贡献能力强于外部城市形态指标。其中，CPA、CPG、CPW 和 CPP 对 L_{MAX}贡献能力分别 62.79%、14.36%、9.02%、7.6%；BPR 在冷岛效应指数中仅对 L_{MAX}有影响，且贡献能力最差，仅有 2%。CPW 对冷岛效应的贡献能力强于绿地面积，这是由于水体的高比热容能够吸收空气中更多热量[24-25]，因此水体比绿地的冷岛效应更显著。公园内部和城市外部景观特征对 L_{MAX}的贡献能力分别为 93.77%、6.23%。

内在机理指标中 CPP、CPG 对 CPCI 的贡献能力分别为 44.99%、20.22%，外部城市形态中 MBH、BSD 的贡献能力分别为 25.62%、9.17%。公园内在机理和外部城市形态对 L_{MAX}的贡献能力分别为 65.21%、34.79%。内在机理指标中 CPW、CPA 对 CPCG 的贡献能力分别为 26.05%、14.26%，外部城市形态中 MBH、BSD 的贡献能力分别为 48.89%、10.80%。公园内在机理和外部城市形态的贡献能力分别为 40.31%、59.69%。与 L_{MAX}、CPCI 指标不同的是，外部城市形态对 CPCG 的贡献能力更强，其原因是 CPCG 主要由公园内外温差决定。水体降低了 LST，复杂的公园形状加速了公园内外热量交换，二者在一定程度上改变了公园内外温差。建筑越高，建成区内的温度就越高，在 MBH 统一的情况下，建筑围合程度越高，公园降温通道受到阻碍，使大量热量聚集在建成区内，在二者的作用下，公园内外温差加剧。因此，外部城市形态更容易引起公园内外温差的变化。

4　讨论与结论

4.1　讨论

研究表明，不同城市的公园景观特征要素发挥冷岛效应的阈值不同。例如，杭州的城市公园面积控制在 100 hm^2时冷岛效应最强；厦门[10]、广州[27]、北京[28]的城市公园面积在 55 hm^2时，冷岛效应最佳；重庆[29]的山地公园面积阈值为 14 hm^2；济南城市公园面积达到 20 hm^2时，公园才能提供较好的降温效应[24]；王新军等[15]表明常州市公园的面积和周长分别在 26 hm^2和 3 600 m 范围内，公园降温效应较强；赵芮等[30]提出郑州城市公园绿地面积在 20 hm^2、水体比例在 15% 时，冷岛效应相对最佳；冯晓刚等[31]、钟秀惠等[32]表示水体比例在 30% 时，公园冷岛效应最佳。本文提出济南城市公园面积达到 200 hm^2、水体面积达到 45 hm^2、绿地面积在 80～100 hm^2时，冷岛效应最强。

对于上述景观特征阈值的变化，目前的解释只聚焦于公园特征要素、景观格局、城市建筑结构等方面的不同，忽略了公园热岛梯度变化带来的影响。热岛等级高的公园冷岛效应更显著，同一公园在热岛等级低的地方，冷岛效应不显著，如果想要提高公园的冷岛效应，需要增加公园面

积和绿地、水体等要素的面积，导致公园景观特征要素阈值发生变化。所以，热岛梯度也是影响公园冷岛效应的重要因素之一。

建筑高度和标准差对冷岛效应具有显著影响。高层建筑会缓解白天的热岛效应，研究表明，建筑高度在 35~63 m 时，与 L_{MAX} 正相关。当高度超过 63 m 之后，L_{MAX} 与高度负相关，Han 等[20]实地测量得到建筑高度在 66~96 m 时，高度每增加 1 m，绿地温度升高 0.035 ℃，对绿地冷却效果产生显著阻碍作用。本研究表明，CPCI、CPCG 与标准差呈负相关，过高过密、杂乱无序的建筑环境会增加城市的湿度，干扰城市通风环境，并通过蒸发和扩散作用减少公园冷却效果。这与胡瑶瑶等[29]研究结论一致，即杂乱无序、紧凑的建筑布局会阻碍山地公园冷岛效应的扩散。

此外，城市风廊的建设也会对公园冷岛效应产生影响。穿过城市公园的风廊可以促进树木遮荫和通风，从而缓解公园周围温度的急剧上升。利用公园周边建筑组合廊道和开敞道路形成城市通风廊道，增加公园冷空气溢出途径；适当增加公园轮廓复杂度和不透水面积，建设公园通风廊道，与城市通风廊道结合，改善公园周围热环境。

4.2 结论

不同城市热岛梯度下的公园冷岛效应呈梯度变化。超高温区公园的冷岛效应最强，中温区公园的冷岛效应最弱。

公园本身以及水体和绿地存在面积阈值，CPA 对冷岛效应的贡献能力最强，CPW 对冷岛效应的贡献能力强于绿地面积，CPIL 与冷岛效应无显著相关性。当 CPA 达到 200 hm^2、CPW 达到 45 hm^2、CPG 在 80~100 hm^2时，公园的冷岛效应最佳。

外部城市形态指标对冷岛效应指标均有影响。BPR 仅与 L_{MAX} 显著相关，MBH 与 L_{MAX} 呈三次多项式关系，且当 MBH 在 35~63 m 时，L_{MAX} 随 MBH 的增大而增加。

城市风廊的建设也会对公园冷岛效应产生影响。在不同城市热岛梯度下，将公园绿地、水体面积控制在阈值内，适当增加公园轮廓复杂度和不透水面积，并利用城市风廊增加公园冷空气溢出途径，能够改善公园周围热环境。

参考文献

[1]WANG C H, WANG Z H, KALOUSH K E, et al. Perceptions of urban heat island mitigation and implementation strategies: survey and gap analysis[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 66: 102687.

[2]樊柏青,刘东云,李丹宁,等.北京市六环内区域城市绿地对地表温度降温效益的差异性[J].中国城市林业,2022,20(4):43-50.

[3]REN Z Q, LI Z, WU F, et al. Spatiotemporal evolution of the urban thermal environment effect and its influencing factors: a case study of Beijing, China[J]. International Journal of Geo-Information, 2022, 11(5): 278.

[4]CHEN Y H, CAI Y B, CHUAN TONG C, et al. Quantitative analysis of urban cold island effects on the evolution of green spaces in a coastal city: a case study of Fuzhou, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(2): 121.

[5]YIN J, WU X X, SHEN M G, et al. Impact of urban greenspace spatial pattern on land surface temperature: a case study in Beijing metropolitan area, China[J]. Landscape Ecology, 2019, 34(12): 2949-2961.

[6]王凤霞,王一丁,严锦濛,等.海口主城区蓝绿空间时空演变及冷岛效应[J].海南大学学报(自然科学版),2023,41(1):66-78.

[7]SUGAWARA H, NARITA K, MIKAMI T. Vertical structure of the cool island in a large urban park[J]. Urban Climate, 2021, 35: 100744.

[8]赵海月,胡淼,朱建宁,等.高密度中心城区蓝绿空间冷岛效应及其影响因素:以北京五环路以内地区为例[J].生态学报,2023,43(12):4904-4919.

[9]陈力行,邓雅丽,张樱子,等.成都市城市公园景观特征的“冷岛效应”研究[J].中国园林,2023,39(5):132-138.

[10]花利忠,孙凤琴,陈娇娜,等.基于 Landsat-8 影像的沿海城市公园冷岛效应:以厦门为例[J].生态学报,2020,40(22):8147-8157.

[11]李程蓉,陈天.缓解城市热环境的冷源质量评估及优化策略[J].经济地理,2023,43(3):100-108.

[12]GAO Z, ZAITCHIK B F, HOU Y, et al. Toward park design optimization to mitigate the urban heat Island: assessment of the cooling effect in five U.S. cities[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 81: 103870.

[13]PENG J, DAN Y Z, QIAO R L, et al. How to quantify the cooling effect of urban parks? Linking maximum and accumulation perspectives[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 252: 112135.

[14]佟欣羽,曾令辉.热浪环境下大连城市公园景观特征对冷岛效应的影响[J].四川林业科技,2023,44(1):65-71.

[15]王新军,冯星莹,陈凯莉等.城市公园的冷岛效应研究—以常州市为例[J].中国环境科学,2021,41(9):4245-4252.

[16]宋菊芳,江雪妮,郭贞妮,等.城市蓝绿空间特征参数与地表温度的关联量化分析[J].中国城市林业,2023,21(1):20-26.

[17]仇宽彪,贾宝全,成军锋.北京市五环内主要公园冷岛效应及其主要影响因素[J].生态学杂志,2017,36(7):1984-1992.

[18]QIU K B,JIA B Q.The roles of landscape both inside the park and the surroundings in park cooling effect[J].Sustainable Cities and Society,2020,52:101864.

[19]RAKOTO P Y, DEILAMI K, HURLEY J, et al. Revisiting the cooling effects of urban greening: planning implications of vegetation types and spatial configuration[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2021,64:127266.

[20]HAN D R,YANG X H,CAI H Y,et al.Impacts of neighboring buildings on the cold island effect of central parks:a case study of Beijing,China[J].Sustainability,2020,12(22):9499.

[21]WANG T, TU H, MIN B, et al. The mitigation effect of park landscape on thermal environment in Shanghai city based on remote sensing retrieval method[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,19(5):2949.

[22]PAN J H. Analysis of human factors on urban heat island and simulation of urban thermal environment in Lanzhou city,China[J]. Journal of Applied Remote Sensing,2015,9(1):95999.

[23]ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees[J]. The Journal of Animal Ecology, 2008,77(4):802-813.

[24]ZHU W H, SUN J B, YANG C B, et al. How to measure the urban park cooling island? A perspective of absolute and relative indicators using remote sensing and buffer analysis[J]. Remote Sensing,2021,13(16):3154.

[25]杨艳,阎淑龙,王海涛,等.济南市城市公园降温效应分析[J].天津城建大学学报,2023,29(3):203-209.

[26]WU S J, YANG H, LUO P, et al. The effects of the cooling efficiency of urban wetlands in an inland megacity:a case study of Chengdu, Southwest China[J]. Building and Environment, 2021,204:108128.

[27]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.

[28]冯悦怡,胡潭高,张力小.城市公园景观空间结构对其热环境效应的影响[J].生态学报,2014,34(12):3179-3187.

[29]胡瑶瑶,谭少华,杨春.山地城市公园冷岛效应的影响研究:以重庆主城区公园为例[J].园林,2022,39(7):115-125.

[30]赵芮,申鑫杰,田国行,等.郑州市公园绿地景观特征对公园冷岛效应的影响[J].生态学报,2020,40(9):2886-2894.

[31]冯晓刚,石辉.基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究[J].生态学报,2012,32(23):7355-7363.

[32]钟秀惠,金荷仙,李胜,等.杭州公园绿地冷岛效应及其主要影响因素[J].中国园林,2022,38(9):75-80.

[33]DUAN S P,LUO Z W,YANG X Y,et al.The impact of building operations on urban heat/cool islands under urban densification: a comparison between naturally-ventilated and air-conditioned buildings[J].Applied Energy,2019,235:129-138.