

海口市滨水绿地空间对城市热缓解的响应

Response of Haikou Waterfront Green Space to Urban Heat Mitigation

张开月 许先升* 肖玉冰

ZHANG Kaiyue, XU Xiansheng*, XIAO Yubing

基金项目: 国家自然科学基金“耗散理论视野下街道空间活力形成机理实证研究—以海南湿热型旅游城市为例”(编号: 52268011)

摘要

气候变暖导致各类缓发性不利影响不断加剧, 适应气候变化, 优化绿地系统空间布局, 是缓解城市热岛效应的关键方法。采用 Landsat8 遥感影像反演出地表温度作为量化数据源, 评估海口市滨水绿地空间的降温效果, 定量分析绿地空间设计要素与降温效益之间的关系。结果表明: 滨水绿地空间的有效降温范围为 60 m, 30 m 缓冲区域内的降温效果最显著; 绿地空间边缘面积比与降温效益负相关, 其他空间要素与降温效益正相关; 降温效益受海水干扰的临界距离约为 2 300 m。最后提出构建绿地“点-线-面”网络布局等缓解城市热环境的绿地综合优化对策。

Abstract

Climate warming has led to the continuous intensification of various delayed adverse impacts. Adapting to climate change and optimizing the spatial layout of green space systems are key methods for mitigating the urban heat island effect. Using Landsat 8 remote sensing imagery to derive surface temperature as a quantitative data source, this study evaluated the cooling effect of waterfront green spaces in Haikou City and quantitatively analyzed the relationship between green space design elements and cooling benefits. Results indicate that the ratio of green space edge area is negatively correlated with cooling benefits, whereas other spatial elements show positive correlations. The critical distance for seawater interference affecting Haikou's cooling benefits is approximately 2 300 m. Finally, comprehensive optimization strategies for mitigating urban thermal environments are proposed, including establishing a 'point-line-surface' network layout for green spaces.

文章亮点

1) 引入 AIC 和 $RMSE$ 统计指标验证拟合模型优越性, 提取、测算并分析城市滨水绿地空间降温效益, 为城市空间降温研究提供方法; 2) 重点研究滨水绿地内部空间要素对城市热缓解的响应, 提出绿地综合优化方法, 为相关研究、城市高温环境应对策略及治理实践提供参考。

关键词

城市绿地; 热岛效应; 小气候; 降温效果

Keywords

Green space; Heat island effect; Microclimate; Cooling effect

收稿日期: 2025-02-26

修回日期: 2025-04-12

19 世纪初, 英国气象学者 Luke Howard 发现了城市中心气温比郊区高的现象, 首次提出城市热岛效应概念^[1]。2022 年, 联合国人类住区规划署发布的《2022 年世界城市报告: 展望城市的未来》指出, 城市化率将从 2021 年的 56% 提高至 68%, 到 2050 年全球城市人口将新增 22 亿^[2]。

随着水体、植被等自然景观被大量的硬质化人工景观所取代, 生态环境受到了不可逆的影响, 城市热环境问题加剧^[3]。城市热岛效应不仅威胁着人居环境的热舒适性, 更影响着人类健康福祉^[4]。

在我国, 城市滨水绿地空间指滨临江、河、湖、海等较

大型水体所建设的城市公共休闲绿地^[5]。滨水绿地空间的蓝绿景观元素对城区热环境具有显著的降温作用^[6]：植被的遮蔽和水蒸气蒸发能够有效减少近地面对热量的吸收；而作为“冷源”的水体具有较高的比热容和蒸发能力^[7]，其通过降低附近空气的温度增强冷却的效果，在缓解城市热环境方面具有不可替代的作用^[8]。海口市作为热带滨海城市，高温天气频发，给海口居民造成了很大程度的感官不适。但海口北濒琼州海峡，由于海水的温度低于陆地，在风、空气等因素的共同作用下，水体能够显著降低数百米范围内的温度^[9]。

目前，国内对滨海城市热缓解作用的研究多分布于暖温带和亚热带地区，包括上海市^[10-12]、北京市^[13-14]、武汉市^[15]、南京市^[16]等，较少关注热带沿海城市空间对城市热缓解的响应。已有研究多从宏观层面聚焦城市空间形态和景观格局对城市温度的影响，如张弘驰^[17]根据城市形态指标构建局地气候分区，蔡智等^[18]从山水格局入手研究滨海城市热环境，较少从某类型空间内部组成要素展开分析。虽然增加绿地空间能够降低地表温度，但面对当前土地资源珍贵且精细化管理现状，单纯增加绿地空间并非城市热缓解的长久之计。我国城市建设发展进入了存量时代，面临有效提升城市品质和应对气候变化的双重压力。探索具有高降温效益的绿地空间设计要素配置模式，合理利用绿地空间，在发挥绿地景观功能的同时起到更显著的生态作用，是缓解城市热环境问题的必要对策。

本研究基于遥感数据，结合相关研究成果，通过公式量化海口市滨水绿地的降温效益，分析绿地空间设计要素与降温效益的相关性，同时对绿地空间中水体的降温效益开展进一步探索。本文旨在揭示滨水绿地对热岛效应的缓解机制，因地制宜地提出缓解城市热效应的策略，为改善城市热环境提供科学依据。

1 研究范围

海口市是海南省发展建设速度最快的城市之一，自贸港的发展需求加快了其城镇化建设的步伐。随着城市化进程加快，人口密度增加，形成的高密度建成环境会加剧城市热岛效应^[19]。

《海口市国土空间总体规划（2021—2035年）》中明确指出，海口市呈现出滨海带状组团式城市布局。全市建设用地主要分布在北部滨海平原区，即中心城区。中心城区北临海岸线，南至绕城高速（G98-S82公路），东西则以海口市边界为界。城市公园主要依托建设区，也集中分布在中心城区内。根据总体格局规划，海口市正积极推进“一心两翼”的全域网络化发展战略，以中心城区作为“引擎”，带动海口市全域发展。中心城区是海口市全域空间资源配置优化的重点之一，将其作为研究范围，具有一定代表性和典型性。根据滨水绿地空间的相关概念，本研究利用百度地图获取公园 AOI（Area of Interest，兴趣面），并筛选出 18 处海口市滨水绿地空间作为研究对象（图 1）。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究使用来自美国地质勘探局（United States Geological Survey, USGS）的 Landsat 8 OLI_TIRS 遥感影像数据进行地表温度反演。因海口市研究范围内的 Landsat 数据近年来存在不同程度的云覆盖现象，故选取 2022 年 12 月 22 日云覆盖率为 0.07% 且成像较好的影像数据进行研究，其空间分辨率为 30 m。研究首先利用 ENVI 5.6 软件对遥感影像中的热红外波段进行重采样至 30 m，接着进行辐射定标和大气校正，裁剪出研究区范围。接着利用 Arcgis10.8 软件对海口市滨水绿地空间进行分区统计、栅格计算，得到各滨水绿地空间内的平均地表温度等研究相关数据。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感影像解译与地表温度反演

相关研究已表明地表温度与近地面气温存在着显著的线性关系，获取地表温度能够在一定程度上解释滨水绿地空间对周边环境的降温作用^[20]。研究利用 ENVI 5.6 软件采取大气校正法对研究范围遥感影像的地表温度进行反演和计算。

根据辐射传输方程式，卫星传感器接收到的热红外辐射亮度值 L_λ 的表达式为^[21]：

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

式（1）中， $L_{atm}^\uparrow$ 和 $L_{atm}^\downarrow$ 分别是大气上行和下行辐射亮度值， ε 为地表比辐射率， T_s 为地表真实温度， τ 是大气透过率。 $L_{atm}^\uparrow$ 、 $L_{atm}^\downarrow$ 由 USGS 提供的 Landsat collection2 Level-2 Surface Temperature Bands 数据集中的 URAD、DRAD、ATRAN 栅格数据乘以相应缩放系数后获取。由式（1）可推出相同温度下的黑体辐射亮度值 $B(T_s)$ 的计算公式为：

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

式（2）中 ε 采用 NDVI 阈值法^[22-23]进行计算，公式为：

$$\varepsilon = 0.004F_c + 0.986 \quad (3)$$

$$F_c = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (4)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (5)$$

式（3）和（4） F_c 中表示植被覆盖度。 $NDVI$ （Normalized Difference Vegetation Index）为归一化植被指数，通过计算近红外波段和红光波段之间的差异来量化植被覆盖情况，是区域中监测植被生长情况的重要指标； $NDVI_{soil}$ 是无植被覆盖区域的植被指数； $NDVI_{veg}$ 是纯植被覆盖区域的植被指数。

式（5）中， ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别是 Landsat 遥感影像近红外波段和红光波段的辐射亮度值。本研究采用的遥感影像中， ρ_{NIR} 对应 B5 波段， ρ_{RED} 对应 B4 波段。

地表真实温度 T_s 则利用普朗克公式计算获取，公式为：

$$T_s = \frac{K_2}{\ln \left[\frac{K_1}{B(T_s)} + 1 \right]} \quad (6)$$

式(6)中, K_1 和 K_2 为本文使用的 Landsat8 卫星传感器特定的定标常数, K_1 为 $774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, K_2 为 $1321.08 \text{ K}^{[24]}$ 。

2.2.2 空间要素选取

绿地空间大小、周长及边界的复杂程度是衡量空间特征的重要指标^[25]。绿色植物作为绿地空间的基本组成部分, 关联着植被覆盖程度, 是影响地表温度的重要因子; 且不同植被类型所产生的降温加湿效果不同^[26-27]。本研究在前人研究基础上^[28], 从影响滨水绿地空间降温效果的内部环境特征考虑, 采用皮尔逊相关性分析和曲线估计, 选取海口市各滨水绿地空间中的边缘面积比 $PAPR$ 、面积大小、植被覆盖度 FVC (Fractional Vegetation Cover)、高程方差、高程极差、蓝绿面积比、植被类型 7 个空间要素, 研究它们与降温效益的关系(表 1)。

2.2.3 降温范围和降温效益的确定

研究以遥感影像数据的最小分辨率 30 m 为单位, 沿各滨水绿地空间的边界建立缓冲区, 得到 600 m 范围内的 20 个多环缓冲区, 并将其作为滨水绿地空间的缓冲区, 统计各

个缓冲区内的地表温度, 计算滨水绿地空间的降温范围和降温效益。

通常使用降温幅度和降温范围 2 个指标评估绿地的降温效益。研究将各绿地周边建立的不同距离缓冲区的平均地表温度进行单独建模和曲线拟合, 得到地表温度与公园距离的变化关系。苏永娴等^[29-30]研究将温度拟合曲线由上升变为平缓或下降的位置作为“拐点”(图 2), 空间边界到“拐点”的距离则为降温范围, 空间内部与“拐点”缓冲区的温差则为降温幅度; 肖逸等^[31]研究亦发现随着与公园距离的增加, 降温幅度降低, 降温强度呈现对数函数的变化趋势。上述研究均以降温的最远距离作为降温范围, 但并非发挥显著降温作用的有效范围。殷若晨等^[32]研究表明有效降温范围内的降温幅度最能体现公园的降温作用, 并提出了城市公园降温效益的测度指标。本文参照其测度方式, 评估海口市滨水绿地空间的降温效益。公式如下:

$$\Delta T_{\text{降温}} = \frac{T_{\text{有效}} - T_{\text{公园}}}{T_{\text{公园}}} \quad (7)$$

式中, $\Delta T_{\text{降温}}$ 为绿地空间的降温效益, $T_{\text{公园}}$ 为绿地空间内的平均地表温度, 通过区域统计得出; $T_{\text{有效}}$ 为绿地空间在平均有效降温范围内地表温度的平均值。采用平均值计算方

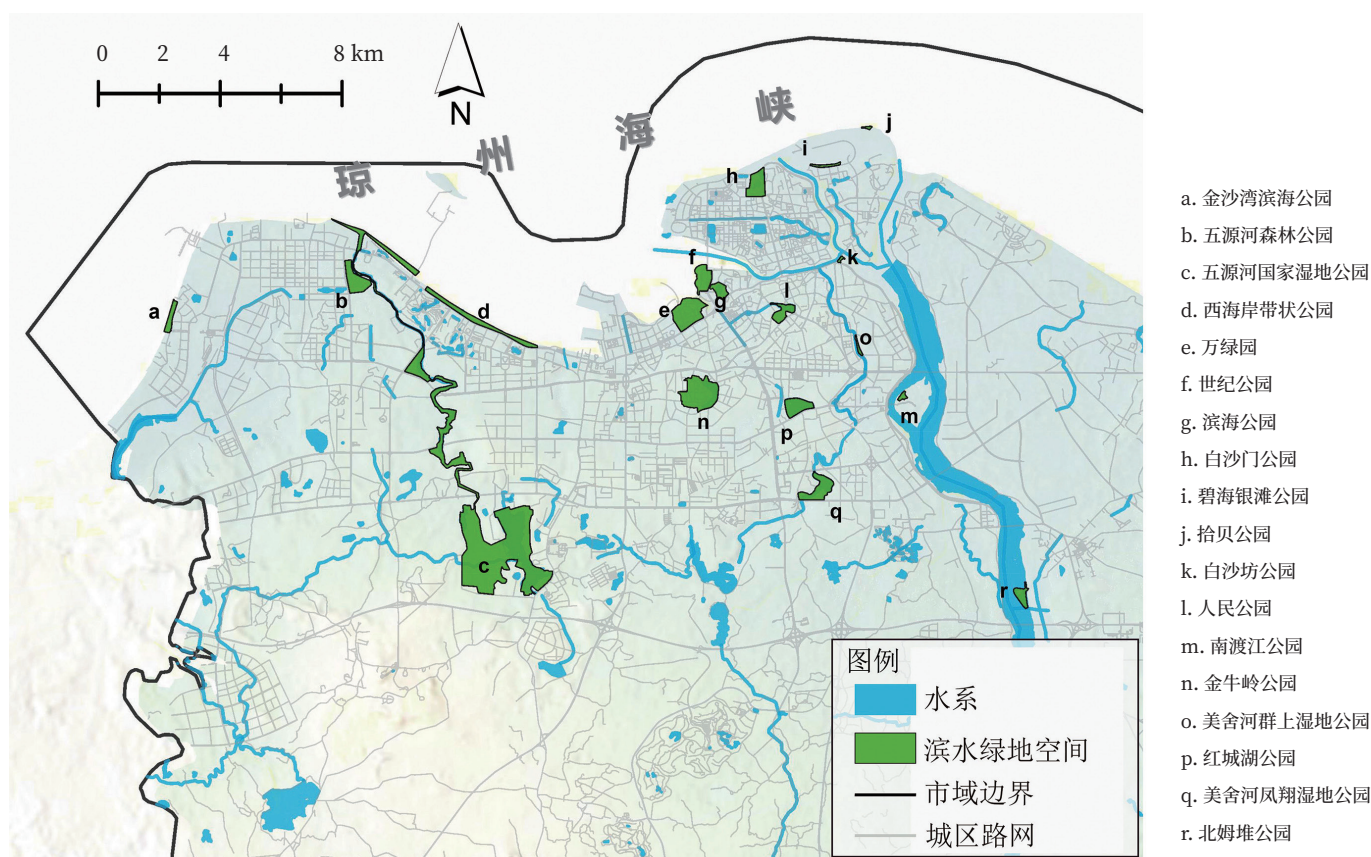


图 1 研究区滨水绿地空间范围

Fig.1 Scope of waterfront green space in the study area

表 1 海口市滨水绿地空间设计要素
Tab.1 Haikou city waterfront green space design elements

要素名称	计算 / 测量方式	说明	数据来源
边缘面积比 $PAPR$	$PAPR = P_c / P_a$	表示绿地空间形状规整度。式中 P_c 为边界周长, P_a 为空间面积	百度地图公园 AOI
面积大小	通过 ArcGIS 平台进行几何统计分析	表示绿地空间规模大小	
植被覆盖度 FVC	$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	表示绿地空间植被配置情况, 式中 $NDVI_{min}$ 为 $NDVI$ 值的 5% 分位数; $NDVI_{max}$ 为 $NDVI$ 值的 95% 分位数; $NDVI$ 为影像数据计算得出的指数	Landsat8 遥感影像波段计算
高程方差	$\sigma^2 = \frac{\sum (d - \bar{d})^2}{n}$	表示绿地空间地形设计的起伏变化。式中 d 为园内各高程值, $\bar{d}$ 为园内各高程的均值	中国 12.5 m 数字高程模型 (DEM) 数据
高程极差	$R = H_{max} - H_{min}$	表示绿地空间地形设计高差。式中 H_{max} 为高程最大值, H_{min} 为最小值	
蓝绿面积比	$V = W_a / D_a$	表示蓝绿空间的配置。式中 W_a 为空间内水体面积, D_a 为空间内绿地面积	Landsat8 遥感影像波段计算, Bigemapgis 软件测面积
植被类型	目视解译, 实地观测	绿地空间植物配置	Landsat8 遥感影像, 天地图

式, 一方面是基于对研究范围内滨水绿地空间温度变化趋势的综合考量; 另一方面, 相较于极值算法或加权平均算法, 其更具客观性、普适性与实用性, 同时也可兼顾准确性。

3 结果与分析

3.1 研究区地表温度分布特征

通过地表温度反演得到海口市当天的地表温度为 9~34 °C (图 3), 平均地表温度为 20.13 °C。海口市热岛效应集中在北部片区, 地表温度总体呈现“中间高, 四周低, 局部高温集聚”的特征 (图 4)。

1) 地表温度中间高。根据《海口市总体规划 (空间类 2015—2030)》^①, 城市建成区在海口市北部, 中心城区经过多年的累积发展, 已形成较为成熟的建成环境。该区域人口密度高, 绿地空间分布少且多在周边分布, 导致集中性热岛空间的形成, 即以海口保税区 (南海大道) 为中心, 主要由丘海大道以东、龙昆南路以西、南海大道以南、椰海大道以北组成的集中性热岛空间 (图 3)。

2) 地表温度四周低。海口市现状为单中心的空间格局, 四周发展进程较为缓慢。海口市中部地区多为生态绿地, 其作为海口市的生态屏障禁止开发 (图 4); 南部农林区域多分布乡镇, 人口密度低, 拥有大面积的山地、林地和水域, 地表温度较低, 营造出较为舒适的小气候 (图 5)。

3) 地表温度局部高温集聚。海口市与一、二线城市相比, 经济基础较为薄弱, 中心城区多存在城中村、棚户区, 城镇化发展正处在转型更新期。热岛区域随着城镇化发展而扩散到周边城区, 因此出现了局部高温的现象, 且多在沿海城市建设区。

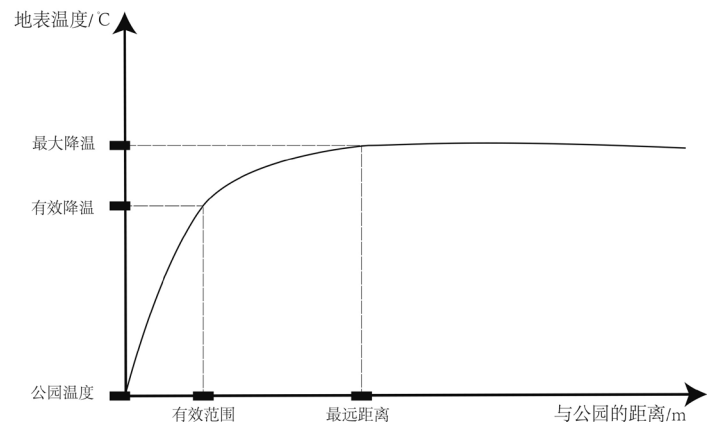


图 2 有效降温范围界定

Fig.2 Definition of the effective cooling range

3.2 滨水绿地空间的降温范围

研究发现绿地空间能够干预“热岛”的形成, 对周边环境产生一定的降温作用。在 Arcgis10.8 中围绕滨水绿地空间周边构建 20 个缓冲区, 随后分别将这些缓冲区、18 处滨水绿地空间与反演所得的地表温度叠加分析, 通过分区统计、栅格计算, 得到各缓冲区以及滨水绿地空间内的平均地表温度。以缓冲区与滨水绿地空间的距离为自变量, 缓冲区内平均地表温度为因变量, 在 spss 27 中对两者进行温度曲线拟合, 通过计算比较线性、指数、二次、三次拟合的赤诚信息准则 AIC (Akaike Information Criterion) 以及均方根误差 $RMSE$ (root mean square error), 发现三次拟合效果最佳, 且三次曲线模型的 R^2 均值为 0.78 (中位数为 0.81),

① 资料来源于海南省人民政府网站 <https://zzgj.haikou.gov.cn/ztzl/hqjyys/14xxgk/202404/t1353493.shtml>。

其中 70% 的模型 R^2 不低于 0.7, 50% 的模型 R^2 不低于 0.8, 拟合效果较好(表 2)。这说明滨水绿地空间对周边环境在一定范围内具有热缓解效果, 超出范围后周边环境的温度几乎不再受滨水绿地空间的影响。在得到各空间的温度拟合曲线后, 计算各空间的有效降温范围, 并计算平均值作为海口市滨水绿地空间的平均有效降温范围。计算结果显示, 平均在 60 m 范围内降

温幅度最大, 60~120 m 内温度变化逐渐放缓, 超过 120 m 后, 绿地空间的降温作用微弱。故海口市滨水绿地空间的平均有效降温范围为 60 m, 研究以此结果进行降温效益的计算。

3.3 滨水绿地空间对周边环境的降温效益

3.3.1 缓冲区距离与降温效益的关系

8 个滨水绿地空间(万绿园等)随着缓冲区距离增加, 平均地表温度呈

现不规则下降的趋势, 其余空间(金牛岭公园等)均先升高后降低。通过计算所有滨水绿地空间与各个缓冲区之间的平均温差发现, 当缓冲区距离滨水绿地空间为 30 m 时温度变化最为明显。研究发现, 随着滨水绿地与缓冲区距离的增加, 温差变化未呈现出较为规律的递增或递减趋势。同时海口市滨水绿地空间存在多处降温效果不显著的情况。这说明滨水绿地空间的降温效果易受周围缓冲区环境组成成分的影响, 尤其是当周边存在大面积水体时, 滨水绿地空间的降温效益呈现负响应。

3.3.2 降温效益结果分析

运用公式 (7) 计算得到滨水绿地空间降温效益为 -3.73%~9.07%, 8 个滨水绿地空间的降温效益为负值(图 6)。其中, 红城湖公园的降温效益值最高, 为 9.07%, 金沙湾滨海公园和滨海公园的降温效益值较低, 分别为 0.26%、0.29%。在呈现负响应的滨水绿地空间当中, 世纪公园的降温效益绝对值最大, 说明其受周边环境的影响程度最大; 北姆堆公园降温效益的绝对值最小, 说明其受周边环境的影响程度较小。

3.4 滨水绿地空间要素对降温效益的影响

通过相关性分析与回归模型验证

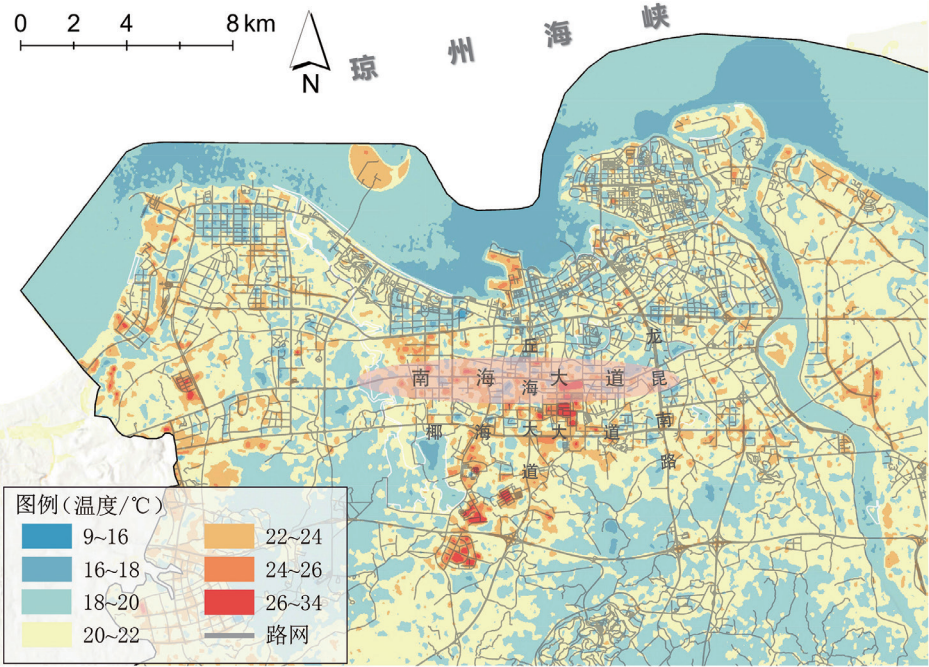


图 3 地表温度反演结果
Fig.3 Surface temperature inversion results

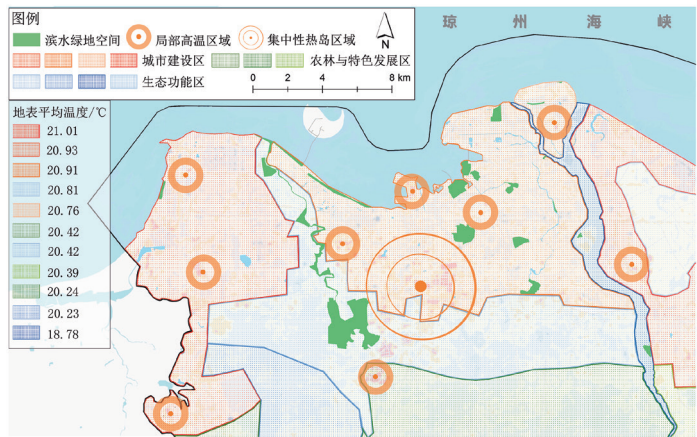


图 4 海口市地表温度特征的空间分布
Fig.4 Spatial distribution of surface temperature characteristics in Haikou city

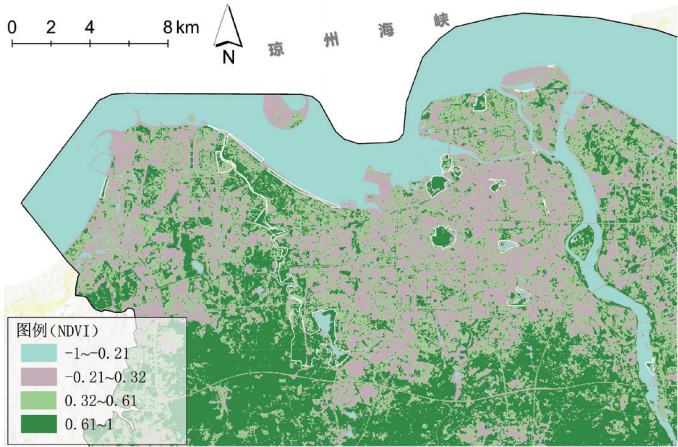


图 5 归一化植被指数的空间分布
Fig.5 Spatial distribution of normalized vegetation index

发现,滨水绿地空间的降温效益受多要素协同作用,呈现“整体要素影响显著,单要素影响差异化”的特征。仅边缘面积比直接影响近地表降温效益(线性相关),面积大小、蓝绿面积比、地形变化与降温效益呈现对数回归趋势,植被覆盖

表 2 空间温度曲线回归及有效降温范围结果

Tab.2 Results of spatial temperature curve regression and effective cooling range

绿地空间编号	AIC	RMSE	R ²	有效降温范围/m	显著性	拟合曲线类型
a	-41.07	0.07	0.936	30	$P<0.001$	三次
b	-2.14	0.18	0.579	30	$P<0.010$	三次
c	-29.54	0.09	0.797	90	$P<0.001$	三次
g	-35.84	0.08	0.957	90	$P<0.001$	三次
h	-47.38	0.06	0.928	60	$P<0.001$	三次
l	-8.18	0.16	0.540	90	$P<0.010$	三次
n	-27.34	0.10	0.889	60	$P<0.001$	三次
o	4.13	0.21	0.721	60	$P<0.001$	三次
p	9.87	0.24	0.596	90	$P<0.001$	三次
q	-14.84	0.13	0.818	120	$P<0.001$	三次

注: 18个滨水绿地空间中有8个空间平均地表温度高于周边缓冲区温度,不具有降温作用,故只对具有降温作用的10个空间进行温度曲线回归。

度与降温效益则呈现三次回归趋势。植被类型要素方面,经均值比较发现植物丰度最高的景观植物群(以下简称“植物群落”)的降温效果优于疏林草地(图7)。

3.4.1 边缘面积比

海口市滨水绿地空间的边缘形态整体表现为:沿滨水岸线分布的空间边缘形态较规整,在城市内部分布的空间边缘形态较为复杂(图8)。滨水岸线周边因开发力度大,滨水绿地空间形成受到的约束少;城市内部受规划开发后,滨水绿地空间的形成更易受限。边缘面积比越大,降温效益值越

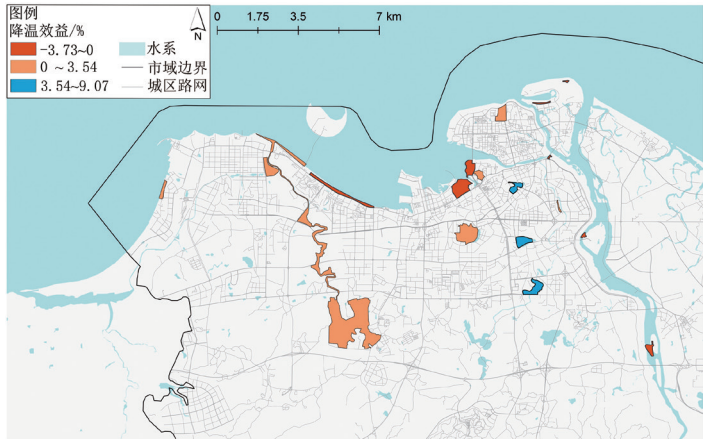


图6 降温效益的空间分布
Fig.6 Spatial distribution of cooling benefits

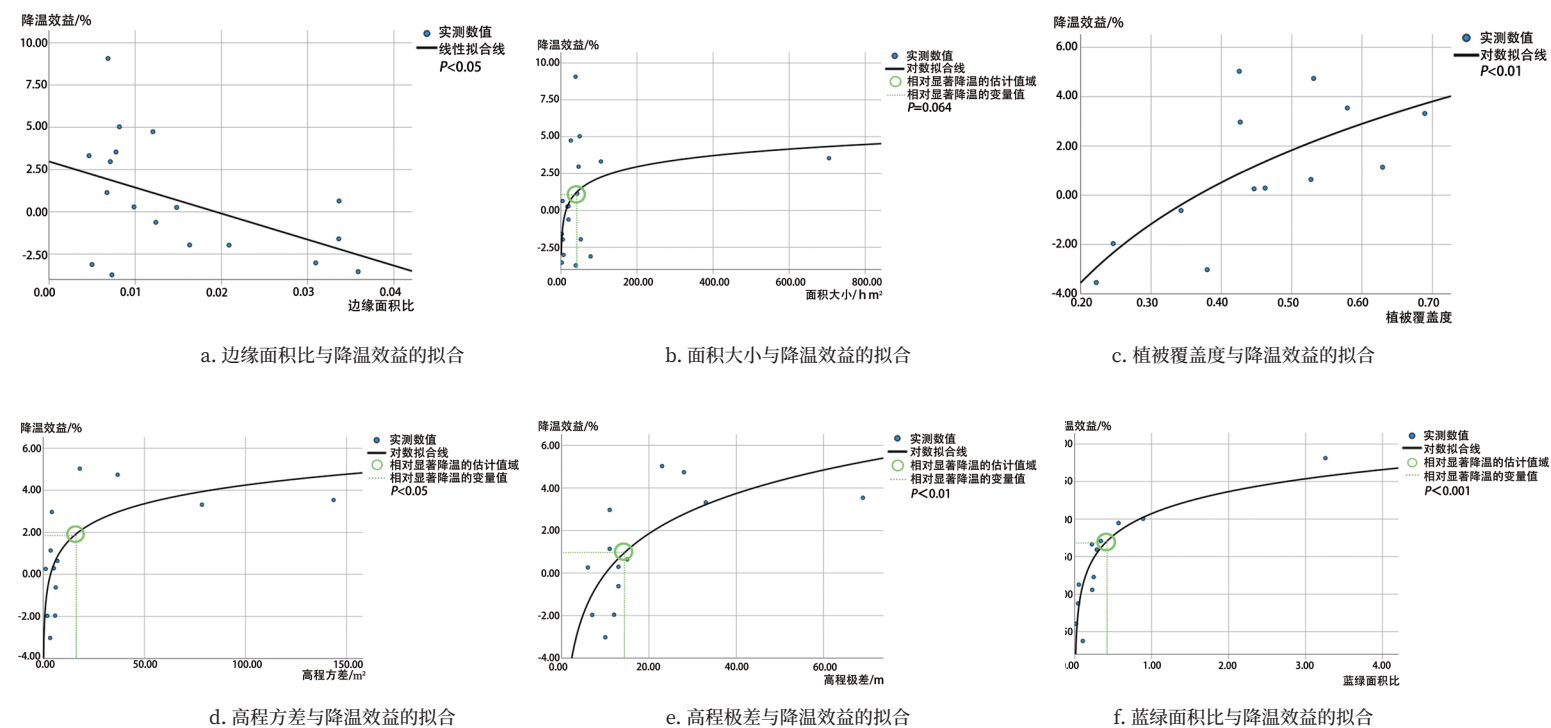


图7 降温效益与空间要素的拟合关系
Fig.7 The relationship between cooling benefits and spatial factors

小, 两者呈现显著负相关关系(图 7-a)。对于 2 个面积相近的公园, 存在着边缘周长越长降温效益值越大的特殊情况。例如美舍河凤翔湿地公园呈长茄型, 与呈半矩形的五源河森林公园相比, 其空间边界更长, 降温范围更广, 降温效益更高。

3.4.2 面积大小

海口市滨水绿地空间面积大小与降温效益整体呈正相关关系, 但并不显著($P=0.064$)随着空间面积的增大, 降温效益值也增加。无论是大型还是小型绿地空间, 降温效果与空间所处地理位置密切相关。大型绿地空间(面积大于 50 hm^2)如五源河国家湿地公园, 面积高达 704.93 hm^2 , 因其处于生态功能区, 受外界干扰少, 周边温度较低, 绿地空间内平均温度与周边温度的差值小, 故降温效果并不显著。小型绿地空间(面积小于 10 hm^2)因其自身更易受周边热环境的影响, 发挥热缓解作用的能力有限, 难以形成稳定明显的降温效果(图 9)。中型绿地空间(面积为 10~50 hm^2)相对于大型绿地空间和小型绿地空间而言, 降温效果发挥较为稳定(图 7-b)。

3.4.3 植被覆盖度

植物的蒸腾、呼吸、遮荫作用对绿地空间可持续热缓解功能提供支持。海口市植被覆盖度整体呈四周高, 中心低, 且绿地分布较为分散(图 10)。在分析海口市滨水绿地空间植被覆盖度与降温效益的关系时, 首先去除万绿园、世纪公园、白沙坊公园、南渡江公园以及红城湖公园 5 个空间的相关异常值, 其因受内外部水体影响较大, 将影响 2 个变量间的统计结果与关系分析。从相关性分析结果来看, 植被覆盖程度越高, 绿地空间降温效益值越大, 两者呈现显著正相关关系(图 7-c)。

3.4.4 地形变化

研究提取各空间高程数据, 通过计算高程方差和高程极差分析海口市滨水绿地空间的地形变化。除拾贝公园外, 其他滨水绿地空间均具有地形变化。从相关性分析结果来看, 高程方差和高程极差 2 个要素与降温效益均呈现非线性对数关系, 高程方差与降温效益的相关程度较弱于高程极差。拟合结果说明海口市滨水绿地空间的降温效益存在受地形变化影响的情况, 且在一定阈值内, 地形高差值增加会显著提升降温效益, 而空间内的地形起伏变化并无明显作用。海口市滨水绿地空间高程方差的有效阈值约 18 m^2 ; 高程极差的有效阈值约 15 m(图 7-d、e), 超出 15 m 后, 地形高差值对降温效益的影响减弱。

在绿地空间设计中营造地形可增强观赏和生态价值。但因空间内外水体对降温的作用远超地形变化对降温的影响, 故未对万绿园、世纪公园等 5 个绿地空间进行分析。地形营造无需追求地形起伏的多元化以及高落差, 将其控制在一定范围内, 即可发挥观赏和生态功能双效用。

3.4.5 蓝绿面积比

水体起着连接绿地空间的作用, 由蓝色空间与绿色空间组成的复合网络系统在城市降温效果方面比单一系统更

强^[33]。研究范围内同时存在水体、绿地 2 个生态元素的滨水绿地空间占比约为 67%, 即小部分滨水绿地空间内部只存在绿地要素, 无水体要素。综合分析结果来看, 滨水绿地空间内部蓝绿面积比与降温效益值呈现显著相关性, 两者为非线性的对数关系, 在蓝绿面积比约为 2 : 5 时, 降温效益达到有效阈值。当蓝绿面积比超出阈值时, 降温效益逐渐减弱(图 7-f)。虽然随着水体要素的比例加大, 降温效益值呈现缓慢增加趋势, 但平均单位面积水体的降温效益下降。在实地工程设计中, 一方面需考虑设计的实用性, 另一方面需考虑工程建设经济性, 水体面积越大, 建设成本越高。

3.4.6 植被类型

已有研究揭示了当绿地空间所在地理位置、面积等因素相似时, 其地表温度与内部植被类型相关^[13]。本研究通过

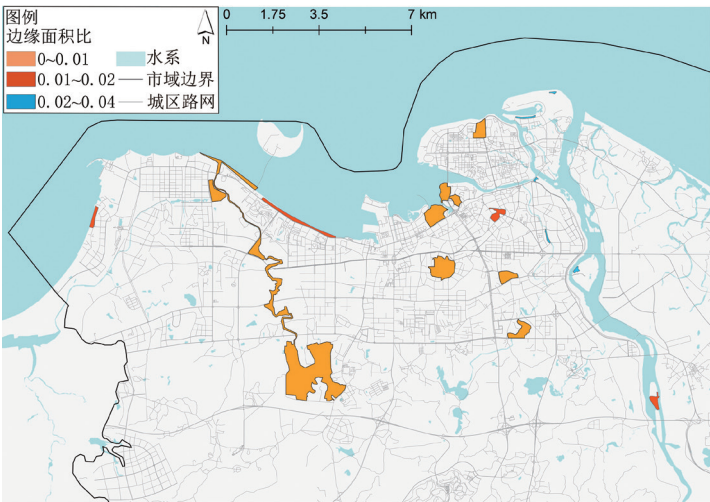


图 8 边缘面积比的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of PAPR

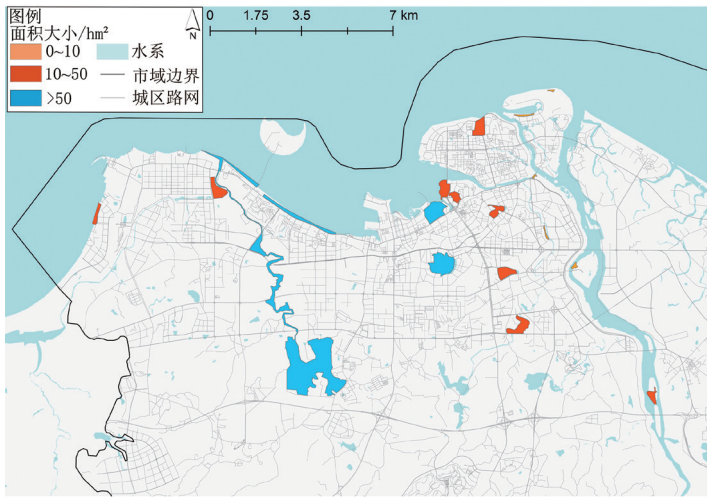


图 9 面积大小的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of area size

目视解译提取滨水绿地空间的植被类型，并分析海口市滨水绿地空间植被类型与降温效益的关系（图 11）。海口市滨水绿地空间的植被类型以植物群落、疏林草地 2 种模式为主，通过对空间地表温度进行均值计算与比较发现，植物群落模式的空间地表温度均值为 20.02℃，疏林草地模式的空间地表温度均值为 20.56℃，植被类型丰富的空间地表温度平均值低于植被类型较单一的空间。而对比地理位置与面积相似的空间，如南渡江公园（植被类型为疏林草地）的地表温度高于美舍河群上湿地公园（植被类型为植物群落）；世纪公园（植被类型为疏林草地）的地表温度高于滨海公园（植被类型为植物群落）。总之，海口市滨水绿地空间植被类型中，植物群落的降温效果优于疏林草地。

3.5 绿地到海岸线距离对降温效益的影响

海口市作为沿海城市，其地表温度受到海洋气候的显著影响。本研究通过 bigemapgis 及高德地图测距工具测量绿地到海岸线的距离，分析其与绿地降温效益的关系。考虑到海口市海岸类型多样，在进行距离计算时较为复杂，研究采用最短距离计算方式对绿地中心到海岸线距离进行评估（表 3）。研究发现，从整体上看，绿地中心到海岸线的距离与降温效益呈正相关，但相关性并不显著（ $P=0.401$ ）。为获取海水影响绿地空间降温效益的有效量值，研究以绿地中心距离海岸线 2 500 m 为分段值，将滨水绿地空间分为 2 组进行分析。结果表明，当绿地中心到海岸线的距离小于 2 500 m 时，其与降温效益呈现显著的正相关性（ $P<0.05$ ）。在此范围内，随着距离的增加，降温效益值升高，绿地空间自身的降温效果愈发明显。当距离超过 2 500 m 时，两者的相关关系不再显著，这说明绿地空间的降温效益受海洋影响较小，甚至不再受其影响。通过进一步量化分析，海水对绿地空间降温效益的有效影响量值约为 2 300 m。在这一范围内，滨水绿地空间的降温效益会随着距离的缩短而受到海水的显著影响，其自身的降温效果没有充分发挥。超出 2 300 m 后，绿地空间的降温效果与海水无显著关系。

为尽可能地减弱其他环境因素对分析结果产生的影响，研究按照降温效益值的正负将绿地分为 2 组进行相关性分析。结果显示，降温效益为负值的滨水绿地空间的中心到海岸线距离与降温效益值呈现显著正相关性（ $P<0.05$ ）；而降温效益值为正的绿地，这种相关性并不显著（ $P=0.097$ ）。这说明海口市滨水绿地空间会因与海岸线距离的差异，呈现出不同的降温效果。即距离海岸线越近，部分滨水绿地空间的降温效益值越低，还会出现降温效益值为负值的情况。部分距离海岸较远的绿地空间，也会出现降温效益为负值的现象，这是因为其自身所处地理位置、环境组成成分等因素占主导。

4 缓解城市热环境的绿地综合优化策略

4.1 以“点”带“面”，以“线”相连

城市热缓解并非局部热缓解，应当系统性分析。当前海

口市滨水绿地空间整体呈“点”状零散分布，线性空间也未发挥良好的连接绿地的功能，还未形成合理的“点-线-面”绿地空间格局。因此可通过以“点”带“面”，以“线”相连，

表 3 绿地到海岸线的距离
Tab.3 Distance from green space to coastline

绿地空间编号	距离 /m	绿地空间编号	距离 /m	绿地空间编号	距离 /m
a	78	g	438	m	6 900
b	1 321	h	525	n	2 323
c	1 502	i	1 100	o	3 816
d	141	j	50	p	4 207
e	379	k	3 790	q	6 917
f	215	l	1 152	r	10 500

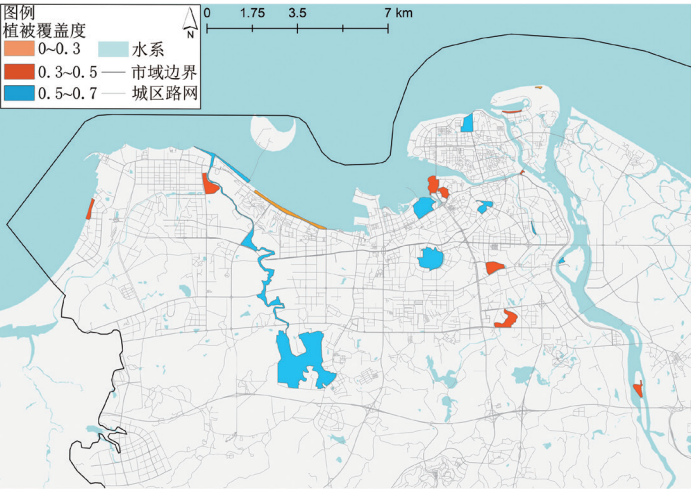


图 10 植被覆盖度的空间分布
Fig.10 Spatial distribution of fractional vegetation cover

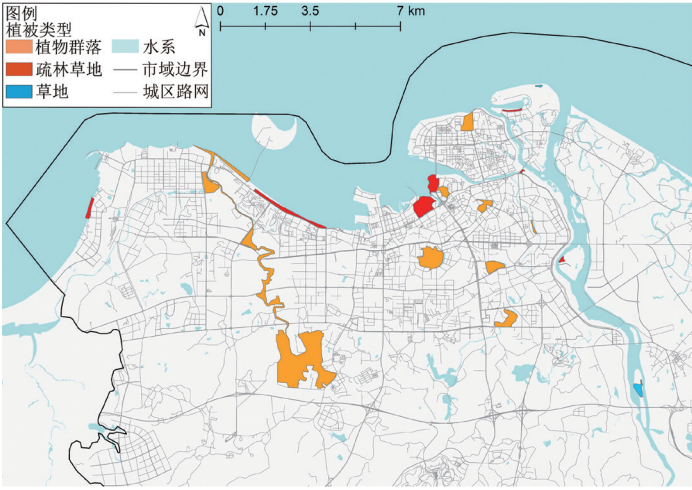


图 11 植被类型的空间分布
Fig.11 Spatial distribution of vegetation form

优化“点”作用,规划“线”连接,促进“面”降温。具体方式如下:

1) 优化设计,注重效益。根据分析结果可知,绿地空间的降温效益存在阈值,且空间设计要素对降温效益有明显影响。可通过修整绿地边界,降低边缘面积比;适度扩大绿地面积;增加植物群落模式的配置;调整地形极差;引入水体,合理调整蓝绿配比等措施,按照设计阈值在适宜尺度下进行绿地空间优化设计,提升降温效益,实现成本投入最小化与缓解城市热环境效果最大化的平衡。

2) 增绿补绿,实现连接。连通各绿地是提升整体降温效益的关键。首先应综合考虑城市结构,包括道路、生态廊道等,再进行绿地空间的补充,同时提高绿地连通性,提升空间热缓解的整体性。

3) 瞄准热区,重点填补。如海口市秀英区中心片区的绿地类型多为居住区绿地,缺乏综合滨水绿地空间,与周边绿地不连通。应重点针对此类区域的绿地建设,通过填补绿地网络,形成完整的“点-线-面”绿地系统空间模式。

4.2 资源整合,集约高效

海口城市绿地主要以滨水绿地空间为主,其他绿地在构建缓解城市热效应的绿地网络格局中同样不可或缺。因此需先对海口市绿地资源进行统筹整合,再规划完善绿地网络格局。同时,气候的变化莫测警醒有关部门应有效合理地利用资源。在宏观层面上,相关规划部门与气象部门应联合开展工作,通过定期调研,掌握一手绿地资源数据,结合气候数据,系统分析热岛效应的变化趋势,灵活调整绿地空间的设计规划布局,盘活当地国土空间规划与用地政策,使绿地优化与气候变化相适应,高效应对高温侵袭。在实际应用层面上,应综合海口市绿地空间的有效降温范围、发挥降温作用的阈值、海水干扰降温的临界距离以及区域绿地空间建设需求,均匀布局绿地。需注意避免绿地空间热缓解作用波及范围的重叠,寻求合理的绿地布局间距,最大程度减少土地资源的功能性浪费,提升空间利用效率,逐步减少降温盲区。

4.3 更新发展,城绿共融

海口市正持续推进社区功能的完善和活力的提升,致力于打造高品质、智慧型的生活空间和居住环境,建设符合自贸港定位的核心区。海口在更新过程中,不仅要“提质增智”,更应融入气候韧性更新。《巴黎协定》确立了提高适应性、增强韧性、降低脆弱性的全球适应目标,主动适应气候变化、不断增强气候风险防范和抵御能力已经成为全球共识和必然选择。可在城市更新中通过建设城市森林、设置口袋公园、增设长茄型线性绿地空间和屋顶绿化、增添节能设施等优化方式,充分发挥绿地空间的生态功能,塑造具有高碳汇能力和丰富生物多样性的“城绿共融”的空间,实现海口市可持续发展。

5 结语

本研究基于 Landsat 8 OLI/TIRS 遥感影像,利用 ENVI 5.6 和 Arcgis10.8 等软件获取地表温度、绿地空间面

积大小等数据,并通过 spss27 和 Excel 进行统计分析。研究发现:滨水绿地空间对城市降温具有正向作用,在缓解城市热效应方面具有明显的响应;研究区整体温度受滨水绿地空间的调控,呈现“中间高,四周低,局部高温集聚”的降温特征;滨水绿地空间的有效降温范围为 60 m,30 m 缓冲区内范围内的降温效果最明显;绿地空间边缘面积比与降温效益呈负相关,空间面积大小、植被覆盖度、地形变化、蓝绿面积比及绿地中心到海岸线的距离均与降温效益呈正相关;绿地降温效益受空间内部因素与外界环境因素的双重影响,海口市降温效益受海水干扰的临界距离约为 2 300 m。

本研究初步探索了海口市滨水绿地空间内部要素对城市热缓解的响应情况,为其他滨海城市绿地的降温研究提供了参考,弥补了滨海城市在缓解城市热环境的绿地综合优化实践方面的不足,并提出了具有可行性的规划设计建议。

本文一方面丰富了海口市降温效益与绿地空间设计要素的关系研究,另一方面深化了模型验证,引入 AIC 和 RMSE 指标进行验证,提高了准确性。但本研究在识别“拐点”和测度降温效益时,借鉴了前人的研究方法,其精度仍有提升空间。未来研究应进一步完善绿地空间缓解城市热效应的评价体系与指标,增强理论的解释力与预测效力,精进降温效益测算方式方法,同时加强研究成果的实践应用,开展更多元化的实证研究,以提升其普适性与实用性。

注:图片均由作者自绘。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] UN-HABITAT. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities[EB/OL]. [2025-02-26].<https://unhabitat.org/world-cities-report-2022-envisaging-the-future-of-cities>.
- [3] DOROZHKINA A E. "Green architecture" in aspect of ecologization of buildings in the urban environment[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 687(5): 055070.
- [4] 苏王新,常青,刘筱,等.城市蓝绿基础设施降温效应研究综述[J].生态学报,2021,41(7):2902-2917.
- [5] 林静娴.融合理念下城市滨水绿地空间景观规划研究[D].合肥:安徽农业大学,2017.
- [6] 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.
- [7] 朱雯,王敏.基于遥感反演的江南水网地区城镇蓝绿空间格局对夏季降温的影响与尺度效应分析[J].华中农业大学学报,2023,42(4):86-97.
- [8] 梁裕宁,钟子豪,朱萱,等.热环境内不同类型水体降温效应的时空变化及景观影响[J].水生态学杂志,2024,45(2):39-46.
- [9] HU N, WANG G, MA Z, et al. The cooling effects of urban waterbodies and their driving forces in China[J]. Ecological Indicators, 2023, 156: 1112000.
- [10] 吴豪.基于城市降温边际效应的城市绿地规模研究——以上海市为例[C]//中国城市规划学会.人民城市,规划赋能——2022中国城市规划年会论文集(08城市生态规划).北京:中国建筑工业出版社,2023.
- [11] 王忙忙,盛硕,王云才.多维协同的城市蓝绿空间降温效应情

景模拟——以上海市中心城为例[J]. 南方建筑, 2024 (5) : 95-105.

[12] 张彪, 谢紫霞, 高吉喜, 等. 上海市绿地植被的吸热降温效益评估[J]. 自然资源学报, 2021, 36 (5) : 1334-1345.

[13] 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.

[14] 张昌顺, 谢高地, 鲁春霞, 等. 北京城市绿地对热岛效应的缓解作用[J]. 资源科学, 2015, 37 (6) : 1156-1165.

[15] 李静. 武汉市解放公园降温作用及其影响因素研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2022.

[16] 朱云凤, 王红, 覃书鸿, 等. 基于多源数据的南京市公园降温效应研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48 (3) : 285-294.

[17] 张弘驰. 基于局地气候分区的滨海城市热环境评估[J]. 世界建筑, 2024 (11) : 96-97.

[18] 蔡智, 唐燕, 江伦. 中国滨海城市的山水关系及热岛效应对比研究[J]. 中国名城, 2020 (6) : 28-33.

[19] 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.

[20] 白琳, 徐永明. 基于 Landsat/TM 数据的地表温度与气温的对比分析[C]// 中国气象学会. 第 32 届中国气象学会年会 S18 气象卫星遥感新资料——新方法——新应用. 南京: 南京信息工程大学地理与遥感学院, 2015.

[21] 王永师, 韦玲艳, 刘铁冬, 等. 热带滨海城市蓝绿空间格局变化对热环境的影响——以海口市为例[J/OL]. 热带农业科学, 1-12[2025-04-12]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1038.S.20241217.1646.008>.

[22] SOBRINO A J, JIMÉNEZ-MUÑOZ C J, PAOLINI L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90 (4) : 434-440.

[23] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.

[24] GHALEB F, MARIO M, SANDRA N A. Regional Landsat-Based Drought Monitoring from 1982 to 2014[J]. Climate, 2015, 3 (3) : 563-577.

[25] 杨茗涵. 西安市公园绿地空间表征的降温效应研究[C]// 中国城市规划学会. 人民城市, 规划赋能——2022 中国城市规划年会论文集(12 风景环境规划). 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.

[26] CHEL M J, KAREN D, MARINA A. Urban Landscape Heterogeneity Influences the Relationship between Tree Canopy and Land Surface Temperature[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 57, 126930.

[27] ZHANG Y, DAI M. Analysis of the Cooling and Humidification Effect of Multi-Layered Vegetation Communities in Urban Parks and Its Impact[J]. Atmosphere, 2022, 13 (12) : 2045.

[28] 徐冉. 海口市主城区绿地微气候效应及热舒适调节策略[D]. 海口: 海南大学, 2022.

[29] 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.

[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] 肖逸, 戴斯竹, 赵兵. 小尺度公园对于城市热岛效应的缓解作用——基于南京市中心城区社区公园的实证研究[J]. 景观设计学, 2020, 8 (3) : 26-43.

[32] 殷若晨, 方家, 朱丹, 等. 城市公园降温效益的测度与气候适应性设计策略[J]. 中国园林, 2022, 38 (6) : 121-126.

[33] 袁旸洋, 张佳琦, 郭蔚, 等. 南京主城区蓝绿空间格局对降温

效益的影响及其协同作用研究[J]. 园林, 2023, 40 (8) : 57-64.

作者简介:

张开月/2000 年生/女/山西运城人/海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为热带园林生态与景观规划

许先升(*通信作者)/1965 年生/男/广东汕头人/博士/海南大学热带农林学院(海口 570228)/教授/研究方向为风景园林规划设计与历史理论/E-mail: xxs918@163.com

肖玉冰/2000 年生/女/四川成都人/硕士/海南大学热带农林学院(海口 570228)/专业方向为热带风景园林历史理论与规划设计