

基于城市绿度空间精细景观格局的热环境效益研究

张琳琳^{1,2,3}, 吴嘉豪^{2,4}, 孟庆岩^{1,2,3}, 汪雪森^{2,3}, 杜弘宇^{2,3}, 潘婧⁵

1. 海南空天信息研究院 海南省地球观测重点实验室, 三亚 572029;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 澳门大学 智慧城市物联网国家重点实验室, 中国 澳门 999078;

5. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094

摘要: 绿度空间是城市生态环境的重要组成部分, 开展绿度环境效益评价研究可为城市环境精细化监管提供参考。本研究基于高分六号遥感卫星数据, 对海南省典型城市绿度空间产生的热环境效益开展了综合评价。首先利用多尺度分割和随机森林算法将研究区植被划分为乔—灌—草3种类型, 进而基于Pearson和地理探测器分析绿度景观格局与地表温度间的驱动因子特征, 最后采用层次分析法构建绿度空间环境效益评价指数(GEBI), 评估了海口市和三亚市的绿度环境效益。结果表明: (1) 海口市植被类型以灌木为主导, 三亚市植被类型以草地及灌木为主导; (2) 绿地降温效应与绿地面积与多样性、景观斑块形状与密度等因素相关, 绿地景观越破碎和分散, 斑块形状越不规则, 绿地降温效应越差; (3) 研究区GEBI均表现为高值区和低值区交错分布, 海口市GEBI热点和冷点区域分布在北部, 三亚市GEBI热点区域主要分布在西部和东南部, 冷点区域范围较小。研究可识别绿度环境脆弱区和优势区, 为推动城市绿色可持续发展提供方法范式。

关键词: 城市遥感, 绿度空间, 地表温度, 环境效益, 地理探测器, 机器学习, 高分六号

中图分类号: P2

引用格式: 张琳琳, 吴嘉豪, 孟庆岩, 汪雪森, 杜弘宇, 潘婧. 2025. 基于城市绿度空间精细景观格局的热环境效益研究. 遥感学报, 29(7): 2469–2482

Zhang L L, Wu J H, Meng Q Y, Wang X M, Du H Y and Pan J. 2025. Thermal environmental benefit based on the fine landscape pattern of urban green space. National Remote Sensing Bulletin, 29(7): 2469–2482 [DOI: 10.11834/jrs.20254184]

1 引言

在城市化进程中, 伴随着生物多样性减少、空气质量恶化、城市热岛效应等一系列生态环境问题, 改善城市生态环境成为人们越来越关注的问题(Cuthbert等, 2022; 苏博阳等, 2024)。城市绿度空间UGS(Urban Green Space)是指城市范围内为植被覆盖且具备一定生态服务效益、具有方便可达性的区域, 主要包括城市森林、城市草地、街道行树、公园及湿地等(Meng, 2023)。科学度量与评价城市绿度空间所产生的环境效益, 能为最大化发挥城市绿地的生态功能和服务价值

提供理论支持, 促进城市绿度空间质量的不断完善。

城市绿度空间对城市热岛效应的缓解作用是当前的研究热点。大量研究表明地表温度LST(Land Surface Temperature)与归一化植被指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)、叶面积指数和植被覆盖度等呈负相关, 与不透水地表面积呈正相关(Guo等, 2019b; Verma和Kundapura, 2020; Huang等, 2024)。人们普遍认为, 建造更多绿地可以产生更低的LST, 从而缓解城市热岛效应。然而, 城市中的绿地建设面积有限, 人们将目标转向优化绿地的空间配置以最大化其降温能

收稿日期: 2024-05-15; 预印本: 2024-12-12

基金项目: 海南省自然科学基金(编号:623QN328); 国家自然科学基金(编号:42171357, 42201384); 风云三号03批气象卫星工程地面应用系统生态监测评估应用项目(第一期)(编号:ZQC-R22227); 中国科学院青年创新促进会项目(编号:2023139)

第一作者简介: 张琳琳, 研究方向为城市环境遥感。E-mail: zhangll@aircas.ac.cn

通信作者简介: 吴嘉豪, 研究方向为城市环境遥感。E-mail: yc17493@um.edu.mo

力 (Wang 等, 2021)。绿地面积、形状、景观格局、植被类型和健康状况均是影响绿度空间发挥其降温能力的重要因素 (Chinchilla 等, 2021; Shah 等, 2021)。不同学者开展的相关研究获得了相似结论, 如绿地景观比例、斑块面积与 LST 呈显著的负相关, 斑块密度与 LST 呈显著的正相关, 为城市绿度空间的热岛效应评价提供了景观指数选取的参考及建议。然而, 绿地斑块形状、分布特征和连接性对其降温作用的影响没有统一的结论, 这与不同的研究区、数据获取时间、数据空间分辨率和分析尺度有关 (Guo 等, 2019a; 孙喆, 2019)。因此, 还需要更多的实例研究, 在不同的情况下分析绿度空间景观格局对 LST 的影响。特别是在针对某一确定区域的绿度空间评价中, 更需要明确空间布局以利于其环境效益发挥。

景观指数由于具备科学性的内涵, 常常被用于城市复杂景观格局和生态环境效益的联合分析中 (Hagen-Zanker, 2016; 汪雪森 等, 2020; Bai, 2024)。已有诸多学者开展了基于景观指数的城市绿度空间生态质量综合评价 (袁静文, 2020), 如 Liang 等 (2017) 分别构建了斑块大小、形状、边缘结构等 8 个综合指标, 定量评价上海市绿度空间景观生态质量。Xiang 等 (2022) 通过构建景观比例、聚集度等多个景观格局指数分析它们对地表温度在季节尺度上的作用, 他们也证明了景观指数和绿化量会对地表温度产生直接影响。然而, 上述研究对生态质量评价指标的制定仅基于景观指数间的相关分析和因子分析等, 缺乏结合真实生态环境情况的定量研究。明确不同的景观格局指数是否对城市环境有确定影响或影响的方向及程度, 对评价指标的制定具有重要意义。

过去二十年来, 各种光谱、辐射、空间和时间分辨率的光学和主动遥感或地球观测数据为城市景观研究提供了关键数据源。尽管 Landsat、Sentinel 等遥感影像可用于监测城市大范围绿地景观格局时空变化 (Chang 等, 2024), 但城市景观中, 大部分绿地斑块是复杂和不规则的, 并且高度分散, 因而较粗分辨率的遥感数据不能准确检测不规则斑块的边界形状 (Vigneshwaran 和 Kumar, 2021)。

随着高分辨率遥感的发展, IKONOS、WorldView, 高分等系列卫星数据为城市植被提取和绿地景观格局度量研究带去新的视角 (皮新宇

等, 2021), 也使得绿度空间景观格局研究深入到了更精细的尺度, 包括绿度空间与建筑空间的配置关系 (Wang 等, 2019)、绿度空间三维空间格局 (Wu 等, 2024) 等方面。

综上所述, 现有的城市绿度空间环境效益评价模型仍存在以下 3 方面的问题: (1) 研究大多将城市绿地视为单一类别, 未考虑不同类型绿地在环境效益上的差别; (2) 不同的景观格局形态对城市热环境效益产生的影响不明; (3) 传统的城市绿度空间评价研究多以城市、区县、街道或公园作为最小评估单元, 而基于高空间分辨率遥感数据开展空间连续度量和评价的研究较少。

本研究拟基于高分六号 (GF-6) 卫星遥感影像, (1) 精细划分城市绿度空间类别, 结合地表温度数据探讨绿度空间景观格局对城市热环境的影响规律; (2) 基于移动窗口法构建栅格尺度城市绿度空间热环境效益评价模型。当前中国关于城市绿度功能评价的研究大都集中在北京、上海、深圳等城市化水平相对较高的地区。作为中国对外开放窗口, 海口市和三亚市近年来城市化发展迅速, 定量评估城市绿地生态对城市热环境的影响, 可为城市进一步建设和自贸港规划提供参考依据。研究期望获得空间连续的城市人居环境质量评价结果, 及城市内部绿度环境的空间异质性, 精准识别绿度环境脆弱区。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

研究选取海南省两大地级市——海口市和三亚市作为研究区 (图 1)。海南是中国最大的经济特区、最大的自由贸易实验区和唯一的中国特色自由贸易港。它是以海洋为主体的岛屿省份, 独特的地理位置使其具有丰富的自然资源和多样的植被种类。

海口市位于海南岛北部, 为海南省省会城市, 西北部和东南部地势较高, 绝大部分地区为台地和平原, 属热带雨林区, 代表性植被类型为自然、半自然热带雨林次生林类型。城镇的空间分布密度为由北向南呈梯度递减, 南部为城市郊区, 多为林地, 城镇分布分散。三亚市地处海南岛最南端, 毗邻南海, 地势自北向南倾斜, 为热带海洋季风气候, 三亚市植被类型丰富, 且自西向东逐

渐变化，东部为滨海雨林，中部为半落叶季雨林，西部为落叶季雨林（田璐嘉，2022）。城市中植被在城市发展的同时，亦要关注城市环境质量水平。

对其重点城市进行绿地监测和环境质量分析，有助于综合生态保护与城市建设，为重点城市规划、自贸港建设提供支撑。

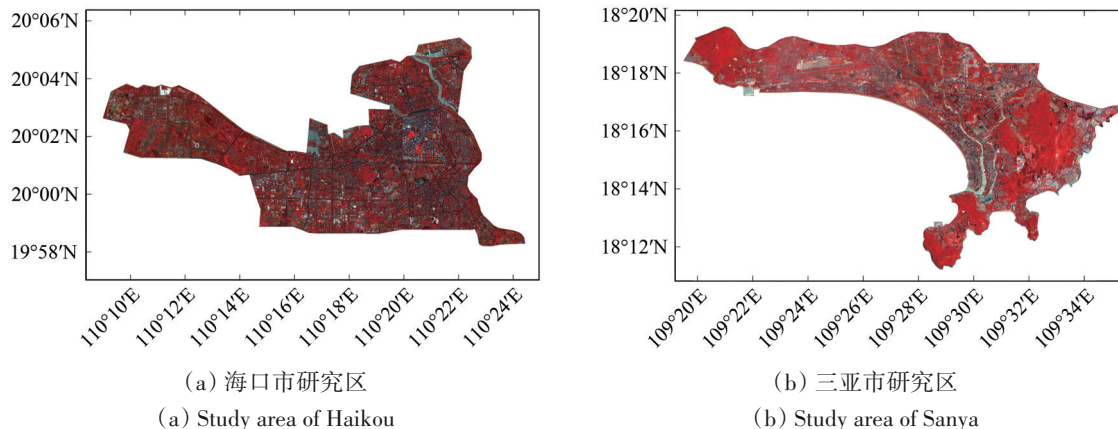


图1 海南省研究区影像图

Fig.1 Satellite images of Hainan study area

2.2 数据源与预处理

2.2.1 GF-6卫星数据

GF-6卫星搭载了2 m全色和8 m多光谱高分辨率相机PMS (Panchromatic/Multi-Spectral)。经全色和多光谱融合后，可获得空间分辨率为2 m的多光谱影像。研究利用经过系统级辐射校正的GF-6 1A级数据，进行辐射定标、大气校正、正射校正、影像融合、影像镶嵌和裁剪。由于海南岛属热带季风海洋性气候，气温年较差小，年平均气温高，夏无酷热，冬无严寒，植被大部分属于热带雨林和常绿阔叶林带，其四季特征不显著，研究选择2020年夏季6景GF-6影像进行分析。

2.2.2 Landsat 8 TIRS数据

Landsat 8卫星搭载的热红外传感器TIRS (Thermal Infrared Sensor)，包括两个热红外波段，分辨率100 m。本研究获取了海口区域和三亚区域2020年同时期的Landsat 8影像，进行辐射定标和大气校正后，基于地表比辐射率和大气剖面参数，利用辐射传输方程法反演研究区地表温度。

3 研究方法

3.1 机器学习分类

基于GF-6影像开展城市绿色空间乔—灌—草精细分类。首先基于多尺度分割提取研究对象，

进行一次尺度较大（分割尺度=200）的分割，根据阈值条件（NDVI $\geq$ 0.4，近红外波段反射率 $\geq$ 0.2）区分植被和非植被（任芯雨，2016）。在提取的植被层上，再进行一次尺度改为100的分割，其他参数保持不变，在此分割结果下进一步目视解译区分不同植被种类并构建样本集。

在多尺度分割基础上，通过研究不同植被种类在光谱和纹理特征上的表现差异，基于机器学习方法将植被进一步分为乔木、灌木和草地。已有诸多研究证明了随机森林算法在分类任务上的优越性，特别是针对光谱相近的类别（Pu和Landry，2020；Pu等，2018）。本研究提取影像的光谱特征、植被指数、纹理特征和几何特征，利用随机森林算法进行特征优选和分类。

3.2 地理探测器

地理探测器 (Geographical detector) 是一种新的空间统计方法，可用于探测空间分层异质性，并确定驱动因素的相对重要性 (Zhao等，2020)。本研究应用地理探测器的因子探测模块来度量城市绿色空间景观格局对LST造成的空间异质性程度，通过 q 统计量实现定量描述：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^l N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (1)$$

式中， N 和 σ^2 分别代表研究单元数及 Y 在整个研究区的方差；总体 Y 有 l 个分层 ($h=1, 2, \dots, l$)，

层 h 由 N_h 个单元组成, σ_h^2 代表层 h 内 Y 值的方差 (Wang 等, 2016)。 q 的取值为 $[0, 1]$, $q=0$ 表示 Y 和 X 之间不存在耦合关系; $q=1$ 说明 Y 完全由解释因子 X 决定。

此外, 交互探测通过分别计算和比较各单因子 q 值及两因子叠加后的 q 值, 判断两因子是否存在交互作用, 以及交互作用的强弱、方向、线性还是非线性 (Wang 等, 2010; 王劲峰和徐成东, 2017)。

3.3 层次分析法

层次分析法是最常用的多准则决策技术之一, 结合了对复杂系统的定性和定量分析 (Kordi 和 Brandt, 2012)。本研究根据 Pearson 相关性和地理探测器分析结果确定城市绿度空间景观指数对城市热环境的影响方向和影响程度, 筛选重要的景观指数, 使用层次分析法构建城市绿度空间环境效益评价模型 (Saaty, 1980)。

3.4 景观格局指数

景观指数是高度浓缩景观格局信息, 反映其结构组成和空间配置等特征的简单定量指标。基于之前学者对景观指数的系统研究, 本研究选取了 9 个景观指数作为研究区城市绿度空间特征的度量。

(1) 景观比例 PLAND (Percent of Landscape)

$$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \quad (2)$$

式中, a_{ij} 是该景观类型的某一斑块的面积; n 是整体景观中所有类别斑块的总数目; A 是整体景观的总面积。PLAND 的值越小, 表示该景观类型在整个景观中的数量越少。

(2) 斑块密度 PD (Density of Patches)

$$PD = \frac{N_i}{A} \quad (3)$$

式中, N_i 为某类景观斑块的个数; A 是整体景观的总面积。

(3) 最大斑块指数 LPI (Largest Patch Index)

$$LPI = \frac{\max_{j=1}^n a_{ij}}{A} \quad (4)$$

式中, a_{ij} 是最大斑块的面积; n 是所有斑块的数目; A 是整体景观的总面积。

(4) 边缘密度 ED (Edge Density)

$$ED = \frac{E_i}{A} \quad (5)$$

式中, E_i 表示某一景观类型的斑块边界长度; A 是整体景观的总面积。

(5) 景观形状指数 LSI (Landscape Shape Index)

$$LSI = \frac{0.25 \sum_{j=1}^n e_{ij}}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

式中, e_{ij} 是斑块边缘长度, A 是整体景观的总面积, LSI 无单位。当景观由相应类型的单个方形斑块组成时, LSI=1。

(6) 面积加权的平均斑块分维数 FRAC_AM (Area-Weighted Patch Fractal Dimension)

$$D = 2 \log \left(\frac{P}{4} \right) / \log(A) \quad (7)$$

式中, D 表示分维数, P 为斑块周长, A 为斑块面积。FRAC_AM 的取值越大, 表示某一景观类型斑块的形状越没有规律。

(7) 聚集度 AI (Aggregation Index)

$$AI = \frac{g_{ii}}{MAX(g_{ii})} \quad (8)$$

式中, g_{ii} 是斑块间像素之间的连接数, $MAX(g_{ii})$ 是最大邻接像素数, 并且忽略所有景观边界边缘段。

(8) 景观分离度指数 SPLIT (Splitting Index)

$$SPLIT = \frac{\sqrt{n_i A}}{2A_i} \quad (9)$$

式中, n_i 为斑块数, A_i 为第 i 个景观的总面积, A 为整体景观的总面积。当景观由单个斑块组成时, SPLIT=1, 随着景观被细分为更小的斑块, SPLIT 也会增加。

(9) 香农多样性指数 SHDI (Shannon's Diversity Index)

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m P_i \times \ln P_i \quad (10)$$

式中, P_i 为类型 i 在整个景观中所占的面积比例; m 为景观中斑块类型的总数。当 SHDI 的取值为零时, 表明整个景观中只有一个斑块; SHDI 的值越大, 说明景观类型中各个斑块的分布越均衡。

4 实验结果处理与分析

4.1 城市绿度空间分类及地表温度反演

基于 Google Earth、百度全景影像及本研究使用的高分六号融合后的 2 m 分辨率多光谱影像, 根据不同类型植被在影像上表现出的光谱和纹理

差异，制作了研究区植被分类的训练样本集和测试样本集。其中，海口市研究区获得训练样本 550 个，测试样本 380 个；三亚市研究区获得训练样本 450 个，测试样本 300 个。为了防止模型训练对某一类样本的偏向，样本类别保持平衡，三类植被样本数比例为 1 : 1 : 1。

本研究选取的光谱特征包括：影像光谱的均值、亮度、贡献率、标准差、归一化植被指数

(NDVI)、比值植被指数 (RVI) 和增强植被指数 (EVI)；形状特征包括：边界指数、形状指数、紧致度、长宽比；纹理特征包括全色影像的 8 个灰度共生矩阵 (GLCM) 统计量 (黄晶, 2008)。最终从训练样本中提取 31 种特征 (19 个光谱特征、4 个形状特征和 8 个纹理特征)。并在训练过程中评价每个特征的重要性，以平均准确度下降的重要性得分表示，两个研究区结果如图 2 所示。

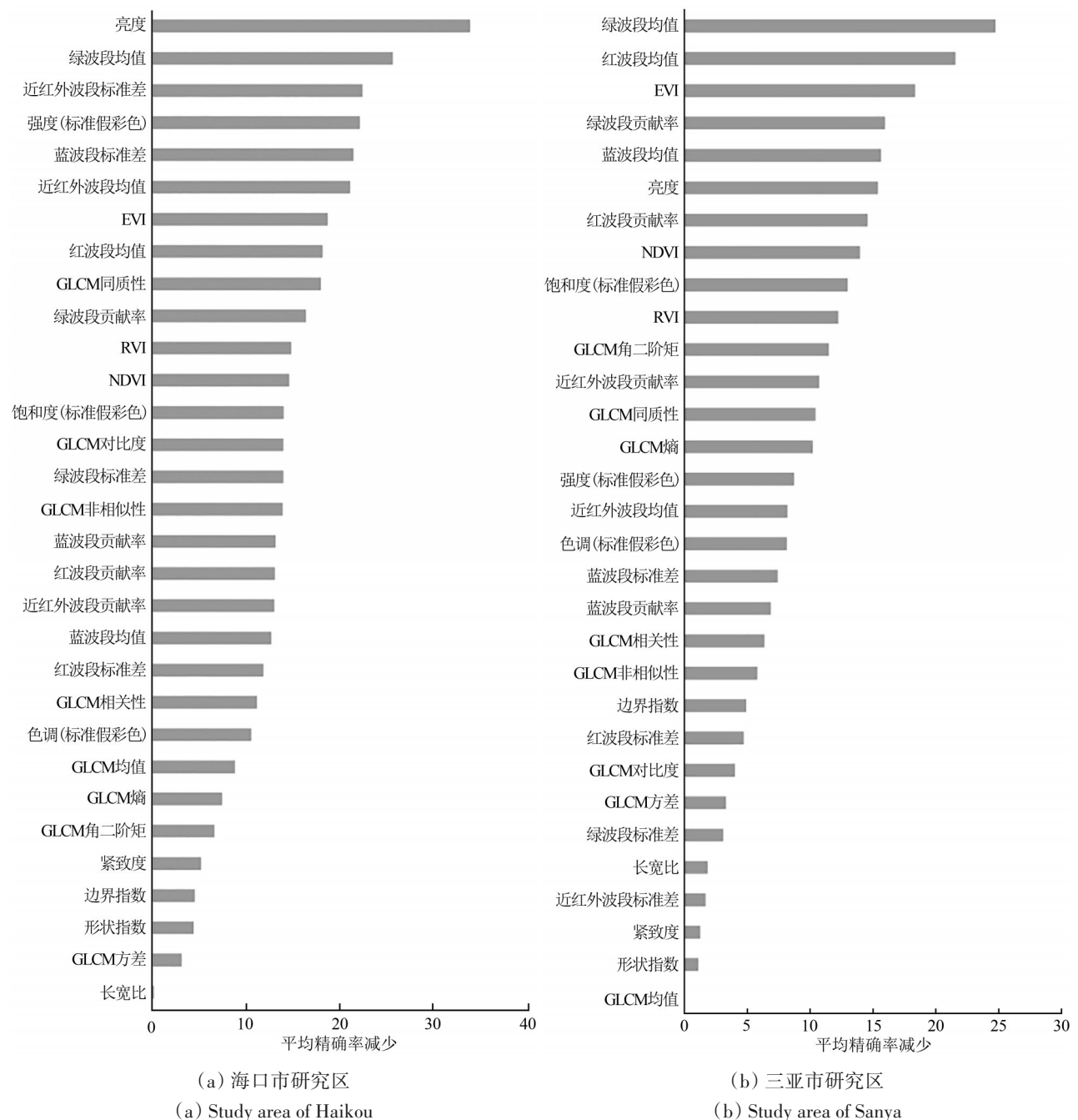


图 2 GF-6 影像特征重要性
Fig.2 Importance of GF-6 image features

根据特征重要性评价结果，取前 20 个特征进行绿度空间植被分类（图 3）。模型训练采用 5 折交叉验证，并在测试集上计算预测的总体精度，结果显示海口市研究区分类精度 87.6%，三亚市研

究区分类精度 94.13%，基本满足实验分析需求。海口市植被类型以灌木为主导，三亚市植被类型以草地及灌木为主导。

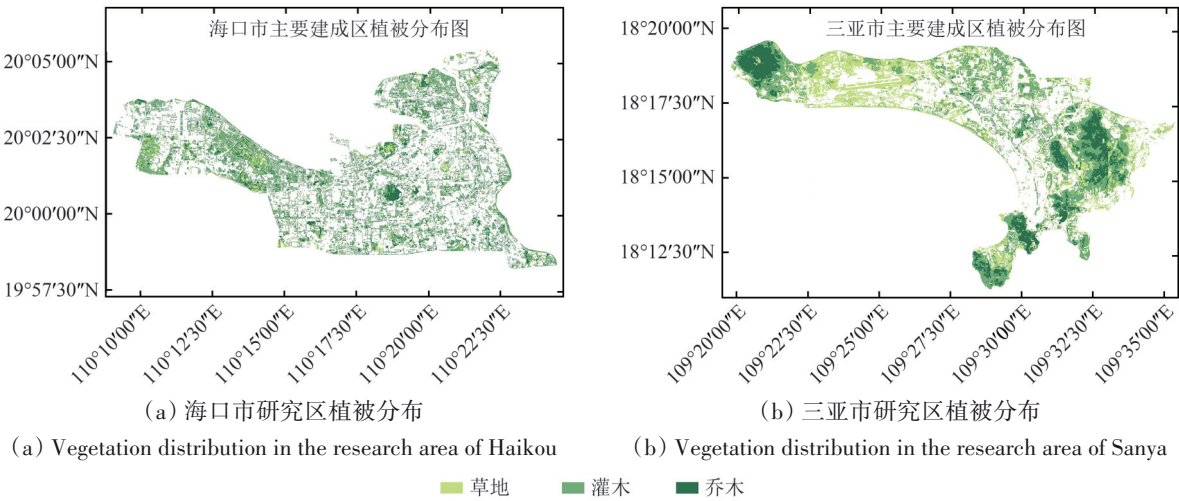


图3 研究区植被分布图
Fig. 3 Vegetation distribution maps

在地表温度数据获取上，研究根据辐射传输方程算法，利用 Landsat 8 数据反演得到海口市和三亚市地表温度如图 4 所示。结合图 3 的植被分布

特征表明，城市中建筑区域的地表温度显著高于周边植被区域，进一步开展定量研究。

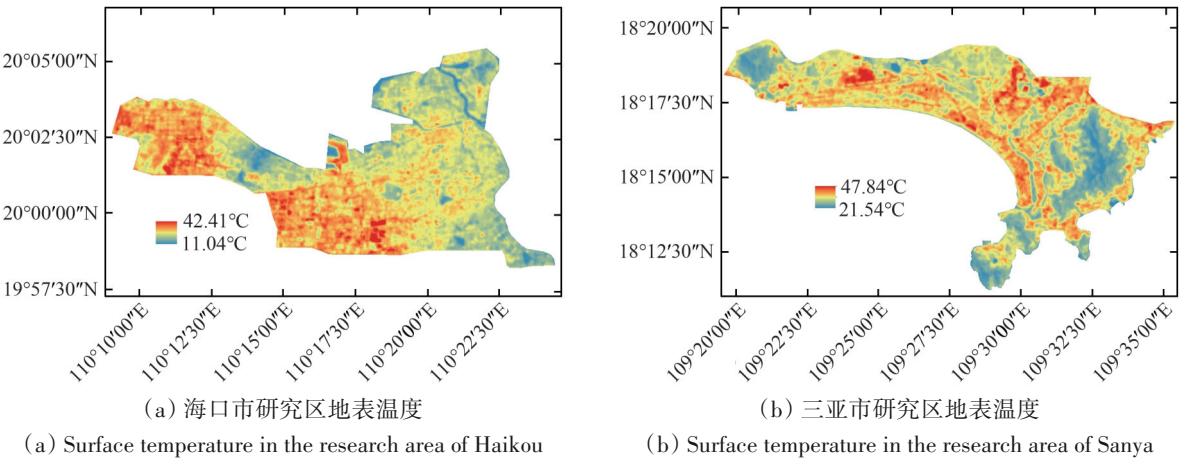


图4 研究区地表温度反演图
Fig. 4 Surface temperature maps

4.2 分析单元提取

在研究区内进行 1 km×1 km 的格网采样。由于研究区面积较小，为尽量多的获得分析样本，在南北和东南方向各错开 500 m，两次生成采样格网，最终在海口市研究区获得样本 248 个，三亚市研究区获得样本 244 个（图 5）。提取格网 LST 平均值和以格网为景观单元的一系列景观指数用于后

续环境效益分析。

4.3 基于地理探测器的城市绿度空间热环境效益分析

4.3.1 基于 Pearson 相关性分析

海口市和三亚市研究区 LST 与景观格局指数的 Pearson 相关系数如表 1 所示。海口市景观水平的

景观比例 PLAND、最大斑块指数 LPI、边缘密度 ED 和分维数 FRAC_AM 与 LST 呈显著的负相关，斑块密度 PD、分离度 SPLIT 与 LST 呈显著的正相关。三亚市研究区在景观水平上，PLAND、LPI、FRAC_AM、AI、SHDI 与 LST 呈显著的负相关，

PD、LSI、SPLIT 与 LST 呈显著的正相关。研究表明绿地面积越大、分布越聚集、多样性越高、单个斑块面积越大，绿地降温效应越好；绿地景观越破碎和分散，斑块形状越不规则，绿地降温效应越差。

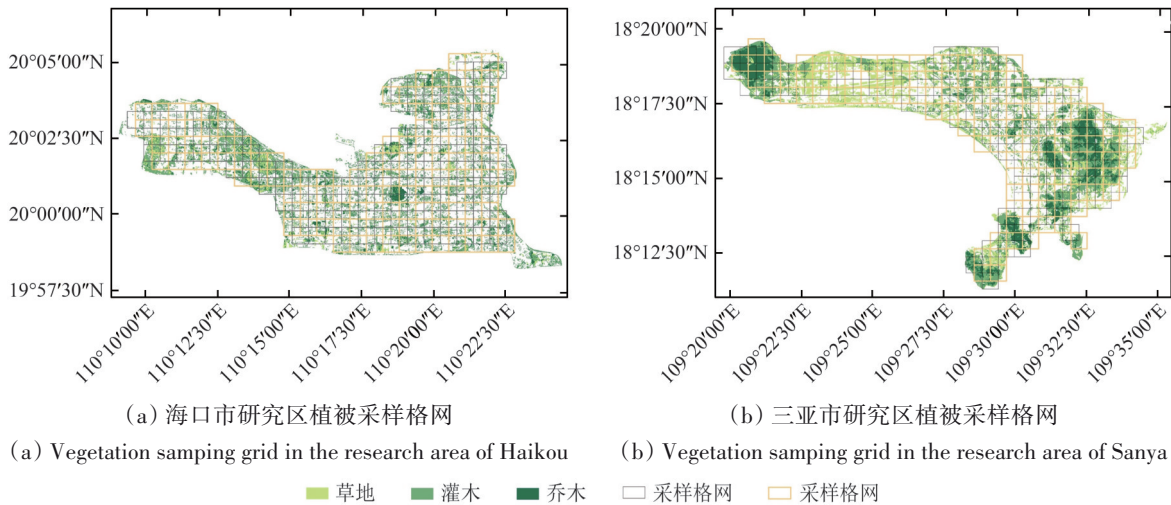


图5 研究区植被采样格网分布图
Fig. 5 Vegetation sampling grid distribution in the study area

表1 LST与景观格局指数的Pearson相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficient between LST and landscape pattern index										
研究区		PLAND	PD	LPI	ED	LSI	FRAC_AM	SPLIT	AI	SHDI
海口市	草地	0.149*	0.039	-0.061	-0.017	-0.113	-0.082	-0.091	0.016	—
	灌木	-0.278***	0.269***	-0.283***	-0.205***	-0.172**	-0.499***	0.171**	-0.054	—
	乔木	-0.214***	-0.151*	-0.066	-0.180**	-0.345***	-0.203***	0.077	0.157*	—
	景观水平	-0.307***	0.150*	-0.305***	-0.161*	-0.085	-0.493***	0.298***	-0.076	-0.077
三亚市	草地	0.243**	0.770***	0.164	0.729***	0.688***	0.345***	-0.184*	-0.390***	—
	灌木	-0.372***	0.677***	-0.190*	0.385***	0.225**	-0.264**	-0.235**	-0.347***	—
	乔木	-0.715***	-0.161	-0.652***	-0.652***	-0.565***	-0.405***	0.072	-0.383***	—
	景观水平	-0.776***	0.486***	-0.486***	-0.088	0.401***	-0.192**	0.444***	-0.487***	-0.423***

注：*、**、***分别表示在0.05、0.01、0.001水平上显著。

4.3.2 基于地理探测器的分析

两个城市的因子探测结果如表2所示，海口市只有景观比例PLAND、最大斑块指数LPI、分维数FRAC_AM和分离度SPLIT在0.001水平上显著，说明上述4个景观指数可确定为地表温度的驱动因子。

在类型水平的因子探测中，灌木的景观指数均在0.05水平上显著。乔木只有景观比例PLAND、景观形状指数LSI在0.001水平上显著，以及分维数FRAC_AM、聚集度AI在0.05水平上显著。草地

的景观指数均不显著。总体来看，城市植被对地表温度的影响为灌木>乔木>草地。且对灌木和乔木来说，形状因子对其降温效应影响最大，其次是乔木的面积因子和灌木的分布因子。

三亚市因子探测结果显示除分维数FRAC_AM外，其余8个指数均在0.01水平上显著。通过对LST分层异质性的解释率排序来看，城市绿色空间景观对于地表温度的影响为面积因子>分布因子>多样性因子>形状因子。

类型水平因子探测结果表明，草地的景观指数均在0.001水平上显著；灌木仅有5个景观指数

显著；乔木除了斑块密度PD外，其他指数均在0.001水平上显著。总体来看，城市植被对地表温度的影响为草地>乔木>灌木。通过对各类型植被景观指数的影响排序来看，乔木景观对于地表温度的影响为面积因子>分布因子>形状因子。对于

灌木来说，尽管面积因子仍然重要，分布因子的重要性相比于乔木则大大提升：草地的面积因子相对来说解释率较低，而斑块密度、边缘密度、景观形状指数的解释率远高于其他景观指数。

表2 LST与景观格局指数的因子探测
Table 2 Factor detection of LST and landscape pattern index

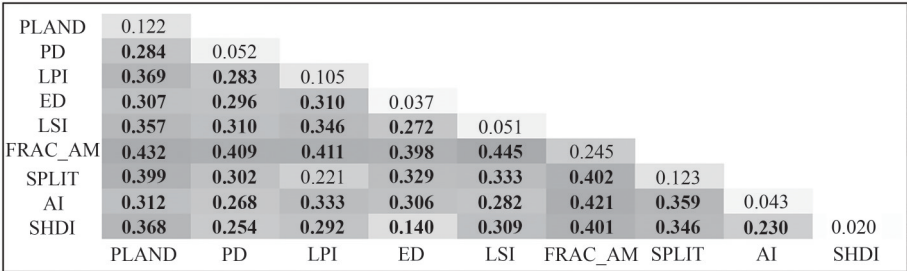
研究区		PLAND	PD	LPI	ED	LSI	FRAC_AM	SPLIT	AI	SHDI
海口市	草地	0.032	0.031	0.049	0.008	0.030	0.026	0.060	0.048	—
	灌木	0.102***	0.132***	0.101***	0.074*	0.095**	0.255***	0.091**	0.074*	—
	乔木	0.118***	0.038	0.026	0.058	0.136***	0.075*	0.031	0.068*	—
	景观水平	0.122***	0.052	0.105***	0.037	0.051	0.245***	0.123***	0.043	0.020
三亚市	草地	0.269***	0.658***	0.206***	0.576***	0.555***	0.176***	0.256***	0.281***	—
	灌木	0.236***	0.527***	0.144*	0.213***	0.073	0.092	0.092	0.146*	—
	乔木	0.596***	0.059	0.507***	0.450***	0.334***	0.260***	0.525***	0.208***	—
	景观水平	0.649***	0.281***	0.275***	0.085**	0.184***	0.057	0.290***	0.263***	0.245***

注：*、**、***分别表示在0.05、0.01、0.001水平上显著。

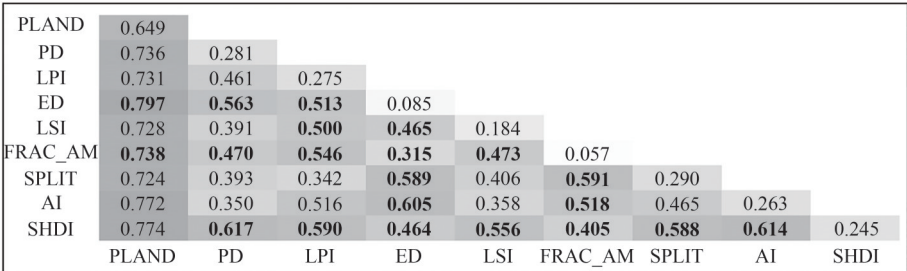
4.3.3 因子交互探测

9个景观水平指数的36组交互探测结果如图6所示。海口市所有景观指数的交互作用均为增强类型，其中只有SPLIT∩LPI为双因子增强，其他均为非线性增强。结合相关性分析的结果可知，对

于本研究区来说，景观中绿地斑块形状越复杂，绿地占比越高，斑块分布越聚集，则具有更好的降温效果。三亚市所有交互作用均为增强类型，其中加粗的为非线性增强，其他均为双因子增强。



(a) 海口市研究区交互探测结果
(a) Interactive detection results in the research area of Haikou



(b) 三亚市研究区交互探测结果
(b) Interactive detection results in the research area of Sanya

图6 景观水平指数对LST作用的交互探测结果

Fig. 6 Interactive detection results of the effect of landscape horizontal index on LST

在因子探测和交互探测中，景观比例 PLAND 呈现出绝对的优势。尽管多样性 SHDI 和边缘密度 ED 在因子探测中对地表温度的解释率较低，但与景观比例交互，可达到更好的降温效果。该结果表明当城市中无法增加绿地面积时，提升各类型植物的多样性和接触程度、提升绿地斑块的聚集程度是较好的绿化优化手段。

4.4 城市绿度空间评价模型构建

根据分析结果，选取4个景观水平指标和4个

类型水平指标来构建城市绿度空间环境效益评价指标 GEBI (Green Environment Benefit Index)，选取的景观指数为：景观比例 (C1)、最大斑块指数 (C2)、分维数 (C3)、分离度 (C4)、灌木斑块密度 (C5)、灌木分维数 (C6)、乔木景观比例 (C7)、乔木景观形状指数 (C8)。基于层次分析法原理，得到选取的8个因子的判断矩阵图，如图7所示。最终，获得各指标权重如表3和表4所示。

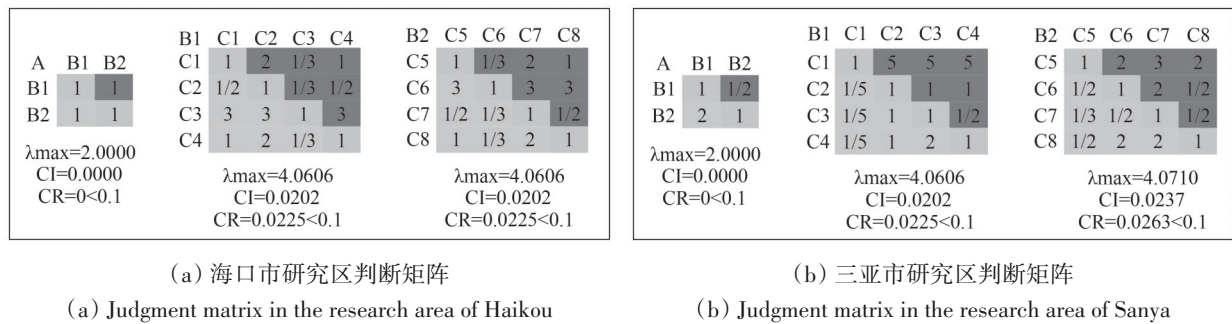


图7 城市绿度空间环境效益评价指标判断矩阵

Fig. 7 Judgment matrix of urban green spatial environmental benefit evaluation index

表3 海口市绿度空间环境效益评价模型指标权重

Table 3 Index weight of urban green space environmental benefit evaluation model in Haikou			
目标层	准则层	指标层	权重
城市绿度空间环境效益评价指数(A) 权重=1	城市绿度空间景观水平评价(B1) 权重=0.5	景观比例(C1)	0.0969
		最大斑块指数(C2)	0.0586
		分维数(C3)	0.2475
		分离度(C4)	0.0969
	城市绿度空间植被类型水平评价(B2) 权重=0.5	灌木斑块密度(C5)	0.0969
		灌木分维数(C6)	0.2475
		乔木景观比例(C7)	0.0586
		乔木景观形状指数(C8)	0.0969

表4 三亚市绿度空间环境效益评价模型指标权重

Table 4 Index weight of urban green space environmental benefit evaluation model in Sanya			
目标层	准则层	指标层	权重
城市绿度空间环境效益评价指数(A) 权重=1	城市绿度空间景观水平评价(B1) 权重=0.3333	景观比例(C1)	0.2067
		斑块密度(C2)	0.0413
		最大斑块指数(C3)	0.0352
		分离度(C4)	0.0501
	城市绿度空间植被类型水平评价(B2) 权重=0.6667	草地斑块密度(C5)	0.2788
		草地边缘密度(C6)	0.1271
		草地景观形状指数(C7)	0.0803
		乔木景观比例(C8)	0.1805

综上, 海口市 GEBI 计算公式为

$$\begin{aligned} \text{GEBI} = & 0.0969 \cdot \text{PLAND} + 0.0586 \cdot \text{LPI} + \\ & 0.2475 \cdot \text{FRAC_AM} + 0.0969 \cdot \text{SPLIT} + \\ & 0.0969 \cdot \text{PD}_{\text{shrub}} + 0.2475 \cdot \text{FRAC_AM}_{\text{shrub}} + \\ & 0.0586 \cdot \text{PLAND}_T + 0.0969 \cdot \text{LSI}_{\text{tree}} \end{aligned} \quad (11)$$

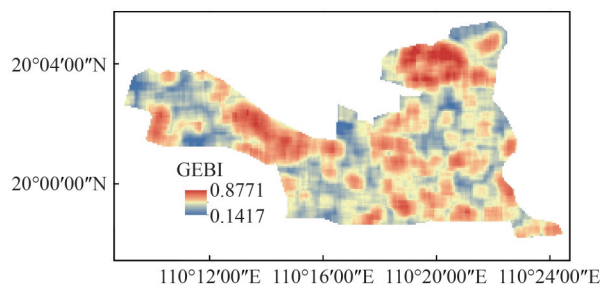
三亚市 GEBI 计算公式为

$$\begin{aligned} \text{GEBI} = & 0.2067 \cdot \text{PLAND} + 0.0413 \cdot \text{PD} + \\ & 0.0352 \cdot \text{LPI} + 0.0501 \cdot \text{SPLIT} + \\ & 0.2788 \cdot \text{PD}_{\text{grass}} + 0.1271 \cdot \text{ED}_{\text{grass}} + \\ & 0.0803 \cdot \text{LSI}_{\text{grass}} + 0.1805 \cdot \text{PLAND}_{\text{tree}} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, 所有指数进行归一化处理。

4.5 城市绿度空间评价分析

海口市基于移动窗口法构建的 GEBI 计算结果如图 8 (a) 所示。其 GEBI 的高值区和低值区交错

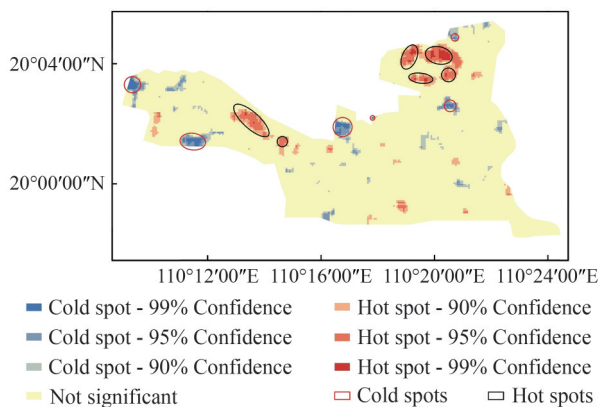


(a) 海口市研究区 GEBI 指数

(a) GEBI index in the research area of Haikou

分布。同时, 基于热点分析结果, 通过标准差阈值识别出了 6 个热点区域及 6 个冷点区域, 如图 8 (b) 所示。热点和冷点区域均分布在研究区北部, 表明该区域绿度空间环境效益的空间异质性较大, 而研究区南部则更加均匀。

研究区北部为沿海区域, 土地利用和城市功能更加多样, 例如, 6 个热点均分布在沿海区域, 包括西海岸高尔夫球场、白沙门公园、海南大学和三处规划较好的住宅区。6 个冷点包括 3 个港口码头、2 个待开发的裸地和 1 处老城住宅区。码头和待开发区域植被覆盖度极低, 是导致其形成冷点的主要原因。



(b) 海口市研究区冷热点分布

(b) Distribution of hot and cold spots in the research area of Haikou

图 8 海口研究区 GEBI 指数及冷热点分布

Fig.8 GEBI index and distribution of hot and cold spots in Haikou study area

研究区内新建住宅区主要分布在北部沿海的区域, 建筑物密度较低, 绿度空间分布和生长情况良好。但同时, 研究区南部存在大量绿化情况较差的老城居住区, 这些区域特征为低建筑物高密度, 建筑物之间空间较小, 只有少量零星分布的乔灌木, 绿度空间主要由居住区附近的小型街心公园和行道树构成。被识别为冷点区域的居住区, 同样是低建筑物高密度区域, 植被覆盖度较低, 而与其他老城居住区相比, 该区域街道上缺乏行道树, 即便是道路宽度较大的主干道, 其街道绿化建设也较为欠缺, 由于建筑密集且缺乏植被覆盖, 城市热量汇集且难以被吸收。

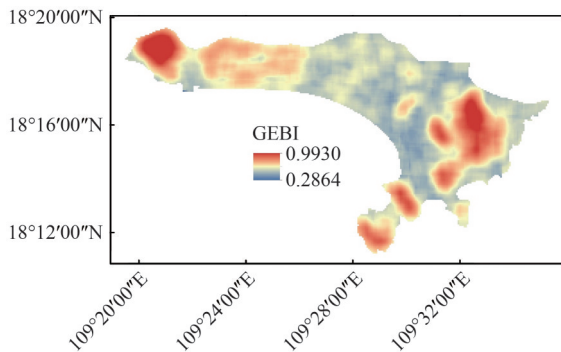
三亚市 GEBI 计算结果如图 9 (a) 所示。GEBI 在空间上具有显著的差异性, 研究区西部、东部及南部 GEBI 值较高, 而中部较低。根据热点分析

结果如图 9 (b), 识别出 6 个热点区域和 4 个冷点区域。三亚市研究区热点的聚集程度相对于冷点更高, 范围也更大, 表明研究区绿度空间环境效益较好的区域更加突出, 而亟需优化的绿度空间环境效益较差的区域相对较少。热点区域主要分布在研究区西部和东南部, 其中西部和东部分别有一个较大的热点, 剩下 4 个较小的热点分布在东南和南部。而 4 个冷点区域范围较小, 显著性较差, 主要分布在研究区中东部。

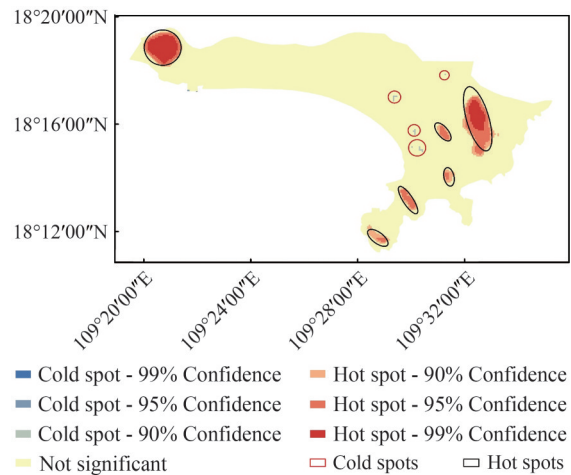
研究结果与实地情况相比表明, 西部较大的热点区域为平安岭, 东部较大的热点区域为凤凰岭风景区, 4 个较小的热点从北到南分别被临春岭森林公园、凤凰岭风景区、鹿回头风景区、鹿回头岭所覆盖。4 个冷点区域中包含 3 个住宅区和 1 个商业区, 3 个住宅区中有两处为低建筑物高密

度区,地面几乎全部被建筑物覆盖,没有植被分布。另一处为高建筑物低密度区,相对于上述两处冷点区域,该区域具有更大的绿化空间,但当前该区域绿度空间建设尚不完善,裸地较多且植被生长状况较差。此外,低建筑物高密度区和高

建筑物低密度区均是人口密度较大的区域,且相对于前者,后者在绿度空间建设和优化中具有更大的空间,可以在屋顶和建筑之间进行植被种植,因而在城市绿度空间优化中,更应注重高建筑物低密度区空间的充分利用。



(a) 三亚市研究区 GEBI 指数
(a) GEBI index in the research area of Sanya



(b) 三亚市研究区冷热点分布
(b) Distribution of hot and cold spots in the research area of Sanya

图9 三亚研究区 GEBI 指数及冷热点分布

Fig. 9 GEBI index and distribution of hot and cold spots in Sanya study area

两个城市区域的绿度空间热环境效益指数结果表明,通常在一些建筑物密集或欠开发,且植被分布零散的区域所表现出的环境效益更低,较少的植被使得该地区热量集中且难以通过植被蒸发冷却的方式进行热量转化,从而导致较高的地表温度,在这些区域应该加强绿化及提升各类型植物的多样性和接触度。

4.6 研究意义与局限性

评价空间连续的城市人居绿地环境质量结果表明,两座城市绿地质量总体相对较好,但是在一些老旧居住区域和大型商业区仍存在绿度分布不均等问题。在未来的城市规划发展中,以下方面仍需加强:(1)行道树绿化,在较宽阔的主干道路上合理规划种植行道树,在较窄支路上可选择合适位置补植行道树,例如街道转角、空间节点等地方,进而形成良好的遮阴效果,调节区域小气候;(2)屋顶绿化,大型商业区多以平顶低层建筑为主,可适当进行屋顶绿化,充分合理利用建筑物,既能美化环境,也能降温隔热,净化空气;(3)墙面绿化,在一些老旧住宅区,建筑

物密集难以统一规划,可充分利用住宅及围墙墙面,使用攀援植物或铺贴式方法形成立体种植和垂直的绿化来增加小区中的绿化量。利用墙体进行绿化是立体绿化中占地面积最小、绿化面积最大的方式,可大大提升住宅区的景观和绿化环境。充分利用城市建筑物几何空间,融入景观生态理念,构建立体化城市绿地,推动海南城市绿色发展,树立可持续发展典范。

本研究也存在一定的局限性,虽然研究构建一种绿度空间评价指数,并计算了城市研究区的绿度环境质量,但单时相的研究结果可能存在偶然性,对于地表温度的降低和城市热岛的缓解是多因素共同作用的,且城市植被的环境效益不仅体现在对热环境的影响。本研究重点关注城市绿度空间的热缓解作用,在未来研究中,需要开展多时相的研究分析使得结果更加可靠,除此之外,也需要分析更多影响因素,构建更加全面的城市绿度空间质量评价体系。

5 结 论

本文研究基于国产高分六号卫星,针对海南

省重点城市海口市、三亚市开展城市绿度空间环境效益分析,在进行乔、灌、草精细化分类基础上,提出一种绿度空间环境效益评价指数,对城市人居绿地环境质量开展空间连续的评价。研究结果表明:

(1) 基于多尺度分割方法和随机森林模型可以实现城市植被精细化提取。在乔木、灌木、草地类型划分上,海口市研究区分类精度87.6%,三亚市研究区分类精度94.13%。海口市植被类型以灌木为主导,三亚市植被类型以草地及灌木为主导。

(2) 基于Pearson相关性分析和地理探测器法开展城市景观格局和地表温度间的相互作用分析,结果表明绿地面积越大、分布越聚集、多样性越高、不同类型植被斑块间接触程度越高、单个斑块面积越大,越有利于绿地降温效应的发挥;绿地景观越破碎和分散,斑块形状越不规则,绿地降温效应越差。

(3) 结合层次分析法构建城市绿度空间环境效益评价指数,并采用移动窗口法获得空间连续的城市评价结果,两座城市表现出不同特性:海口市研究区GEBI的高值区和低值区交错分布,然而三亚市在空间上具有显著的差异性,研究区西部、东部及南部GEBI值较高,而中部较低。通过该方法可精确识别出城市绿度环境优势区域和脆弱区域。

研究基于国产GF-6号卫星,针对海南省重点城市海口市、三亚市开展城市绿度空间环境效益分析,评价空间连续的城市人居绿地环境质量,对城市绿色发展布局合理区域给予肯定,也精确识别出城市绿度环境脆弱区域。该研究推动国产卫星遥感数据在城市生态环境领域的应用,同时为城市规划建设和精细管理提供辅助参考。

参考文献(References)

Bai Y J, Wang K, Ren Y, Li M, Ji R R, Wu X, Yan H, Lin T, Zhang G Q, Zhou X Y, Mei H F and Ye H. 2024. 3D compact form as the key role in the cooling effect of greenspace landscape pattern. *Ecological Indicators*, 160: 111776 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111776]

Chang G J, Oh Y and Shoshany M. 2024. Regional and global-scale LULC mapping by synergetic integration of NDVI from optical data and degree of polarization from SAR data. *IEEE Journal of*

Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17: 2622-2628 [DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3343524]

Chinchilla J, Carbonnel A and Galleguillos M. 2021. Effect of urban tree diversity and condition on surface temperature at the city block scale. *Urban Forestry and Urban Greening*, 60: 127069 [DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127069]

Cuthbert M O, Rau G C, Ekström M, O'Carroll D M and Bates A J. 2022. Global climate-driven trade-offs between the water retention and cooling benefits of urban greening. *Nature Communications*, 13(1): 518 [DOI: 10.1038/s41467-022-28160-8]

Guo G H, Wu Z F and Chen Y B. 2019a. Complex mechanisms linking land surface temperature to greenspace spatial patterns: evidence from four southeastern Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 674: 77-87 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.402]

Guo L J, Liu R M, Men C, Wang Q R, Miao Y X and Zhang Y. 2019b. Quantifying and simulating landscape composition and pattern impacts on land surface temperature: a decadal study of the rapidly urbanizing city of Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 654: 430-440 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.108]

Hagen-Zanker A. 2016. A computational framework for generalized moving windows and its application to landscape pattern analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 44: 205-216 [DOI: 10.1016/j.jag.2015.09.010]

Huang J. 2008. Image Classification Based on Fractal Dimension and Co-Occurrence. Wuhan: Wuhan University of Technology (黄晶. 2008. 基于分形维度与灰度共生矩阵的图像分类研究. 武汉: 武汉理工大学)

Huang Q Y, Xu C, Haase D, Teng Y M, Su M R and Yang Z F. 2024. Heterogeneous effects of the availability and spatial configuration of urban green spaces on their cooling effects in China. *Environment International*, 183: 108385. [DOI: 10.1016/j.envint.2023.108385]

Kordi M and Brandt S A. 2012. Effects of increasing fuzziness on analytic hierarchy process for spatial multicriteria decision analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(1): 43-53 [DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2011.07.004]

Liang H L, Chen D and Zhang Q P. 2017. Assessing Urban Green Space distribution in a compact megacity by landscape metrics. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(1): 64-74 [DOI: 10.3846/16486897.2016.1210157]

Meng Q Y. 2023. Remote Sensing of Urban Green Space[M].

Pi X Y, Zeng Y N and He C Q. 2021. High-resolution urban vegetation coverage estimation based on multi-source remote sensing data fusion. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(6): 1216-1226 (皮新宇, 曾永年, 贺城墙. 2021. 融合多源遥感数据的高分辨率城市植被覆盖度估算. 遥感学报, 25(6): 1216-1226) [DOI: 10.11834/jrs.20219178]

Pu R L and Landry S. 2020. Mapping urban tree species by integrating multi-seasonal high resolution pléiades satellite imagery with airborne LiDAR data. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53: 126675 [DOI: 10.1016/j.ufug.2020.126675]

- Pu R L, Landry S and Yu Q Y. 2018. Assessing the potential of multi-seasonal high resolution pléiades satellite imagery for mapping urban tree species. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 71: 144-158 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.05.005]
- Ren X Y. 2016. Urban Forest Vegetation Classification in Consideration of Vegetation Phenology Based on High Spatial Resolution Satellite Imagery. Nanjing: Nanjing Forestry University (任芯雨. 2016. 考虑植被季相节律的高分辨率遥感影像城市森林分类. 南京: 南京林业大学).
- Saaty T L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill
- Shah A, Garg A and Mishra V. 2021. Quantifying the local cooling effects of urban green spaces: evidence from Bengaluru, India. *Landscape and Urban Planning*, 209: 104043 [DOI: 10.1016/j.landurbplan.2021.104043]
- Su B Y, Zhan W F, Du H L, Jiang S D, Wang C G, Dong P, Wang C L and Liu Z H. 2024. Diurnal differences between surface and canopy heat islands in major provincial capital cities of China. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(8): 1885-1898 (苏博阳, 占文凤, 杜惠琳, 江斯达, 王晨光, 董攀, 王春丽, 刘紫涵. 2024. 中国主要省会城市地表与冠层热岛日内逐时变化特征差异研究. 遥感学报, 28(8): 1885-1898) [DOI: 10.11834/jrs.20243362]
- Sun Z. 2019. Thermal environment characteristic and cooling effect of greenery in Beijing First Green Belt area. *Chinese Journal of Ecology*, 38(11): 3496-3505 (孙喆. 2019. 北京市第一道绿化隔离带区域热环境特征及绿地降温作用. 生态学杂志, 38(11): 3496-3505) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.201911.027]
- Tian L J. *The Composition of Vegetation Effect on Avian Community in Urban and Suburb: A Case Study in Haikou and Sanyacities*. Haikou: Hainan University (田璐嘉. 城市与郊区植被组成对鸟类群落的影响——以海口市和三亚市为例. 海口: 海南大学, 2022) [DOI: 10.27073/d.cnki.ghadu.2022.000953]
- Verma R and Kundapura S. 2020. Urban Weighted Green Index-a study of urban green space in relation to Land Surface Temperature for Lucknow city, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20: 100429 [DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100429]
- Vigneshwaran S and Kumar S V. 2021. Comparison of classification methods for urban green space extraction using very high resolution worldview-3 imagery. *Geocarto International*, 36(13): 1429-1442 [DOI: 10.1080/10106049.2019.1665714]
- Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X and Zheng X Y. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(1): 107-127 [DOI: 10.1080/13658810802443457]
- Wang J F and Xu C D. 2017. Geodetector: principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 116-134 (王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 72(1): 116-134) [DOI: 10.11821/dlxb201701010]
- Wang J F, Zhang T L and Fu B J. 2016. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 67: 250-256 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.02.052]
- Wang W, Lin Z Y, Zhang L W, Yu T, Ciren P and Zhu Y. 2019. Building visual green index: a measure of visual green spaces for urban building. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40: 335-343 [DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.004]
- Wang X M, Meng Q Y, Zhao S H, Li J, Zhang L L and Chen X. 2020. Urban green space classification and landscape pattern measurement based on GF-2 image. *Journal of Geo-Information Science*, 22(10): 1971-1982 (汪雪森, 孟庆岩, 赵少华, 李娟, 张琳琳, 陈旭. 2020. GF-2 在城市绿地分类及景观格局度量中的应用. 地球信息科学学报, 22(10): 1971-1982) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200122]
- Wang X M, Meng Q Y, Zhang L L and Hu D. 2021. Evaluation of urban green space in terms of thermal environmental benefits using geographical detector analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 105: 102610 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102610]
- Wu J H, Meng Q Y, Gao L, Zhang L L, Zhao M F and Su C. 2024. A deep learning framework for 3D vegetation extraction in complex urban environments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 129: 103798. [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103798]
- Xiang Y, Ye Y, Peng C C, Teng M J, and Zhou Z X. 2022. Seasonal variations for combined effects of landscape metrics on land surface temperature (LST) and aerosol optical depth (AOD). *Ecological Indicators*, 138:108810 [https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108810]
- Yuan J W, Wu C, Du B, Zhang L P and Wang S G. 2020. Analysis of landscape pattern on urban land use based on GF-5 hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 465-478 (袁静文, 武辰, 杜博, 张良培, 王树根. 2020. 高分五号高光谱遥感影像的城市土地利用景观格局分析. 遥感学报, 24(4): 465-478) [DOI: 10.11834/jrs.20209252]
- Zhao X, Liu J J, Hao H K and Yang Y Z. 2020. Quantifying the spatial heterogeneity and driving factors of aboveground forest biomass in the urban area of Xi'an, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12): 744 [DOI: 10.3390/ijgi9120744]

Thermal environmental benefit based on the fine landscape pattern of urban green space

ZHANG Linlin^{1,2,3}, WU Jiahao^{2,4}, MENG Qingyan^{1,2,3}, WANG Xuemiao^{2,3}, DU Hongyu^{2,3}, PAN Jing⁵

1. Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Hainan Aerospace Information Research Institute, Sanya 572029, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City and Department of Ocean Science and Technology, University of Macau, Macao 519000, China;

5. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract: As the primary region for ecological civilization construction, urban areas have seen an increasing focus on improving their ecological environment. Green space, as a crucial component of urban ecosystems, holds significant importance in enhancing urban environmental quality, promoting biodiversity, and improving the overall well-being of urban residents. Conducting evaluations of the environmental benefits of green spaces can provide valuable insights for fine-grained urban environmental management. Under the rapid urbanization in China, this study conducts a comprehensive assessment of the thermal environmental benefits produced by typical urban green spaces in Hainan Province using advanced remote sensing techniques based on Gaofen-6 and Landsat satellite data. First, vegetation in the study area is extracted and classified into three main types—trees, shrubs, and grasslands—using multiscale segmentation and random forest algorithms. Various landscape pattern indices are computed, and multiregional surface temperatures are inverted to analyze the effect of urban green landscapes on the urban heat environment. By employing Pearson correlation analysis and geographical detector methods, the study investigates the characteristics of the drivers linking green landscape patterns with surface temperatures. Finally, utilizing a hierarchical analysis method based on selected factor indicators, a Green Space Environmental Benefit Index (GEBI) is established to quantitatively assess the thermal environmental benefits generated by green spaces in Haikou and Sanya Cities. Research findings reveal distinctive features of green spaces in Haikou and Sanya. (1) Haikou City is predominantly characterized by shrub vegetation, whereas Sanya City is dominated by grassland and shrub vegetation. (2) The cooling effect of green spaces is correlated with factors such as green area size and diversity, as well as landscape patch shape and density. Green spaces exhibit poorer cooling effects when fragmented and irregularly shaped. (3) The GEBI distributions in the study areas show alternating high- and low-value regions. The GEBI hotspots and cold spots in Haikou City are concentrated in the north, whereas in Sanya City, hotspots are mainly located in the west and southeast, with a smaller cold spot range. Overall, the quality of green spaces in both cities is relatively good, but an uneven distribution of green spaces persists in some older residential areas and large commercial districts. This study identifies areas of vulnerability and strengths in green environmental spaces, offering a paradigm for promoting green city development. It represents an advancement in the study of urban green space environmental benefits, providing insights for urban ecological planning, construction, and fine-grained environmental management, thereby facilitating sustainable urban development.

Key words: urban remote sensing, urban green space, surface temperature, environmental benefits, Geographical detector, machine learning, GF-6 satellite

Supported by Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (No. 623QN328); National Natural Science Foundation of China (No. 42171357, 42201384); FY-3 Lot 03 Meteorological Satellite Engineering Ground Application System Ecological Monitoring and Assessment Application Project (Phase I): (No. ZQC-R22227); Youth Innovation Promotion Association CAS (No. 2023139)