

面向生态与感知双目标的海口市公园植物群落配置模式优化研究

Research on the Optimization of Plant Community Configuration Models in Parks of Haikou City for Dual Objectives of Ecology and Perception

茆桐凤 熊以琳 苏心雨 唐林洁 史佑海*

MAO Tongfeng, XIONG Yilin, SU Xinyu, TANG Linjie, SHI Youhai*

摘要

当前城市公园建设存在过度注重视觉效果而忽视生态效益和使用者实际需求等问题, 制约城市公园可持续发展和以人为本理念的落实。以热带滨海城市海口为研究对象, 基于生态与感知双视角, 采用层次分析法与模糊综合评价法, 建立“生态-感知”双目标评价体系。结果表明: 生态功能准则层的权重较高, 为 55.06%。“乔-草”型群落的舒适度改善效果最佳, 但因多样性低、层次单一而综合评分受限; “乔-灌-草”型群落综合得分最高, 验证了多指标平衡的必要性。最后, 基于“生态为基、感知为导”原则提出种植乡土植物、强化地域特色等植物群落配置优化策略。

Abstract

Currently, the construction of urban parks tends to overemphasize visual aesthetics at the expense of ecological benefits and users' actual needs, thereby constraining the sustainable development of urban parks and the implementation of the human-centered concept. Taking the tropical coastal city of Haikou as the research object, and based on the dual perspectives of ecology and perception, this study employs the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE) to establish an 'ecology-perception' dual-target evaluation system. The results indicated that the ecological-function criteria layer carried a higher weight of 55.06%. While the tree-herb community demonstrated the greatest improvement in thermal comfort, its limited biodiversity and simple stratification resulted in a lower overall score. Conversely, the tree-shrub-herb community achieved the highest comprehensive score, underscoring the need to balance multiple indicators. Finally, based on the principle of 'ecology as the foundation, perception as the guide', the study proposes optimization strategies for plant community configuration, including planting native plants and enhancing regional characteristics.

文章亮点

1) 构建了热带城市公园植物群落景观评价体系, 将生态功能与景观感知两个维度进行系统整合, 实现了从单一生态评价向生态与感知协同评价的方法创新。2) 突破了传统景观评价的描述性局限, 建立了基于权重优先级的配置决策序列, 并针对热带滨海城市特征提出配置策略, 为热带城市公园植物景观设计提供了可操作的实践路径。

关键词

城市公园; 植物群落配置; 生态功能; 景观感知; 景观评价; AHP-FCE

Keywords

Urban parks; Plant community configuration; Ecological function; Landscape perception; Landscape evaluation; AHP-FCE

收稿日期: 2025-08-08

修回日期: 2025-09-12

城市绿地是实现生态效益与人文福祉协同的关键载体, 其中植物群落发挥着重要作用^[1]。然而, 传统植物配置往往以生态和美学功能为出发点, 忽视了这些功能必须经由使用者感知才能转化为心理福祉^[2]; 同时对地域气候特征与居民

真实感受的考量不足, 导致了“高绿量、低满意度”的困境, 限制了公园综合效益的发挥^[3]。

国内外关于城市公园植物配置的研究早期多聚焦于“绿量”“多样性”等生态结构指标与“美景度”等视觉美学维

度^[4]。随后, 研究焦点转向对固碳、降温等客观生态功能的量化^[5], 但其评估仍侧重于生态“供给”端, 难以揭示生态功能向人文福祉转化的复杂路径。近年来, 植物群落生态功能研究呈现出从宏观结构描述向微观机制解析的深化趋势^[6]; 另一方面, 随着“以人为本”理念的深化, 学术焦点正逐步从“功能导向”转向“体验导向”^[7]。此外, 景观感知研究也实现了从视觉单维主导到多感官感知的重要转向^[8-9]。研究表明, 景观感知需通过认知和情感路径与文化生态系统服务建立联系, 而非从生态功能到心理效益的直接转化^[10]。这证实了生态功能与人类福祉之间并非简单线性关系, 而表现出路径依赖与心理中介的复杂机制。尽管研究不断深入, 但现有研究框架在生态与感知维度的整合上仍显不足, 且指标遴选及聚合方法缺乏统一标准^[11], 导致结果可比性差, 难以形成普适性结论。

本研究以海口市为例, 基于生态与感知理论, 结合层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和模糊综合评价法 (Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE), 构建热带滨海地区城市公园植物群落景观评价模型。研究拟通过量化评估植物群落的客观生态功能及其改善物理环境与维持系统稳定的效能, 并调查使用者的多感官景观感知及其对景观形成的主观感受、认知与评价, 提出适合热带城市公园的植物群落配置策略, 以期在设计中更好地平衡生态效益与人的需求, 从而提升热带地区城市公园的景观质量和居民游憩体验。

1 研究区域概况

海口市 (19° 31' 32" N~20° 04' 52" N, 110° 07' 22" E~110° 42' 32" E) 地处低纬度热带北缘, 属于热带季风海洋性气候, 陆地面积为 2 304.84 km², 常住人口 300.16 万。海口干湿季分明, 降水时期集中, 全年日照时间长, 年平均气温 24.4℃, 年平均降水量 1 696.6 mm, 年平均日照时数在 2 000 h 以上^[12]。截至 2024 年

底, 海口市建成区公园绿地面积达 26.393 1 km², 人均公园绿地面积为 12.1 m², 公园绿化活动场地服务半径覆盖率达到 85.56%^[13]。

2 研究方法

研究将层次分析法与模糊综合评价法相结合, 构建热带城市公园植物群落景观评价体系, 以评估公园的综合满意度。层次分析法是一种系统化、层次化的多准则决策方法, 可帮助决策者对多个指标进行排序和权重确定^[14]。模糊综合评价法应用模糊关系合成的原理, 从多个因素对评判事物隶属度等级状况进行综合评判^[15]。两种方法的结合可以综合考虑客观分析和主观判断, 从而提高评价结果的科学性和可信度^[16]。

本研究首先通过层次分析法构建指标体系, 并结合专家打分计算各指

标权重。然后, 结合指标性质设计大众调查问卷, 并向海口市居民发放问卷, 再利用模糊综合评价法对调研数据进行分析, 最终得出各样方的综合得分。

2.1 样地选择

综合考虑生态功能和景观感知 2 项评价需求, 本研究选取海口主城区居民使用率较高的万绿园、人民公园、金牛岭公园和白沙门公园 4 座公园作为调研区域。其中万绿园、白沙门公园为滨海型公园, 人民公园、金牛岭公园为离海型公园。

研究选取环境条件相似 (避免大块水域)、游人多且利用率高、群落结构类型丰富且发育较成熟的绿地作为样方, 每类群落选择的样方大小为 20 m × 20 m^[17]。因各公园原生群落基数不同, 实际布置的样方数量存在差异, 最终共布设 38 个样方 (表 1,

表 1 样点基本信息

Tab.1 Basic information of the sampling sites

群落编号	空间类型	结构类型	主要植物
B0 (对照点)	铺装裸地	-	-
B1	覆盖	乔-灌-草	羊蹄甲 <i>Bauhinia purpurea</i> 、榕树 <i>Ficus microcarpa</i> 、龙船花 <i>Ixora chinensis</i> 、细叶红桑 <i>Acalypha wilkesiana</i> 'Monstroso'、蓝花草 <i>Ruellia simplex</i> 、合果芋 <i>Syngonium podophyllum</i>
B2	半开敞	灌-草	朱蕉 <i>Cordyline fruticosa</i> 、叶子花 <i>Bougainvillea spectabilis</i> 、小叶龙船花 <i>Ixora coccinea</i> 'Xiaoye'、沟叶结缕草 <i>Zoysia matrella</i> 、蓝花草
B3	半开敞	乔-草	椰子 <i>Cocos nucifera</i> 、沟叶结缕草 <i>Zoysia matrella</i>
B4	开敞	草	细叶结缕草 <i>Zoysia pacifica</i> 、地毯草 <i>Axonopus compressus</i>
B5	半开敞	乔-草	秋枫 <i>Bischofia javanica</i> 、狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>
B6	覆盖	乔-草	杧果 <i>Mangifera indica</i> 、黄花风铃木 <i>Handroanthus chrysanthus</i> 、合果芋、沟叶结缕草
B7	覆盖	乔-灌-草	火焰树 <i>Spathodea campanulata</i> 、山黄麻 <i>Trema tomentosa</i> 、黄金榕 <i>Ficus microcarpa</i> 'Golden Leaves'、棕竹 <i>Rhapis excelsa</i> 、鸢尾菊 <i>Sphagneticola calendulacea</i> 、地毯草
B8	半开敞	乔-草	椰子、地毯草
B9	覆盖	乔-灌-草	榄仁 <i>Terminalia catappa</i> 、椰子、对叶榕 <i>Ficus hispida</i> 、基及树 <i>Carmona microphylla</i> 、朱蕉、黄苞蝎尾蕉 <i>Heliconia latispatha</i>
B10	覆盖	乔-灌-草	榕树、凤凰木 <i>Delonix regia</i> 、朱缨花 <i>Calliandra haematocephala</i> 、黄金榕、黄槐决明 <i>Senna surattensis</i> 、蓝花草、黄苞蝎尾蕉
B11	半开敞	灌-草	叶子花、蔓花生 <i>Arachis duranensis</i> 、沟叶结缕草、蓝花草
J0 (对照点)	铺装裸地	-	-
J1	开敞	草	地毯草、狗牙根
J2	半开敞	乔-草	榕树、地毯草

表1 样点基本信息 (续)
Tab.1 Basic information of the sampling sites (Continued)

群落编号	空间类型	结构类型	主要植物
J3	半开敞	灌 - 草	宫粉龙船花 <i>Ixora × westii</i> 、赤苞花 <i>Megaskepasma erythrochlamys</i> 、细叶结缕草、地毯草
J4	半开敞	灌 - 草	十字爵床 <i>Crossandra infundibuliformis</i> 、小叶龙船花、细叶结缕草、龙须石蒜 <i>Eucrosia bicolor</i>
J5	覆盖	乔 - 灌 - 草	幌伞枫 <i>Heteropanax fragrans</i> 、秋枫、板蓝 <i>Strobilanthes cusia</i> 、大青 <i>Clerodendrum cyrtophyllum</i> 、海芋 <i>Alocasia odora</i> 、地毯草
J6	半开敞	乔 - 草	罗汉松 <i>Podocarpus macrophyllus</i> 、黄桐 <i>Endospermum chinense</i> 、地毯草、蜆蜞菊
J7	半开敞	乔 - 草	青梅 <i>Vatica mangachapoi</i> 、榄仁、地毯草
J8	覆盖	乔 - 灌 - 草	铁刀木 <i>Senna siamea</i> 、大青、假蒟 <i>Piper sarmentosum</i> 、海芋
J9	覆盖	乔 - 灌 - 草	鹊肾树 <i>Streblus asper</i> 、榕树、鸡冠爵床 <i>Odontonema tubaeforme</i> 、假苹婆 <i>Sterculia lanceolata</i> 、潺槁木姜子 <i>Litsea glutinosa</i> 、假蒟
R0(对照点)	铺装裸地	-	-
R1	覆盖	乔 - 灌 - 草	幌伞枫、蒲葵 <i>Livistona chinensis</i> 、棕竹、朱蕉、合果芋、地毯草
R2	覆盖	乔 - 灌	洋蒲桃 <i>Syzygium samarangense</i> 、钝叶鸡蛋花 <i>Plumeria obtusa</i> 、洒金变叶木 <i>Codiaeum variegatum</i> ‘Aucubifolium’、红背桂 <i>Excoecaria cochinchinensis</i> 、水鬼蕉 <i>Hymenocallis littoralis</i>
R3	覆盖	乔 - 灌 - 草	幌伞枫、海南山姜 <i>Alpinia hainanensis</i> 、变叶木 <i>Codiaeum variegatum</i> 、棕竹、福建茶、小花十万错 <i>Asystasia gangetica</i> subsp. <i>micrantha</i>
R4	覆盖	灌 - 草	鸡蛋花 <i>Plumeria rubra</i> 、小叶龙船花、棕竹、福建茶、沟叶结缕草
R5	覆盖	乔 - 灌	龙眼 <i>Dimocarpus longan</i> 、红背桂、福建茶
R6	半开敞	乔 - 草	圆柏 <i>Juniperus chinensis</i> 、烟火树 <i>Clerodendrum quadriloculare</i> 、地毯草
R7	覆盖	乔 - 灌	米仔兰 <i>Aglaia odorata</i> 、变叶木、红背桂、榕树、地毯草
R8	开敞	草	菩提树 <i>Ficus religiosa</i> 、结缕草 <i>Zoysia japonica</i> 、狗牙根
R9	半开敞	乔 - 草	椰子、地毯草
W0(对照点)	铺装裸地	-	-
W1	开敞	草	地毯草、沟叶结缕草
W2	半开敞	乔 - 草	椰子、地毯草
W3	半开敞	乔 - 草	椰子、地毯草、蜆蜞菊
W4	半开敞	乔 - 草	榕树、地毯草
W5	半开敞	乔 - 草	秋枫、地毯草
W6	开敞	灌 - 草	海南蒲桃 <i>Syzygium hainanense</i> 、柬埔寨龙血树 <i>Dracaena cambodiana</i> 、地毯草、沟叶结缕草
W7	开敞	灌 - 草	凤尾竹 <i>Bambusa multiplex</i> f. <i>ferleaf</i> 、佛肚竹 <i>Bambusa ventricosa</i> 、地毯草、沟叶结缕草
W8	半开敞	乔 - 灌 - 草	榕树、鹅掌柴 <i>Heptapleurum heptaphyllum</i> 、朱槿 <i>Hibiscus rosa-sinensis</i> 、沟叶结缕草、地毯草
W9	覆盖	乔 - 灌 - 草	秋枫、高山榕 <i>Ficus altissima</i> 、露兜树 <i>Pandanus tectorius</i> 、地毯草、水鬼蕉

注：B为白沙门公园区域的样方，J为金牛岭公园区域的样方，R为人民公园区域的样方，W为万绿园区域的样方。

图1)。同时在各研究区选取一块硬质铺装裸地作为空白对照。样点可分为开敞空间、半开敞空间、覆盖空间3种植物空间类型，以及“乔-灌-草”“乔-灌”“乔-草”“灌-草”“草”5种空间结构。

2.2 评价因子选择

基于海口市公园植物群落景观特征调研，遵循科学性、系统性、实用性和代表性原则，结合相关研究对评价因子的选择^[18-21]，并综合考虑场地本身条件和公众感知两大核心影响因素^[22]，本研究从与生态功能和景观感知相关的各影响因子中筛选出能够科学衡量两者的核心指标，建立热带滨海地区城市公园植物群落景观评价体系。

该体系包含2个准则层和13个指标层。生态功能准则层(B1)包含6个指标，以评估植物群落的客观生态属性与服务能力。其中，植物多样性(C1)通过Shannon-Wiener指数量化物种丰富度与均匀度；群落稳定性(C2)通过物种组成、年龄结构及灾后恢复状况评估植物系统抗干扰能力；三维绿量(C3)通过冠层体积等评估生态系统服务强度；乡土植物占比(C4)从种源地域性出发，衡量植物对本地环境的适应性与长期自我维持潜力；群落时序动态(C5)通过观测群落季相特征在时间序列上的丰富度，量化群落生态过程在时间维度上的变化规律；微气候调节(C6)通过温度、湿度、风速等指标量化群落的生理调节功能。感知体验准则层(B2)包含7个指标，以评估使用者对植物景观的主观感受与体验质量。其中，地域特色(C7)关注植物配置对地方风貌与人文意象的呈现能力；空间层次(C8)关注植物作为设计元素对空间的划分与营造能力；视觉美感(C9)关注植物作为视觉要素在画面构图中的美学效果；听觉感受(C10)关注风吹叶响、鸟鸣虫吟等自然声景的营造效果；嗅觉感受(C11)关注植物花香、叶香等气息对情绪体验的积极影响；空间安全性(C12)关注植被布局的视野通透性、路径可达性与潜在风险规避；游憩趣味性(C13)评估空间是否具备引发探索、互动与沉浸

式体验的特质。

该评价体系从植物群落的客观生态属性与使用者的主观感知两个维度建立评价标准，为热带城市公园植物群落的综合评估提供系统框架。其中 C1、C3、C4、C5、C6 采用定量评价方法，其他指标采用定性评价方法。

2.3 定量指标测定

首先，植物多样性指标 (C1) 运用 Shannon-Wiener 多样性指数来计算，公式如下：

$$H = - \sum_{i=1}^{S_H} P_i \ln P_i \quad (1)$$

式 (1) 中， S_H 为物种总数， P_i 为第 i 个物种的个体数在群落所有物种个体总数中的占比。

三维绿量指标 (C3) 则参照刘常富等^[23]提出的方法，利用冠幅 x 、冠高 y 、面积 s 、株高 z 等参数计算。其中，乔木绿量根据其树冠形状采用相应的公式计算 (表 2)，而灌木及草本的绿量 $= s \times z$ 。

乡土植物占比 R_{native} (C4) 计算公式如下：

$$R_{\text{native}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_R} Q_{\text{native},i}}{\sum_{j=1}^{m_R} Q_{\text{total},j}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式 (2) 中 n_R 为乡土植物物种数， m_R 为总植物物种数， $Q_{\text{native},i}$ 为第 i 种乡土植物的个体数， $Q_{\text{native},j}$ 为第 j 种植物的个体数。植物乡土属性的判定依据《海南植物志》^[24]。

群落时序动态指标 (C5) 通过 Simpson 指数进行计算，公式为：

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S_D} p_{Di}^2 \quad (3)$$

式 (3) 中， S_D 为观赏特性的类别总数， p_{Di} 为第 i 类观赏特性植物的物种数在群落中所有具有观赏特性的植物物种总数的占比。

微气候调节指标 (C6) 的测定选择在旱季和雨季交替临界的四月下旬进行，数据采集需选择 3 个气候条件相近、天气晴朗具微风 (风速不大于 2 m/s) 的白天 (8:00—18:00)，采用移动观测法，每 2 h 测量一次测点的温度、湿度和风速数据。测点设置于各群落样方的中心，观测高度为距离地面 1.5 m 垂直高度处，测量仪器为华谊 MS6252B 数字风速仪。由于滨海区域风速变化较大，在每个测量点每 10 s 采取一次瞬时值，共采集 3 组数据，最终取其平均值代表此测量点的空气温度、相对湿度和风速。基于采集的数据，研究运用陆鼎煌综合舒适度指数 $S^{[25]}$ 计算微气候调节指标，



图 1 四处城市公园样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in four urban parks

公式如下:

$$S = 0.6 \times |T - 24| + 0.07 \times |RH - 70| + 0.5 \times |V - 2| \quad (4)$$

式 (4) 中, T 表示气温 ($^{\circ}\text{C}$), RH 表示相对湿度 (%), V 表示风速 (m/s), 其中舒适度等级划分如表 3 所示。

2.4 定性指标测定

在文献分析与专家咨询基础上, 针对每一项定性指标的核心内涵, 设计大众调查问卷题项, 按照得分由高到低的顺序, 划分了 5 个评价等级, 即: 好、较好、一般、较差、差。研究于 2025 年 6 月, 对公园周边居民进行随机问卷调查, 要求受访者根据其真实体验, 对每个题项从“好”到“差”进行程度判断。共收到有效问卷 280 份。

2.5 AHP-FCE

研究邀请 15 位专家采用 1-9 标度法对同一层级指标进行两两比较, 构建判断矩阵, 并借助 SPSSPRO 软件计算权重 (表 4)。所有矩阵一致性比率 CR 均小于 0.1, 通过一致性检验。

之后构建评语集, 即涵盖各评价指标所有可能评价结果的集合, 依据评价对象的特点与实际情况, 将评价标准设置为不同等级。本文将评语集设为 $V=\{\text{好、较好、一般、较差、差}\}$, 相应的评价等级隶属度 $U=\{5,4,3,2,1\}$ 。定量指标各分值段对应的评价等级见表 5。

接着建立模糊评价矩阵。本研究以海口市居民填写的 280 份有效问卷为基础, 对各指标进行量化处理, 得到第 i 个因素对于第 j 级评价的隶属度。其中隶属度 F_{ij} 为对第 i 个因素给出 j 级评价的人数占参评总人数的比例, 由此建立模糊关系矩阵:

$$F_{ij} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

然后采用加权平均算子 $M(\bullet, \oplus)$ 模型将指标权重 W_i 与模糊评价矩阵 F_{ij} 相乘得到目标层的隶属度 Z_{ij} , 公式如下:

$$W_i = [w_1 \ w_2 \ w_3 \dots w_n] \quad (6)$$

$$Z_{ij} = W_i \times F_{ij} = [z_{ij}^1 \ z_{ij}^2 \ z_{ij}^3 \dots z_{ij}^n] \quad (7)$$

最后将目标层的隶属度 Z_{ij} 与对应的评语集 V 相乘计算最终模糊评价结果得分 Y_{ij} , 再根据分数所属的评价等级分值区间, 确定各层级指标的最终评价结果。得分计算公式如下:

$$Y_{ij} = [z_{ij}^1 \ z_{ij}^2 \ z_{ij}^3 \dots z_{ij}^n] \times [5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1] \quad (8)$$

最终得出 38 个样方的总模糊评判分值 (表 6)。

表 2 乔木绿量计算公式
Tab.2 Calculation formula for arbor green volume

序号	树冠形状	计算公式
1	卵形 OV	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
2	圆锥形 CO	$\frac{\pi x^2 y}{12}$
3	球形 SP	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
4	半球形 SS	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
5	球扇 SF	$\frac{\pi}{3} (2y^3 - y^2 \sqrt{4y^2 - x^2})$
6	球缺形 AS	$\frac{\pi (3xy^2 - 2y^3)}{6}$
7	圆柱形 RC	$\frac{\pi x^2 y}{4}$

表 3 陆鼎煌综合舒适度指数等级划分
Tab.3 Classification of Lu Dinghuang's comprehensive comfort index

级别	指数范围	说明
1	$S \leq 4.55$	舒适
2	$4.55 < S \leq 6.95$	较舒适
3	$6.95 < S \leq 9.00$	不舒适
4	$S > 9.00$	极不舒适

表 4 各评价指标权重
Tab.4 Weights of the evaluation indicators

目标层 (A)	准则层 (B)	权重 /%	指标层 (C)	权重 /%
热带城市公园 植物群落景观 评价体系 A	生态功能 B1	55.06	植物多样性 C1	11.28
			群落稳定性 C2	10.99
			三维绿量 C3	8.42
			乡土植物占比 C4	7.08
			群落时序动态 C5	10.78
			微气候调节 C6	6.51
景观感知 B2	44.94		地域特色 C7	11.59
			空间层次 C8	8.08
			视觉美感 C9	5.82
			听觉感受 C10	2.81
			嗅觉感受 C11	3.22
			空间安全性 C12	8.42
			游憩趣味性 C13	5.00

3 植物群落景观分析

3.1 评价指标权重分析

在准则层中，生态功能（B1，55.06%）权重高于景观感知（B2，44.94%），说明在植物群落配置中生态功能具有基础性地位。

在指标层中，权重分布呈现出梯度特征：高权重指标（大于 10%）构成了优先保障的核心要素，包括地域特色（C7，11.59%）、植物多样性（C1，11.28%）、群落稳定性（C2，10.99%）、群落时序动态（C5，10.78%）；中等权重指标（7%~10%）作为关键要素，需要在满足核心要素的基础上进行协同优化，包括三维绿量（C3，8.42%）、空间安全性（C12，8.42%）、空间层次（C8，8.08%）、乡土植物占比（C4，7.08%）；特色化指标（小于 7%）虽在体系中权重相对较低，却揭示了精细化设计的具体路径，包括微气候调节（C6，6.51%）、视觉美感（C9，5.82%）、游憩趣味性（C13，5.00%）、嗅觉感受（C11，3.22%）、听觉感受（C10，2.81%）。

3.2 综合评价结果分析

3.2.1 群落配置类型分析

不同类型植物群落综合评价得分范围为 2.299 6~3.487 8（表 6）。其中有 18 个植物群落处于一般以上水平（得分大于 3），占总群落的 47%；没有处于“较差”评分及以下的样地（得分不大于 2），表明研究区域内未出现功能严重缺失或配置明显不合理的植物群落。

群落空间类型按平均得分排序从

大到小依次为：覆盖空间、半开敞空间、开敞空间，群落结构按平均得分排序从大到小依次为：乔-灌-草、灌-草、乔-灌、乔-草、草。高分样地主要分布在覆盖空间和半开敞空间，且以乔-灌-草结构为主。

3.2.2 微气候调节分析

为应对热带滨海地区高温高湿的气候条件，本文将微气候调节能力作为核心“功能亮点”深入分析，探讨不同植物群落结构对微气候的影响。

单因素方差分析表明（表 7），对照组的日平均舒适度指数 S 值（ 9.33 ± 0.25 ）与所有植物群落结构均呈显著差异（ $P<0.05$ ），不同结构类型绿地的日均 S 值降低率从大到小依次为乔-草（18.92%）、乔-灌-草（15.58%）、草（14.35%）、乔-灌（11.79%）、灌-草（10.43%）。

对公园不同结构类型植物群落在 14:00 的舒适度指数下降值分析表明（图 2），组间的舒适度指数降低效果存在显著差异（ $P<0.05$ ）。乔-草结构的植物群落 S 值降低幅度最大（下降值为 2.36），显著高于其他结构类型（ $P<0.05$ ），这表明在海口市城市绿地中乔-草型植物群落结构可有效削弱高温时段热负荷；其次为乔-灌-草结构（下降值为 1.96）。该结果印证了复层植被在高温时段（14:00）的微气候调节优势。

3.2.3 样地分析

综合评价得分最高的为白沙门公园 B10 样方（覆盖空间，乔-灌-草结构），得分为 3.487 8，其是较为典

表 6 综合得分

Tab.6 Comprehensive scores

群落编号	空间类型	结构类型	得分
B1	覆盖	乔-灌-草	3.399 2
B2	半开敞	灌-草	3.311 5
B3	半开敞	乔-草	2.861 2
B4	开敞	草	2.521 8
B5	半开敞	乔-草	3.052 5
B6	覆盖	乔-草	3.031 0
B7	覆盖	乔-灌-草	3.410 6
B8	半开敞	乔-草	2.903 8
B9	覆盖	乔-灌-草	3.445 7
B10	覆盖	乔-灌-草	3.487 8
B11	半开敞	灌-草	2.995 2
J1	开敞	草	2.579 8
J2	半开敞	乔-草	3.021 9
J3	半开敞	灌-草	3.010 8
J4	半开敞	灌-草	3.314 6
J5	覆盖	乔-灌-草	3.385 0
J6	半开敞	乔-草	3.053 3
J7	半开敞	乔-草	3.189 5
J8	覆盖	乔-灌-草	3.063 7
J9	覆盖	乔-灌-草	3.273 8
R1	覆盖	乔-灌-草	2.915 2
R2	覆盖	乔-灌	3.102 5
R3	覆盖	乔-灌-草	3.195 8
R4	覆盖	灌-草	3.418 8
R5	覆盖	乔-灌	2.909 9
R6	半开敞	乔-草	2.299 6
R7	覆盖	乔-灌	2.918 0
R8	开敞	草	2.597 3
R9	半开敞	乔-草	2.565 6
W1	开敞	草	2.318 0
W2	半开敞	乔-草	2.770 7
W3	半开敞	乔-草	2.975 1
W4	半开敞	乔-草	2.979 2
W5	半开敞	乔-草	2.510 0
W6	开敞	灌-草	2.980 6
W7	开敞	灌-草	2.554 4
W8	半开敞	乔-灌-草	2.905 2
W9	覆盖	乔-灌-草	2.822 9

表 5 定量指标评价等级

Tab.5 Evaluation grades for quantitative indicators

定量指标	好	较好	一般	较差	差
植物多样性 H	[1.500,2.500)	[1.125,1.500)	[0.750,1.125)	[0.375,0.750)	[0,0.375)
三维绿量	[5 000,+ ∞)	[3 500,5 000)	[2 000,3 500)	[800,2 000)	[0,800)
乡土植物占比 R_{native}	[80%,100%]	[60%,80%)	[40%,60%)	[20%,40%)	[0,20%)
群落时序动态 D	[0.60,1.00)	[0.50,0.60)	[0.35,0.50)	[0.15,0.35)	[0,0.15)
微气候调节 (综合舒适度指数 S)	(0,6.95]	(6.95,7.63]	(7.63,8.31]	(8.31,9.00]	(9.00,12.00]

型的热带复层植物群落结构。该样地植物组成丰富，整体群落结构完整、层次清晰：乔木层以榕树和凤凰木为优势种，构成群落主体骨架，与假苹婆、秋枫等树种共同形成连续的上层覆盖，郁闭度较高，有效改善了局部微气候；中层灌木以朱缨花、黄金榕和黄槐决明为主，配合基及树、朱槿、红背桂等，构建了密集的灌木层，丰富了垂直结构；地被层则由蓝花草和黄苞蝎尾蕉主导，配合海芋、艳山姜 *Alpinia zerumbet* 等耐荫植物，形成连续的地表覆盖（图 3）。

相比之下，得分最低的样地为人民公园样方 R6（半开敞空间，乔-草结构），综合评分仅 2.299 6。该样地植物组成较为单一，乔木层仅有圆柏和烟火树，种类与数量均偏少，且树形较差，冠层覆盖不足；中层灌木缺乏，导致垂直结构断层，生态功能与视觉层次显著弱化；地被层完全由地毯草构成，虽覆盖度高，但物种多样性极低，景观单调，感官体验贫乏（图 4）。

4 讨论

4.1 基于权重结构的植物配置优先级

权重结构揭示了热带滨海城市公园植物景观营建中各功能维度的相对重要性。准则层权重分布表明植物景观的自然属性仍是植物群落发展最需要关注的部分，这是其提供所有服务功能的物质基础^[26]。景观感知权重虽略低，但表明使用者的主观感受与体验在评价体系中有不可或缺的地位。这意味着植物配置在满足生态健康的同时，必须将人的感知、需求与福祉作为设计的出发点和落脚点^[27]。

指标层权重的分布表明热带城市公园植物群落优化需以地域文化表达为核心导向，以多样稳定的群落为生态基底，通过安全与美感并重的空间营造，最终实现热带城市公园韧性生态系统与人性化体验空间的一体化构建。此外，微气候调节（C5，6.51%）虽在生态功能层中权重相对较低，但其显著的环境改善效应使其在特定空间中具有重要的应用价值，可作为提升人体舒适度的专项优化点。

表 7 不同植物群落结构日均舒适度指数分析
Tab.7 Analysis of the daily average comfort index for different plant community structures

群落结构类型	日平均值	日变幅	降低率
乔-灌-草	7.88±0.34bc	4.10	15.58%
乔-灌	8.23±0.24b	5.42	11.79%
乔-草	7.57±0.45c	4.10	18.92%
灌-草	8.36±0.27b	4.16	10.43%
草	8.00±0.25bc	5.99	14.35%
对照	9.33±0.25a	4.90	0

注：a、b、c 为方差分析后多重比较的结果标注。

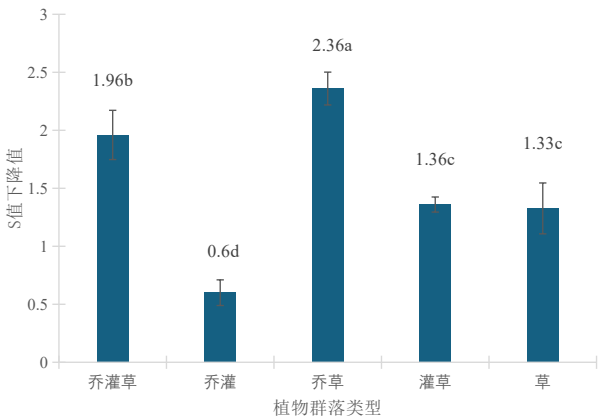


图 2 不同配置类型植物群落舒适度指数 S 值下降值（14:00）
Fig.2 Reduction in comfort index S-value by plant community configuration types (14:00)

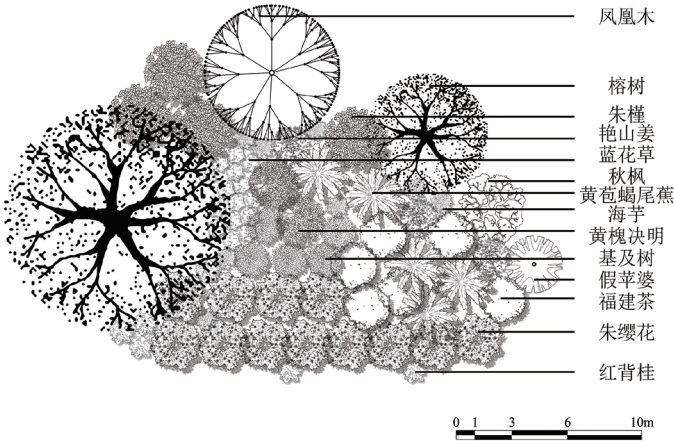


图 3 白沙门公园 B10 平面图
Fig.3 Layout plan of site B10 in Baishamen Park

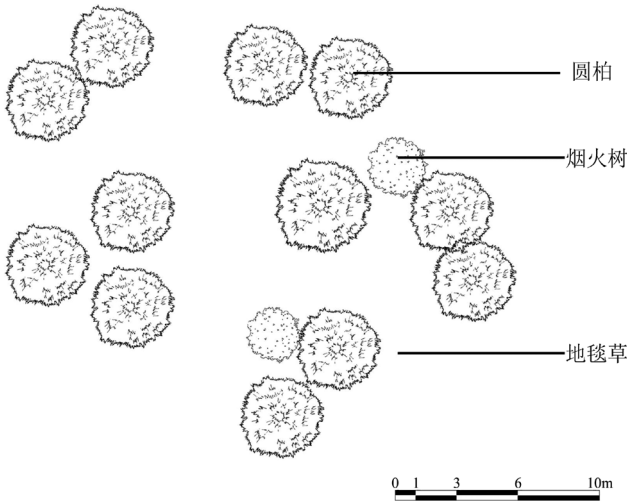


图 4 人民公园 R6 平面图
Fig.4 Layout plan of site R6 in People's Park

4.2 生态功能与景观感知的协同与权衡机制

热带城市公园植物群落的生态功能与人类感知之间并非简单的正相关,而是存在复杂的协同与权衡关系^[9]。协同效应应在本研究中主要表现为复层群落结构所带来的多重效益。以覆盖型乔-灌-草结构类型的群落为例,其密集的冠层结构与丰富的垂直层次,在提供高水平生物多样性和三维绿量的同时,通过有效的遮荫与蒸腾作用显著改善了热舒适度,并创造了丰富的视觉景观与探索空间^[28]。这种多功能的同步提升,证实了植物群落的空间和结构复杂性是多项生态功能与景观感知的共同物质载体^[29]。

权衡关系同样存在。乔-草结构的植物群落虽在微气候调节方面表现突出,但其结构简单性导致了生物多样性维持、群落稳定性与视觉丰富度等方面的不足,从而限制了综合景观评价得分。这一现象揭示了各功能间的权衡:过于追求瞬时的气候调节峰值,可能以牺牲其他生态功能或长期景观吸引力为代价。此外,群落郁闭度与活动空间之间也存在内在权衡,过高的郁闭度在提供优异生态服务与热舒适的同时,可能因影响采光与视野而削弱使用者的空间安全感与活动意愿^[30]。

因此,植物群落配置的本质是在深刻理解协同与权衡机制的基础上,寻求基于场地特定目标的优化路径。对于核心生态保护区,应优先保障协同效应最大化;而对于高密度使用区,则需在确保安全与舒适底线的前提下,巧妙地平衡各项服务,避免因追求单一功能的极致而降低整体效益。

5 公园植物景观营建策略

基于上述对植物配置优先级及生态功能与景观感知协同机制的讨论,本研究进一步提出具有可操作性的公园植物景观营建优化策略。

5.1 生态功能优化策略

在4个公园中,共记录到227种植物,其中141种为本地乡土植物,乡土植物占比达62.1%。这些乡土植物表现出良好的适应性,能够有效适应海口市的气候条件和土壤环境。因此,在群落配置中应优先选择兼具生态功能与文化认同的乡土植物,如椰子、降香 *Dalbergia odorifera*、榄仁和榕树等,这不仅能够提高群落的生态适应性,还能提升生态稳定性,增强抗干扰能力,同时降低养护成本。

相关研究表明,乔木层对温湿效应的影响最为显著^[31],在高温高湿的热带地区,优先选择遮荫效果好、蒸腾作用强的乔木,如榄仁、榕树、高山榕、海南红豆 *Ormosia pinnata* 等,能够有效改善局部微气候,提升居民的舒适度。

在开敞空间中,建议优先选择冠幅适中、透光率可控的乡土乔木,如椰子、楝 *Melia azedarach*、五月茶 *Antidesma bunius*、火烧花 *Mayodendron igneum* 等,通过分层式种植实现遮荫效果与视线通透性的平衡。同时结合地形设计,如微地形堆坡,避免乔木对活动空间和视线通透性造成负面影响,同时兼顾场地原有功能。在覆盖空间与半开敞空间中,合理搭配灌木与草本层可显著提升

生态稳定性。灌木层与草本层的协同作用可减少土壤侵蚀和地表径流,其三维结构能有效拦截降水、减缓流速,从而增强水土保持效益^[32]。

5.2 景观感知优化策略

在群落配置中应强化地域特色,优先选择具有热带特色且形态优美的植物种类,如观花类乔木宫粉羊蹄甲 *Bauhinia variegata*、黄花风铃木、凤凰木,观果类乔木吊瓜树 *Kigelia africana*、五月茶、大花五桠果 *Dillenia turbinata* 和观叶灌木变叶木、红桑、锦叶扶桑 *Hibiscus rosa-sinensis* ‘Cooperi’ 等,提升植物群落的视觉美感。应通过合理的植物搭配和空间布局,营造层次丰富、视觉效果突出的景观空间。同时,选择具有芳香特性和触感特性的植物种类,如白兰 *Michelia × alba*、红花羊蹄甲 *Bauhinia × blakeana*、印度榕 *Ficus elastica*、面包树 *Artocarpus treculianus* 等,能够增强居民的嗅觉和触觉体验。通过优化植物群落配置,居民可在公园中感受到风吹树叶、虫鸣鸟叫等自然声音,从而丰富听觉体验^[33]。此外,在植物配置中注重空间视线的通透性和夜间照明的合理性,能够显著增强空间的安全感和可识别性^[34];避免选择有毒或带刺的植物种类,以减少安全隐患,确保居民在公园中的活动安全与舒适。

6 结论

本研究结合层次分析法和模糊综合评价法,通过构建并应用“生态-感知”双目标评价模型,对植物群落进行系统解析,实现了植物群落景观评价从描述性分析到处方性优化的范式突破。研究发现,热带城市公园植物群落的优化并非生态属性与人文需求的简单叠加,而是一个以生物多样性、群落稳定性为生态基石,以地域特色为文化内核,并统筹空间安全等基础感知需求的协同体系。研究揭示了植物景观中各功能要素之间存在协同与权衡关系,理想的植物配置并非追求单一功能的极致化,而在于寻求多目标间的平衡点。研究确立了生态优先与人本导向相结合的植物配置原则;验证了结构复杂性作为提升综合效益的关键路径,即乔-灌-草复层结构在生态功能完善度与游憩体验品质上具有显著优势。

研究创新性地将生态功能与景观感知两个维度系统整合,通过量化权重明确配置优先级,并基于双目标协同优化的理念提出植物群落优化策略,为热带城市公园的精细化设计提供了可操作的决策框架。然而,由于样地数量有限及调查条件的局限性,目前研究尚无法全面揭示热带滨海地区城市公园植物景观的特征,未来研究可进一步扩大样地范围,验证与优化评价模型的普适性;并结合长期监测数据,探究植物群落动态演变中生态与感知效益的协同规律,推动研究成果的实践转化,为城市公园的可持续发展提供更全面的理论支持和实践指导。

注:图片均为作者自摄自绘。

参考文献:

- [1] 张超, 吴群, 彭建超, 等. 城市绿地生态系统服务价值估算及功能评价——以南京市为例 [J]. 生态科学, 2019, 38 (4): 142-149.
- [2] 孙力, 王敏. 基于生理心理影响的园林植物配置优化探析 [J]. 中国城市林业, 2018, 16 (1): 44-48.
- [3] YANG Z, VAN DEN BERG A E, VAN DIJK T, et al. Quality over Quantity: Contribution of Urban Green Space to Neighborhood Satisfaction[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14 (5): 535.
- [4] 王美婷, 孙冰, 陈雷, 等. 广州市典型性城市公园植物景观美满意度研究 [J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34 (3): 501-510.
- [5] 王晓明, 李贞, 蒋昕, 等. 城市公园绿地生态效应的定量评估 [J]. 植物资源与环境学报, 2005 (4): 44-47.
- [6] HESPEREN R, HU Z, PENG Y, et al. Analysis of coastal storm damage resistance in successional mangrove species[J]. Limnology and Oceanography, 2021, 66 (8): 3221-3236.
- [7] 段进. 面向高品质未来的空间发展设计——城市设计的新理念、新方法与新范式 [J]. 城市规划学刊, 2025 (2): 13-19.
- [8] 朱战强, 李欢. 多感官视角下城市居民滨江空间景观感知偏好 [J]. 中山大学学报 (自然科学版中英文), 2025, 64 (1): 182-194.
- [9] 奚露, 邱尔发, 张致义, 等. 国内外五感景观研究现状及趋势分析 [J]. 世界林业研究, 2020, 33 (4): 31-36.
- [10] WU Y, TANG L, HUANG C B, et al. Enhancing human well-being through cognitive and affective pathways linking landscape sensation to cultural ecosystem services[J]. Landscape Ecology, 2024, 39 (9): 175.
- [11] 刘芦萌, 邬建国. 生态系统服务与人类福祉关系的研究框架、途径与方法 [J]. 自然资源学报, 2024, 39 (9): 2044-2065.
- [12] 海口市气象局. 海口市气候概况 [EB/OL]. (2017-7) [2025-08-08]. <http://www.hkqx.net/Home/HaikouQX>.
- [13] 海口市园林和环境卫生管理局. 海口市 2024 年公园绿地基本情况 [EB/OL]. (2025-06-13) [2025-08-08]. <https://hkscsglj.haikou.gov.cn/hksylhwj/gysl/202506/6e8e282979454c9da2434e3efddfd1cc.shtml>.
- [14] 雷金睿, 辛欣, 宋希强, 等. 基于 AHP 的海口市公园绿地植物群落景观评价与结构分析 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31 (3): 262-268.
- [15] 徐新洲, 薛建辉. 基于 AHP-模糊综合评价的城市湿地公园植物景观美感评价 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27 (2): 213-216.
- [16] 李济任, 许东. 基于 AHP 与模糊综合评价法的森林康养旅游开发潜力评价——以辽东山区为例 [J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39 (8): 135-142, 169.
- [17] 赵娟娟, 欧阳志云, 郑华, 等. 城市植物分层随机抽样调查方案设计的方法探讨 [J]. 生态学杂志, 2009, 28 (7): 1430-1436.
- [18] 周秀斌, 徐玉华, 刘敏, 等. 千岛湖区马尾松林改造后的林下植物多样性和群落稳定性 [J]. 林业科学研究, 2024, 37 (3): 95-105.
- [19] 宁惠娟, 邵锋, 孙茜茜, 等. 基于 AHP 法的杭州花港观鱼公园植物景观评价 [J]. 浙江农业学报, 2011, 23 (4): 717-724.
- [20] 刘晓芳, 吝涛, 赵宇, 等. 城市公园景感要素及其对不同人群公园活动方式的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40 (22): 8176-8190.
- [21] 肖湘东, 孙玮泽, 王利芬, 等. 缓解热岛效应的城市聚合型绿色基础设施植物景观生态适宜度评价 [J]. 园林, 2024, 41 (8): 39-46.
- [22] 周兆森, 林广思. 基于扎根理论的城市公园游憩者包容性感知及影响因素研究 [J]. 景观设计学 (中英文), 2022, 10 (3): 12-37.
- [23] 刘常富, 何兴元, 陈玮, 等. 沈阳城市森林三维绿量测算 [J]. 北京林业大学学报, 2006 (3): 32-37.
- [24] 陈焕镛. 海南植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1964.
- [25] 律江, 李新宇, 段敏杰, 等. 顺义滨河森林公园林内小气候及人体舒适度效应分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (17): 7066-7072.
- [26] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦. 基于植物功能群的生态系统服务形成与维持机制研究 [J]. 生态学报, 2024, 44 (1): 60-66.
- [27] 张栋, 刘桂华. 郑州市树木园植物群落景观综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43 (10): 178-186.
- [28] 邱瑶, 罗涛, 王琼, 等. 夏热冬暖地区绿量构成对城市热环境的影响——以福州居住区为例 [J]. 应用生态学报, 2023, 34 (7): 1932-1940.
- [29] 祝汉收, 翟俊, 侯鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同视角下的重点生态功能区保护特征 [J]. 地理学报, 2022, 77 (5): 1275-1288.
- [30] WANG Y, YAN X, ZHANG X, et al. A Multi-Objective Optimization Framework for Designing Residential Green Space between Buildings Considering Outdoor Thermal Comfort, Indoor Daylight and Green View Index [J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 119: 106045.
- [31] 李江波, 翟志宏, 李海燕, 等. 广州地区典型绿化乔木降温增湿效应研究 [J]. 气候与环境研究, 2024, 29 (1): 13-24.
- [32] 邵奕铭, 高光耀, 刘见波, 等. 自然降雨下黄土丘陵区草灌植物垂直覆盖结构的减流减沙效应 [J]. 生态学报, 2022, 42 (1): 322-331.
- [33] 危艳梅, 翟俊文, 米思乐, 等. 城市公园植物景观配置的声景效应研究 [J]. 声学技术, 2022, 41 (4): 577-585.
- [34] 汪熙, 汪幼江. 园林夜景照明植物视觉适宜度研究 [J]. 光源与照明, 2024 (4): 7-10, 137.

作者简介:

茆桐凤/2001 年生/女/安徽合肥人/海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为风景园林历史理论与规划设计

熊以琳/1998 年生/女/四川成都人/海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为园林植物资源与利用

苏心雨/2001 年生/女/江西萍乡人/海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为园林植物资源与利用

唐林洁/2001 年生/女/四川威远人/海南大学热带农林学院(海口 570228)/在读硕士研究生/专业方向为园林植物资源与利用

史佑海(*通信作者)/1976 年生/男/重庆荣昌人/硕士/海南大学热带农林学院, 海南大学海南省热带特色花木资源生物学重点实验室(海口 570228)/副教授/研究方向为园林植物资源与利用/E-mail: shiyouhai@163.com