

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

Evaluation of the Ecological Suitability of Urban Aggregated Green Infrastructure Plant Landscapes to Mitigate the Urban Heat Island Effect

肖湘东 孙玮泽* 王利芬 谭立 钟誉嘉
XIAO Xiangdong SUN Weize* WANG Lifan TAN Li ZHONG Yujia

(苏州大学金螳螂建筑学院, 苏州 215127)
(Gold Mantis School of Architecture, Soochow University, Suzhou, Jiangsu, China, 215127)

文章编号: 1000-0283(2024)08-0039-08
DOI: 10. 12193 / j. laing. 2024. 08. 0039. 005
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-05-22
修回日期: 2024-06-24

摘要

城市聚合型绿色基础设施中的植物群落景观可以通过植物的降温和增湿作用, 显著缓解热岛效应。然而, 现有研究多聚焦于公园绿地的结构特征分析, 而对热岛效应相关的公园绿地景观评价研究则相对不足。以苏州市白塘生态植物园为例, 选取 22 个群落样方, 以物种多样性、体感舒适度和空气颗粒物为准则层, 物种个体数、物种丰富度、生态优势指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数、综合舒适度指数和 $PM_{2.5}$ 数值等为指标层, 结合层次分析法 (AHP) 和主成分分析法 (PCA), 以确定影响景观适宜性的关键指标及其权重, 构建热岛效应导向下的景观适宜性评价体系, 深入探究植物群落景观在缓解热岛效应中的作用。结果显示, Shannon-Wiener 多样性指数权重贡献率最大, 达 22.48%; 白塘植物园中 55% 的植物景观单元具有较高的适宜性, 乔木种类多样性和乔灌比对景观适宜性具有显著影响, 其中, 当乔木种类超过 5 种且乔灌比接近 6 : 5 时, 景观单元具有较高的适宜性。根据研究结果, 从地域性、多样性、层次性三个方面提出优化策略, 旨在为城市热岛条件下的植物景观规划提供参考。

关键词

景观适宜性评价; 热岛效应; 聚合型绿色基础设施; 植物配置; 层次分析法; 评价体系

Abstract

In urban integrated green infrastructure, plant community landscapes can significantly mitigate the heat island effect through plants' cooling and humidifying effects. However, existing studies mainly focus on the structural characteristics of park green spaces, with relatively insufficient research on evaluating park green landscapes about the heat island effect. Using the Baitang Ecological Botanical Garden in Suzhou as an example, this study selected 22 community sample plots. Criteria layers included species diversity, thermal comfort, and air particulates. In contrast, indicator layers comprised the number of species individuals, species richness, ecological dominance index, Shannon-Wiener diversity index, Pielou evenness index, comprehensive comfort index, and $PM_{2.5}$ values. By combining the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Principal Component Analysis (PCA), key indicators and their weights affecting landscape suitability were determined, and a landscape suitability evaluation system oriented towards the heat island effect was constructed to explore the role of plant community landscapes in mitigating the heat island effect. The evaluation results showed that the Shannon-Wiener diversity index had the highest weight contribution rate at 22.48%. In the Baitang Botanical Garden, 55% of the plant landscape units had high suitability, with tree species diversity and the ratio of trees to shrubs significantly impacting landscape suitability. Specifically, when the number of tree species exceeded five, and the tree-to-shrub ratio was close to 6 : 5, the landscape units had high suitability. Based on the research results, optimization strategies from three aspects, regionality, diversity, and hierarchy, were proposed to provide references for plant landscape planning under urban heat island conditions.

Keywords

landscape suitability evaluation; heat island effect; aggregated green infrastructure; plant configuration; analytic hierarchy process; valuation system

肖湘东

1976 年生 / 男 / 湖南常德人 / 博士 / 教授、博士生导师 / 研究方向为风景园林规划设计, 植物景观规划设计

孙玮泽

2001 年生 / 女 / 黑龙江佳木斯人 / 在读硕士研究生 / 研究方向为风景园林规划设计

王利芬

1976 年生 / 女 / 四川资阳人 / 博士 / 副教授、硕士生导师 / 研究方向为园林植物生态与修复, 园林植物应用

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 18845441816@163.com

基金项目:

国家自然科学基金项目“基于局部气候区尺度下的植物景观响应热岛效应机制和优化设计研究——以长三角城市为例”(编号: 52178046); 国家自然科学基金青年科学基金项目“高密度城区非正式线性健身网络识别、评价与优化研究”(编号: 52208069)

城市聚合型绿色基础设施 (Urban Aggregated Green Infrastructure, UAGI) 是一种综合性的城市生态空间网络, 具有多样的生态系统服务功能, 如提供雨洪管理、气候调节和空气净化等。城市中的大型公园作为UAGI中的核心组成部分, 可通过其中植物的降温 and 增湿作用, 有效缓解热岛效应^[1-2]。在过去人口激增的几十年间, 快速的城市化发展造成了较为明显的城市热岛 (UHI) 效应^[3-4]。为改善城市中的热岛效应并引导城市健康的建设与发展, 科学规划和合理布局的绿色基础设施是重要且有效的途径。

自20世纪70年代以来, 国外研究已证实了植物在缓解城市热岛方面的潜力^[5]。近年来, 国内外学者对植物群落的这一功能进行了更多的研究。国内学者贾刘强等^[6]深入总结了热岛缓解措施和成因, 强调绿地是控制城市热岛效应的关键因素。秦仲^[7]、郭伟等^[8]通过研究公园绿地的季节性温湿效应, 发现绿地面积与降温增湿能力正相关, 乔木覆盖率在其中起着至关重要的作用。乔灌木结构的群落比单一类型的群落具有更好的降温效果^[9-10]。夏繁茂^[11]指出, 植物高度与其降温效果呈负相关, 即较高的植物可能降温效果较弱。不同规模和类型的绿地, 以及它们的水平或垂直结构, 都会影响其降温效果^[12]。因此, 研究城市聚合型绿色基础设施中植物群落的生态配置, 对于提高其缓解热岛效应的能力至关重要。

相较于国外, 国内对适宜性相关的研究起步较晚。直至1986年, 景贵和^[13]首次将生态适宜性概念引入国内, 填补了这一领域的研究空白。景观适宜性评价是一个生态规划过程, 其涉及分析景观类型与其环境和功能之间的关系, 并据此评估景观在生态层面对环境的适宜性^[14]。近年来, 学者们提出了多种

方法用于生态适宜性分析, 其中包括模糊数学综合分析法、生态综合分析法、多因子权重法、地图重叠法和“潜力—限制”评价法等^[15]。这些方法通常结合了GIS进行分析, 以提高多变量决策分析的科学有效性。同时学者对城市公园、广场、绿道、居住区、工业遗产等方面的景观设计进行了深入研究, 分别构建了各自完整的景观适宜性评价体系^[16-19]。然而, 目前从生态设计尺度对公园植物群落的相关适宜性研究案例仍较少, 尚未形成完整且系统的评价系统。因此, 本文以探讨热岛与植物群落的关系为切入点, 将各类影响因素综合考虑, 从而评价聚合型绿色基础设施植物群落景观适宜性, 具有一定的创新性。

苏州作为经济发展迅速的城市, 面对环境危机的处理能力也成了考核其发展水平的重要标准, 经济的迅速发展意味着无可避免要面临城市热岛带来的影响, 作为园林城市, 需要建立成熟的绿地体系, 通过制定合理且可持续的环境措施来缓解热岛效应带来的影响, 让经济发展和绿地保护体系成为相互推动的因素。

本文对苏州市白塘植物园植物景观进行调查与分析, 选择公园内22个不同植物群落样地进行比较研究, 结合层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 和主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA), 构建热岛效应导向下的景观适宜性评价体系, 探讨聚合型绿色基础设施植物景观的配置原则对城市热岛的影响作用。研究结果旨在丰富城市热岛条件下植物景观规划设计理论, 并为公园植物景观的建设和改进提供有益建议, 有助于改善城市热环境, 打造健康城市。

1 研究区概况

白塘生态植物园是苏州工业园区内集娱

乐、文化休闲功能于一体的场所, 地处现代大道中段的北侧, 总面积约60.5 hm², 其中陆地约占47.3 hm², 绿地面积约为总体面积的62%, 水体面积约为总体面积的1/4^[20]。植物园内绿地面积较大, 植被类型丰富, 是典型的城市聚合型绿色基础设施, 因此本文以白塘植物园为例, 对相关植物群落的生态性进行研究。

根据 Landsat 8 的卫星遥感数据, 依次选取2013年、2016年、2020年作为研究年份, 用ENVI反演热岛图 (图1), 结果表明, 这三年工业园区土地利用发生了变更, 且均处于热岛等级较高的范围内^[21]。

2 研究方法

2.1 样地与评价指标的选择

在样地选取之前对白塘植物园周边用地性质、建筑密度、水体分布、植被覆盖率等因素进行了全面的调研, 这些因素直接影响了植物园的热岛效应表现。

研究选取场地范围内的植物景观群落单元作为研究对象, 结合植物群落样地设置的原理, 充分考虑白塘植物园独特的地貌特征, 最终决定采用典型样地法进行深入研究^[22], 在对场地实地调研的基础上, 以植物园的面积及植物配置的形式为依据, 通过实地监测对白塘植物园的现有植物群落进行测定, 分析其现有群落结构。从调研的群落中随机选取能反映该公园植物构成和景观特征的代表性植物景观群落, 每类群落选择的样方大小为20 m×20 m, 共计22个样地, 依次编号 (图2)。

根据调研得出植物景观特征, 结合前人在植物景观评价方面的研究成果^[23-25], 同时考虑热岛效应的影响, 从与景观生态适宜性的各影响因子中筛选出合适尺度的指标。在

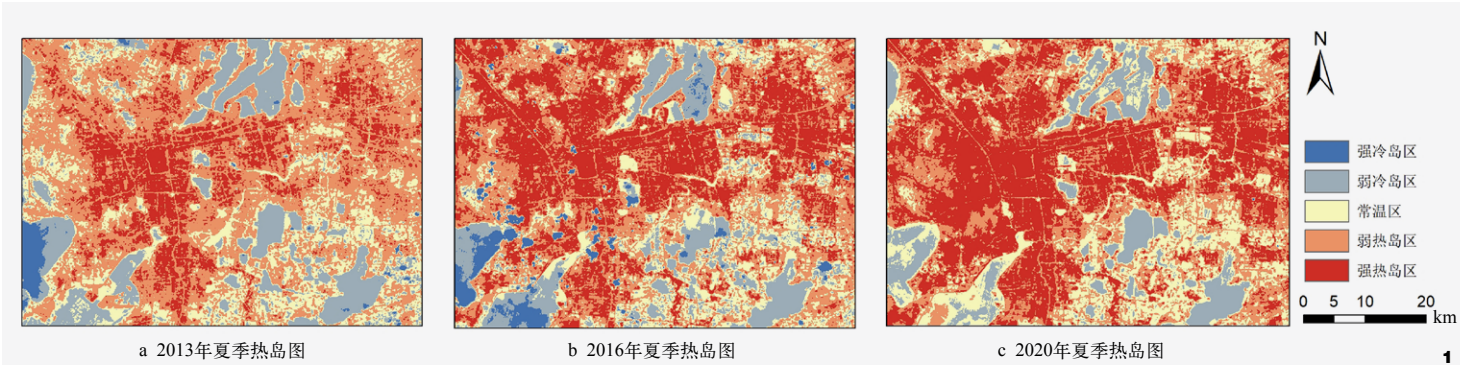


图1 苏州工业园区热岛变化图
Fig. 1 Heat island change map of Suzhou Industrial Park

指标的选取中，不仅考虑到环境因子的影响，也将人体舒适度感受纳入考量，以保证准确且客观地评价公园植物群落，建立一个合适的景观适宜性指标体系。最终，基于定量分析与定性分析相结合的主要原则，确定了本研究的公园植物景观适宜性评价体系（表1）。

根据景观生态适宜性的要求，构建了一个包含3个准则层（物种多样性、体感舒适

度、空气颗粒物）和7个指标层的评价体系。在指标层中，利用Simpson生态优势指数体现植物群落物种集中程度、Shannon-Wiener多样性指数体现植物群落物种多样程度、Pielou均匀度指数衡量物种在一个指定区域或生态系统中的相对均匀分布程度。这些准则层和指标层综合考虑了环境因子和人体舒适度感受。所选7个指标均为定量指标，便于通过数据的收集和分析来进行客观评价。

表1 植物景观生态适宜性评价体系
Tab. 1 Plant landscape ecological suitability evaluation system

目标层 (A) Objective layer	准则层 (B) Criteria layer	指标层 (C) Indicator layer	评分标准 (D) Scoring criteria	指标性质 (E) Indicator nature
公园植物景观适宜性评价体系 A	物种多样性 B1	物种个体数 C1	E= 物种个数	定量
		物种丰富度 C2	$S_1 = \text{样地内物种的数量}$	定量
		生态优势指数 C3	$D = \sum_{i=1}^{S_1} \left(\frac{N_i}{N} \right)^2$	定量
		Shannon-Wiener 多样性指数 C4	$H = - \sum_{i=1}^{S_1} P_i \ln P_i$	定量
		Pielou 均匀度指数 C5	$J = \frac{H}{\ln S_1}$	定量
	体感舒适度 B2	综合舒适度指数 C6	$S_2 = 0.6 \times T - 24 + 0.07 \times H_R - 70 + 0.5 \times V - 2 $	定量
	空气颗粒物 B3	PM _{2.5} 数值 C7	测量值	定量

注：公式中， S_1 代表样地内的物种数量； N_i 代表样地内第*i*个物种的个体数量； N 代表样地群落中各层次中所有物种的个体总数； $P_i = N_i/N$ ，描述一个个体属于第*i*类物种的概率； S_2 代表综合舒适度指数； T 代表温度（℃）； H_R 代表相对湿度（%）； V 代表距地面2.0m高处风速（ $m \cdot s^{-1}$ ）。

2.2 构建生态适宜度评价体系

本研究采用层次分析和主成分分析方法，结合多个评价指标，对公园植物景观的生态适宜性进行综合评估。首先，通过层次分析法构建适宜性指标体系，并结合专家打分计算各指标权重。然后，利用主成分分析法对调研数据进行降维分析，得出各指标权重。为了克服单一方法的局限性，将主成分分析法和层次分析法得到的权重进行整合修正，以综合考虑客观分析和主观判断，得出一个全面的评价指标综合权重。这样的综合评估方法能够更准确地评估公园植物景观的生态适宜性。

2.2.1 层次分析法

层次分析法通过构建判断矩阵并计算方根向量来确定各准则层和指标层的相对重要性^[26]。为减少主观性，邀请了30位风景园林专家学者参与打分，以确保评价体系的客观性和可靠性。通过这些专家的评估和数据处理，得到各评价指标的权重。具体步骤如下：

（1）构造判断矩阵。根据判断矩阵的比例标度及含义，使用“1-9比例标度法”构造判断矩阵，根据表1评价体系的层次结构关

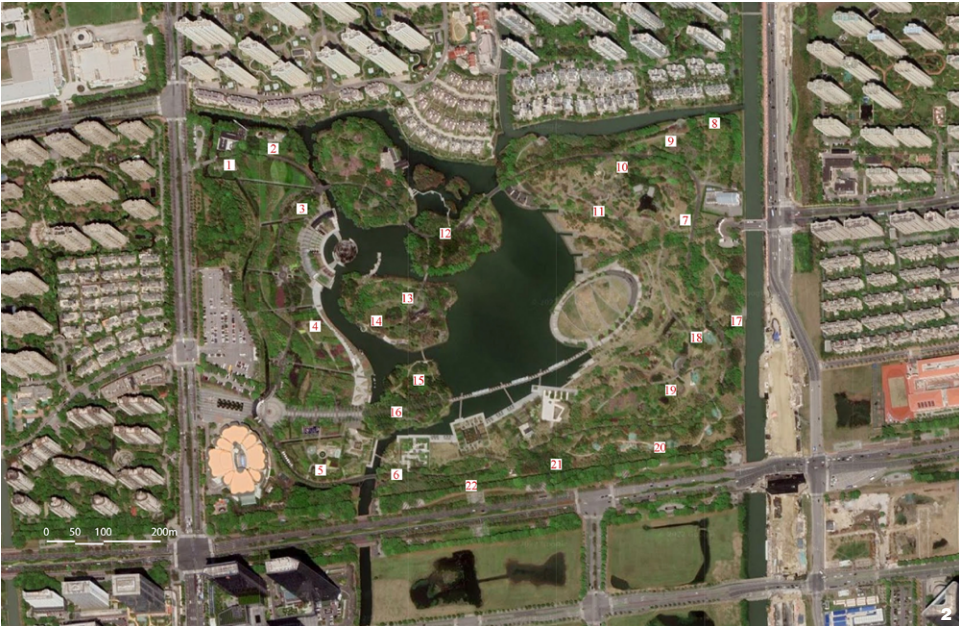


图2 白塘植物园样地选取
Fig. 2 Sample plot selection at White Pond Arboretum

系构造A-B, B1- (C1-C5), B2- (C6), B3- (C7) 判断矩阵^[27]。邀请专家并查询文献对各个判断矩阵进行打分, 进行数据处理(表2)。

(2) 指标权重的计算及一致性检验。计算方根向量 A_i , 见公式(1)^[28]。根据矩阵A列出各因子之间相对重要性的标定值, 并将其开 n 次方, 并计算矩阵的每一行元素的乘积。式中, n 为评价因子数目, C_{ik} 为第 i 个因子与第 k 个因子相对重要性标度值($i=1, 2, \dots, n$; $k=1, 2, \dots, n$)。

表2 判断矩阵的比例标度及含义
Tab. 2 Scale of the judgment matrix and its meaning

标度 Scale	定义 Definition
1	同等重要
3	稍微重要
5	明显重要
7	重要的多
9	极端重要

注: 2, 4, 6, 8表示以上相邻判断的中间值。

$$A_i = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n C_{ik}} \quad (i, k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

计算各评价因子的权重值 ω_i , 见公式(2)。

$$\omega_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

计算各指标的总排序权重值 F_i , 见公式(3)。

$$F_i = C_{ik} \omega_i \quad (3)$$

计算判断矩阵A最大特征根 λ_{max} , 见公式(4)。

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n \omega_i} \sum_{k=1}^n C_{ik} \omega_k \quad (4)$$

为确保结论合理, 对各判断矩阵进行一致性检验, 只有通过一致性检验, 计算的权重才是可靠的, 见公式(5)和公式

(6)。式中, RI 为平均随机一致性指标(表3), 若 $CR \leq 0.100$ 时, 则该判断矩阵具有满意一致性, 否则需要重新调整矩阵。当单层一致性检验合格后再进行层次总排序及一致性检验^[29]。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (6)$$

(3) 结合30位专家打分的结果最终得出每项评价因子的权重, 见表4。

2.2.2 主成分分析

主成分分析法是一种数据降维技术, 由Pearson于1901年提出。该方法通过转换原始指标为几个关键综合因子, 有效地保留了数据的核心信息。研究使用SPSS软件对指标进行归一化处理, 并据此计算景观适宜度得分及其因子权重。具体步骤如下:

(1) 假设有 n 个样本, p 个指标, 则可构成样本矩阵 X , 输入该矩阵, 由于矩阵中数据的单位不同, 所以首先对矩阵 X 进行标准化处理。

(2) 求相关系数矩阵^[30], 见公式(7)。式中, r_{ij} 表示 i 指标和 j 指标之间的相关系数, 数据经过标准化处理后再通过计算这些相关系数, 可以得到一个相关系数矩阵 R 。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^n (x_{kj} - \bar{x}_j)^2}} \quad (7)$$

(3) 计算相关系数矩阵 R 的特征值($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$)和特征向量 e_{ij} , 并确定每个特征值对应的方差贡献率和累积贡献率。根据累

表3 平均随机一致性指标 RI 的取值
Tab. 3 Values of the average random consistency indicator RI

阶数 Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.96	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

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

目标层 (A)	权重 /%	准则层 (B)	权重 /%	指标层 (C)	权重 /%
Objective layer	Weight	Criteria layer	Weight	Indicator layer	Weight
公园植物景观 景观适宜性评 价体系 A	100	物种多样性 B1	59.73	物种个体数 C1	5.09
				物种丰富度 C2	19.38
				生态优势指数 C3	7.78
				Shannon-Wiener 多样性指数 C4	24.35
				Pielou 均匀度指数 C5	3.13
		体感舒适度 B2	12.03	综合舒适度指数 C6	12.03
		空气颗粒物 B3	28.24	PM _{2.5} 数值 C7	28.24

表5 不同方法及修正权重
Tab. 5 Different methods and correction weights

指标 Indicators	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
层次分析权重 /%	5.09	19.38	7.78	24.35	3.13	12.03	28.24
主成分分析权重 /%	11.41	17.93	16.33	20.60	16.18	4.82	12.73
修正后权重 /%	8.25	18.65	12.06	22.48	9.66	8.42	20.48

积方差贡献率超过75%的前 k 个主成分, 对原始数据进行降维处理。计算方差贡献率, 见公式 (8); 累积贡献率, 见公式 (9):

$$\text{贡献率} = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i = 1, 2, \dots, p) \quad (8)$$

$$\text{累积贡献率} = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} (i = 1, 2, \dots, p) \quad (9)$$

通常情况下, 选择特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 所对应的累积贡献率达到 85% ~ 95% 的前 m 个主成分作为数据降维的方案。其中, m 不超过原始数据的指标数量 p 。

计算主成分载荷 l_{ij} , 反映原始变量对主成分的贡献程度, 公式 (10)。式中, Z_i 表示主成分, X_j 表示原始变量, 那么载荷 l_{ij} 表示原始变量 X_j 在第 i 个主成分 Z_i 上的权重, λ_i 是第 i 个特征值, e_{ij} 是特征向量。

$$l_{ij} = \rho(Z_i, X_j) = \sqrt{\lambda_i} e_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, p) \quad (10)$$

得到各主成分的载荷以后, 进一步计算, 得到各主成分的得分 Z , 见公式 (11)。

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nm} \end{bmatrix} \quad (11)$$

计算综合得分系数 W_i , 见公式 (12)。式中, a_{ij} 表示第 i 个指标在第 j 个主成分上的权重, 代表了它们之间的线性组合关系; θ_j 表示第 j 个主成分的方差贡献率, 反映了该主成分对总方差的贡献程度。

$$W_i = \frac{a_{ij} \times \theta_j}{\sum_{j=1}^n \theta_j} \quad (12)$$

通过对综合得分系数进行归一化处理, 可以获得各子指标的权重值, 以确保这些权重值处于统一的范围内, 从而方便进行比较和综合评估, 见公式 (13)。式中, w_j 为第 j 个指标的权重。

$$W_j = \frac{P_i}{\sum_i P_j} = (W_1, W_2, \dots, W_n) \quad (13)$$

2.2.3 指标权重的修正

首先, 通过将每组矩阵中的三级指标权

重与其上一层权重相乘, 计算得出三级指标的层次分析法的最终权重。这个权重反映了指标在整体评价中的相对重要性。然后, 将这些权重与主成分分析法得出的权重进行比较。由于这两种方法在指标权重分布上的侧重点不同, 因此需要对它们进行平均处理, 并进行归一化, 以确保统一性和比较的合理性。最终, 得到了经过调整和修正的指标权重, 这些权重更准确地反映了各指标的相对重要性。这样的权重评价方法有助于在决策和评估中更好地理解 and 应用指标权重, 从而提高决策的质量和可靠性。具体结果如表5所示。

2.3 景观适宜度综合评价

结合层次分析法和主成分分析法, 得出景观生态适宜度综合评价得分, 及植物群落的适宜度。

公园植物景观综合评价指数 F , 由景观综合评价指数法得公式 (14):

$$F = \sum_{i=1}^n B_i C_i \quad (14)$$

式中, B_i 为某评价因子的权重, C_i 为指标因子的评分, 计算时需将所有定量指标的数值乘以10, 以确保定量指标与定性指标的量纲一致。

计算公园植物景观质量综合分值 S_3 , 见公式 (15):

$$S_3 = \sum_{i=1}^n F_i W_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中, F_i 代表第 i 个指标因子的综合评价指数, W_i 为综合得分系数。

3 植物景观适宜度分析

3.1 评价指标权重分析

由于层次分析法和主成分分析两种方法权重的计算方法不同, 得出的结果也有

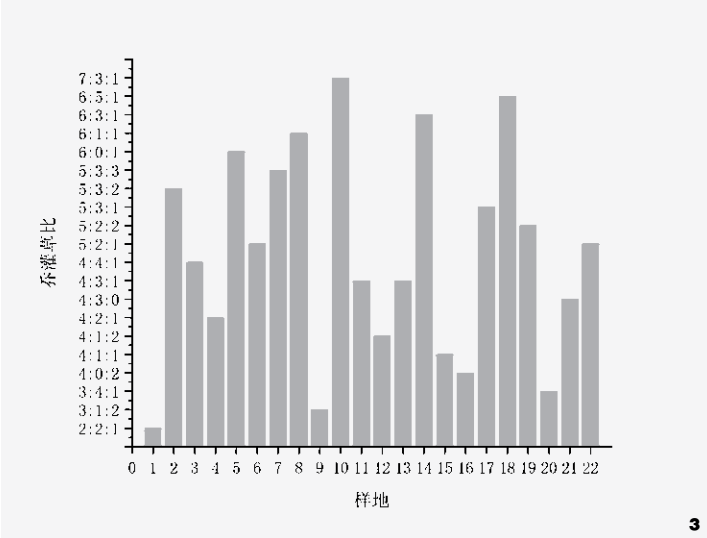


图3 白塘植物园各样乔灌木比值
Fig. 3 Sample tree-shrub-grass ratios in White Pond Arboretum

所区别。AHP能合理地比较出评价体系的构建模型各部分之间的关系，将定性与定量相结合，但其中通过专家打分进行两两对比得出的指标需要被反复比较，最终权重仍具有一定的主观性。运用AHP获得的指标权重在物种丰富度（C2）、Shannon-Wiener多样性指数（C4）、PM_{2.5}数值（C7）三个指标上比重较大，其中占比最高的是C7，达到28.24%，占比最小的是C5，只有3.13%。因为层次分析偏向于主观性，最终的结果也会存在向初始偏好倾斜的趋势。

PCA是一种统计技术，用于降维处理，同时保持数据中最重要的特征。通过SPSS将7个指标进行转换为3个综合性指标，贡献率为81.8%，能代表绝大多数的指标影响，实现较少的信息丢失，保证了评价结果的客观性^[31]。而PCA计算的权重结果则较为平均，占主要权重的是物种丰富度（C2）、生态优势度指数（C3）、Shannon-Wiener多样性指数（C4），分别是17.93%、16.33%、20.60%。其中，C4是主成分分析中权

重最大的指标。主成分更多地依靠调研数据，因此如果某一项的数据出现较大误差可能会影响最终的结果^[32-33]。

将两种方法计算的权重进行修正之后，C4贡献率最大，说明在相关的指标下，生态多样性是相对重要的因素，对景观适宜度的相关性更高。

3.2 景观适宜性评价分析

为确保评价体系的客观性，结合30位专家的评估打分，使用由3个准则层和7个指标构建的综合评价模型，通过修正权重和计算，最终得出22个景观群落的生态适宜度得分及排名（表6）。如果得分为正，表明该样地符合生态适宜度的评价标准，如果得分为负，则说明该样地不符合该景观评价的标准。而得分越高则说明生态适宜性越好，依据得分及排名最终得出各样地之间的得分对样地的植物群落类型进行分析。

从生态适宜度得分可以看出，白塘植物园共22个样地，符合生态适宜性的样地共12个，占总群落的55%，其植物配置大部分由乔木、灌木和草本组成。

在白塘植物园选取的样地中，生态适宜性最佳的样地依次是样地18、样地10和样地6，得分分别为0.92、0.69和0.50。而生态适宜性最差的三个样地则是样地1、样地21和样地13，得分分别为-0.74、-0.29和-0.25。从中发现，公园大部分样地都符合适宜度，不符合适宜度的也只是略低于标准线，少有适宜度很差的样地，说明此公园整体适宜度水平较高。适宜性的评价结果与植物群落的构成有一定的关系，样地18和样地10都是植物物种较多、层次较为丰富的类型，而样地1则是树种单一，林相、林分结构简单的类型。

3.3 景观群落结构分析

白塘植物园以水为底，生态环境优美，共有植物500多种，植物

表6 各样地植物景观适宜度评价得分
Tab. 6 Plant landscape suitability evaluation scores for each sample site

样地 Sample plot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
得分 Scores	-0.74	0.04	0.04	0.15	-0.08	0.50	0.39	-0.08	-0.14	0.69	0.49
样地 Sample plot	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
得分 Scores	-0.14	-0.25	0.18	0.40	-0.10	0.21	0.92	-0.16	0.00	-0.29	0.04

配置较为丰富，主要引用乔木约24科47种，灌木及小乔35科40种^[34]。

根据现场调研和综合适宜度评价的结果，结合景观单元的群落结构进行分析，总结不同等级的景观特征。22个样地内的植物基本涵盖了植物园大部分植物种类，共89种。归纳分析各样地植物配置，将乔灌木比进行统计(图3)。通过比较得出适宜性较好的植物群落，在乔灌木都存在的基础上，乔木与灌木较为接近，且种类丰富。生态适宜度较好的样地是10和18，其乔灌木比值分别为7:3:1和6:5:1，植物配置基本上乔木种类较多，形成较为明显的乔灌木的群落结构特征。在以乔灌木为标准的对比下，发现植物群落是乔木在4种以上，且乔灌木越接近，适宜性的效果越好，其中，乔木的影响可能更为明显。此外同样存在少数乔灌木比值尚可，但是适宜度较低的群落，说明植物群落配置与适宜度存在相关性，但并不是决定性因素。

对比分析有助于揭示不同群落间在生态和景观表现上的差异，选择景观适宜性综合得分较高的3个群落与得分较低的3个群落的评价指标数据进行对比，深入分析每个样地植物的重要值，可以得出其优势物种，发现生态优势指数的指标上有明显区别，适宜度较好的植物群落都是以乔木为优势物种，同时在Shannon多样性上存在明显差异，这与权重重要性相符。说明多样性和优势度指数较高的植物群落在热岛下是更加适宜的。

4 公园植物景观营建策略

4.1 基于地域性构建植物群落

在22个样地中，共记录到89种植物，其中27种为本地乡土植物，占乔灌木总数的30%。这些植物大多非常适合在苏州地区生长，表现出良好的适应性。因此，在植物群

落构建中，应以气候适应性强的树种为主导，优先选择适应该地气候和土壤条件的乡土植物。这不仅能够强化植物园的地域特色和生态适应性，还能促进生物多样性的自然发展，维护生态系统的平衡。

4.2 基于多样性构建植物群落

植物物种多样性与生态群落的生态稳定性密切相关，这一关系在生态学领域已被广泛认可^[35]。在深入探究得分较高与较低的公园样地时，发现这些样地的植物群落特征具有共同之处，以物种个体数、物种丰富度、优势度指数、Shannon-Wiener多样性指数和均匀度指数为代表的植物多样性指标对最终景观适宜性的得分具有相关性。调研发现，在所考察的群落中，乔木种类的多样性对景观适宜度有着显著的影响。因此，在群落构建中，不仅要充分保证乔木种类的丰富度，还要综合考虑不同植物之间的生态位和适宜性，以及其与环境的相互作用。此外，乔木可形成自然屏障，减少热岛效应，创造凉爽的休闲空间，提高人体舒适度。

4.3 基于层次性构建植物群落

丰富的层次结构不仅可以增加植物群落的复杂性，也提高了植物群落的景观适宜性。在配置植物群落景观时，首先应建立在乔木、灌木和草本植物共存的基础上，形成明显的分层种植群落特征。研究表明，群落的景观适宜性随着乔木与灌木比例的接近而提高。因此，在植物景观构建中，应优化乔灌木以及常绿落叶植物的配置比例，实现植物群落层次结构方面的协调。同时，选择适应季节变化的植物，确保全年都能提供适宜的微气候条件，进而提高体感舒适度。此外，不同高度的植物可以捕获不同粒径的颗

粒物，通过乔木、灌木和草本植物的多层次布局，可以形成复杂的微环境，有助于提高空气净化效率。

5 结论

本研究在苏州市公园植物景观研究领域迈出了创新的一步，为城市新建公园的植物配置提供了一套量化的评价指标。通过主成分分析法和层次分析法的结合，特别考虑了热岛效应，对白糖生态植物园的植物景观单元进行了客观、科学的适宜性评价。结果表明：(1) 所有指标中，Shannon-Wiener多样性指数(C4)权重贡献率最大，达22.48%；(2) 在白糖植物园22个样地中记录到89种植物，其中30%为本地乡土植物，这不仅展示了苏州地区植物的高适应性，也体现了生物的多样性；(3) 55%的样地植物景观单元达到了适宜性标准，适宜度高的群落显著提升了生物多样性和生态优势度；(4) 乔木种类丰富和乔灌木约6:5的景观单元适宜性较高，而乔木种类较少或植物群落单一的样地适宜性较差。本研究结果有助于丰富公园植物景观规划设计及营建理论，为城市聚合型绿色基础设施植物景观的规划设计提供了科学依据。由于植物景观样地数量有限及调查条件的局限性，目前的研究尚无法全面揭示公园植物景观的特征，需要后续研究不断跟进和总结深化。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 赵晨晓, 刘春丹, 魏家星. 缓解城市热岛效应的南京市绿色基础设施网络构建方法[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(06): 1127-1135.
- [2] WEI J X, LI H B, WANG Y C, et al. The Cooling and Humidifying Effects and the Thresholds of

- Plant Community Structure Parameters in Urban Aggregated Green Infrastructure[J]. Forests, 2021, 12: 111.
- [3] 徐洪, 杨世莉. 城市热岛效应与生态系统的关系及减缓措施[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(06): 790-798.
- [4] 崔凤娇, 邵锋, 齐锋, 等. 植被对城市热岛效应影响的研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(01): 171-181.
- [5] 杨振山, 张慧, 丁悦, 等. 城市绿色空间研究内容与展望[J]. 地理科学进展, 2015, 34(01): 18-29.
- [6] 贾刘强. 城市绿地缓解热岛的空间特征研究[D]. 西安: 西南交通大学, 2011.
- [7] 秦仲. 北京奥林匹克森林公园绿地夏季温湿效应及其影响机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [8] 郭伟, 申屠雅瑾, 赵丽丽, 等. 秋季北方城市植物群落对温湿度的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(04): 1422-1426.
- [9] 陈朱, 陈方敏, 朱飞鸽, 等. 面积与植物群落结构对城市公园气温的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2590-2596.
- [10] 赵志刚, 韩成云, 王舸泓, 等. 南方城市12种常见绿地植物春秋生态效益分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 209-212.
- [11] 夏繁茂, 季孔庶, 杨宜东. 植物不同配置模式对绿地小气候温湿度的影响[J]. 林业科技开发, 2013, 27(05): 75-78.
- [12] 韩宝龙, 束承继, 蔡文博, 等. 植被群落特征对城市生态系统服务的影响研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(24): 9978-9989.
- [13] 景贵和. 土地生态评价与土地生态设计[J]. 地理学报, 1986(01): 1-7.
- [14] 盛丽. 生态园林与景观艺术设计创新[M]. 南京: 江苏凤凰美术出版社, 2019.
- [15] 宗跃光, 王蓉, 汪成刚, 等. 城市建设用地生态适宜性评价的潜力—限制性分析——以大连城市化区为例[J]. 地理研究, 2007(06): 1117-1126.
- [16] 赵洁, 白尚斌, 冯磊, 等. 城市广场景观适宜性评价体系研究——以新乡市新建城市广场为例[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(05): 255-258.
- [17] 王博娅, 刘志成. 基于景观适宜性评价的北京市三山五园地区绿道体系规划[J]. 建筑与文化, 2016(06): 100-101.
- [18] 苗振龙. 居住区园林景观适宜性评价——以池州市为例[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(22): 173-176.
- [19] 史亦轩. 工业遗产景观适宜性评价体系构建与设计研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [20] 谢兰曼. 浅析苏州白塘生态植物园的植物配置[J]. 现代园艺, 2020, 43(19): 164-166.
- [21] 马松超. 城市热岛时空变化特征及演变规律研究——以扬子江城市群为例[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(05): 93-97.
- [22] 黄顺. “城市双修”背景下植物配置调查与生态优化策略——以丹阳万善公园为例[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(11): 127-130.
- [23] 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(04): 717-724.
- [24] 翁殊斐, 柯峰, 黎彩敏. 用AHP法和SBE法研究广州公园植物景观单元[J]. 中国园林, 2009, 25(04): 78-81.
- [25] 唐东芹, 杨学军, 许东新. 园林植物景观评价方法及其应用[J]. 浙江林学院学报, 2001(04): 64-67.
- [26] 康秀琴. 基于AHP法的桂林市8个公园绿地植物景观评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(06): 273-278.
- [27] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004(09): 51-60.
- [28] 刘瑞雪, 彭媛媛. 基于层次分析法的城市滨海绿地植物景观评价[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(04): 288-293.
- [29] 章俊华. 规划设计学中的调查分析法(12)——AHP法[J]. 中国园林, 2003(05): 38-41.
- [30] 宇传华. SPSS与统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [31] 何超, 李萌, 李婷婷, 等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(02): 172-178.
- [32] 王杨, 孟庆香, 宋文博, 等. 基于层次分析法与主成分分析法的郑州市人居环境质量评价研究[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(03): 359-364.
- [33] 杨婷, 王秀荣, 张铃森, 等. 基于景观适宜性的山地公园植物景观评价研究——以贵阳黔灵山公园为例[J]. 中国园林, 2020, 36(04): 117-121.
- [34] 郑小娟, 朱晓芳. 白塘生态植物园绿地调查与景观效果分析[J]. 中国园艺文摘, 2015, 31(02): 117-121.
- [35] 郭雅婷, 李运远. 基于生物多样性的城市绿地植物群落构建途径[J]. 风景园林, 2022, 29(01): 59-63.