基于 TOPSIS 与雷达图法的小微湿地景观美学与碳减排效益评价*

李 罡 董生明 王 昊 戚宇轩 杨智超 杨 懿 聂 玮

安徽建筑大学建筑与规划学院 合肥 230601

摘要：【目的】科学评价小微湿地景观美学与碳减排效益，旨在提升小微湿地综合效益。【方法】选取安徽建筑大学南校区小微湿地野外长期观测试验样地作为研究场地，于夏、秋季逐月拍摄，基于 AHP、熵权的 TOPSIS 和雷达图法，以主观打分为美学主观评价指标，以分形与生理测量数据为美学客观评价指标，以 CO_2和 CH_4排放当量为碳减排指标，评价夏秋季小微湿地景观美学和碳减排综合效益，并验证不同方法的一致性。【结果】1）AHP 和熵权指标权重排序均为碳减排效益>主观评价>客观生理。2）AHP 和熵权两种权重结果下的 TOPSIS 均表明夏季美学效益高于冬季（AHP，夏季 0.35>冬季 0.33；熵权，夏季 0.32>冬季 0.28），但碳减排效益低于冬季（AHP，夏季 0.15<冬季 0.16；熵权，夏季 0.23<冬季 0.24）。3）TOPSIS 两种权重与雷达图法均表明小微湿地夏季综合效益高于冬季。【结论】TOPSIS 与雷达图法结果一致，可用于小微湿地综合效益评价。冬季种植常绿植物可提高景观美学价值，夏季选取高固碳植物可提高碳减排效益。夏季的碳减排效益和冬季的美学效益是未来研究设计优化的方向。

关键词：AHP；熵权；小微湿地景观；碳减排效益

DOI：10.12169/zgcsly.2024.12.16.0003

Assessment of Micro-Wetland Landscape Aesthetics and Carbon Emission Reduction Based on TOPSIS and Radar Chart Methods

Li Gang Dong Shengming Wang Hao Qi Yuxuan Yang Zhichao Yang Yi Nie Wei

(School of Architecture and Urban Planning, AnhuiJianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract：【Objective】This study is to make a scientific assessment of landscape aesthetics and emission reduction benefits of micro-wetlands so as to optimize their comprehensive benefits.【Method】The field-based long-term monitoring experimental plot of micro-wetlands in the South Campus of Anhui Jianzhu University is selected to take pictures each month in summer and autumn. Both Analytic Hierarchy Process (AHP), entropy-weighted TOPSIS methods and radar chart analysis are adopted to assess the comprehensive benefits of landscape aesthetic and emission reduction benefits of micro-wetlands in summer and autumn based on the indexes consisting of the subjective aesthetic evaluation indicators based on questionnaire scores, objective aesthetic evaluation indicators derived from fractal analysis and physiological measurements, and emission reduction benefit indicators represented by CO_2 and CH_4 emission equivalents. The consistency and reliability of these methodologies are validated.【Result】1) The weight of indexes of both AHP and entropy weighting are ranked as emission reduction benefits > subjective evaluation >

收稿日期：2024-12-16

*基金项目：国家自然科学基金面上项目（52378001）；安徽省高校人文社科研究项目（SK2021A0345，2023AH050160）；安徽省高校学科拔尖人才学术资助项目（gxyq20211）；安徽省住房城乡建设科学技术计划项目（2020-RK13）；安徽省社科创新发展攻关项目（2022CX117）

第一作者：李罡（1982-），男，博士，讲师，研究方向为湿地保护与管理等。E-mail：ligang27@foxmail.com

通信作者：聂玮（1986-），男，博士，副教授，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：archway@qq.com

objective physiological measurements; 2) Regardless of weighting method, the TOPSIS analysis reveals that the aesthetic benefits of micro-wetlands are higher in summer than in winter (AHP: summer 0.35 > winter 0.33; entropy weighting: summer 0.32 > winter 0.28), while carbon emission reduction benefits are lower in summer than in winter (AHP: summer 0.15 < winter 0.16; entropy weighting: summer 0.23 < winter 0.24); and 3) Both TOPSIS results under different weights and radar chart analysis consistently indicate that the comprehensive benefits of micro-wetlands are higher in summer than in winter.【Conclusion】 The consistent results between TOPSIS and radar chart method demonstrate their applicability in evaluating the comprehensive benefits of micro-wetlands. Winter planting of evergreen species could enhance landscape aesthetics, while selecting the plants with high carbon storage in summer could improve carbon emission reduction benefits. Enhancing carbon emission reduction efficiency in summer and optimizing landscape aesthetics in winter are critical directions for future research and design.

Keywords: AHP; entropy weighting; micro-wetland landscape; emission reduction benefit

随着气候变化和城市化进程加速，人类愈发认识到保护自然环境的重要性。小微湿地面积小、分布广，兼具美学与生态价值[1]，对缓解城市土地资源紧张、区域生态资源与空间短缺等矛盾具有积极作用[2]。2018 年 10 月，《湿地公约》第十三届缔约方大会审议通过我国首次提议的“小微湿地保护与管理”决议后，小微湿地保护正逐步得到国际社会与专家学者的关注[3]。小微湿地是指面积在 8 万 m^2 以下，在自然界长期演变过程中所形成的小型、微型湿地[4]。当前，湿地景观评价已由景观美学转向兼顾生态等综合效益的研究[5]。然而，由于学科壁垒等因素导致风景园林、环境艺术等专业常以湿地景观评价和规划设计见长，而生态学、自然保护区学等专业常以湿地生态、保护修复见长，结合美学和生态效益的湿地研究较少。如何兼顾美学和生态价值，协调湿地不同属性间的平衡，充分实现湿地综合效益等仍有待进一步研究。而在“双碳”背景下，湿地碳汇/源动态的转换和固碳减排日益成为湿地生态的热点，但鲜有结合美学与碳减排的综合效益的评价研究。因此，科学评价小微湿地景观与生态等多重功能，有助于推动小微湿地保护与管理，提升湿地景观美景度，提高湿地生物多样性。

当前，运用跨学科手段进行景观视觉与美学质量评价已成为景观评价的主流趋势[6]。传统景观美学评价常基于文献收集与实地调研[7]，或结合层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）、美景度评价法（Scenic Beauty Estimation，SBE）等问卷方法[8-9]，但结果多受主观因素影响[10]。随着生理测量技术的发展，生理指标可作为评价景观美学质量与美学感知的反应特征[11]。基于景观美学与生理心理学可进行景观审美感知量化评价[12]。主客观结合评价可用于探究景观环境对人情绪的影响[13]，并作为景观评价的重要依据。例如，不同景观环境下反映人情绪变化的皮电、心率等人生理测量指标数值存在显著差异，可据此有针对性地指导景观设计[14]。视觉质量较高的景观环境常由多种要素构成，其立面形态往往错落有致，复杂多变。可运用分形理论计算分形维数数值，量化景观观赏面，其数值变化在一定程度上反映了景观视觉质量[15-16]。此外，碳减排是衡量湿地生态效益的重要方面[17]，已有研究主要集中在基于“双碳”探究低碳景观营造[18]，或通过数据测算绿地碳汇能力[19]等。然而，鲜有结合主客观定性和定量分析、综合景观美学和碳减排综合效益评价的研究，这限制了对国际重要湿地、国家重要湿地以及湿地公园等湿地保护地类型的综合评估和保护水平的提升。此外，单一指标评价体系常难以可行、全面地评价湿地景观[20]。熵权法通过客观赋予评价指标权重的方法，借由信息熵计算各个指标的权重，克服了加权综合评价法对权重的主观影响；而接近理想解排序法（Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution，TOPSIS）是系统工程中有限方案多目标决策分析的一种常用决策技术[21]，可定量评估景观综合效益。有必要综合主流评价方法，发挥各自优势扬长避短开展景观评价，得到更准确和有效的评价结果，以加强湿地景观美学与生态效益的协同研究[22]。

因此，本文综合雷达图与 TOPSIS，采用多种方法互相验证的方式对小微湿地进行综合评价，探究

如何综合评价小微湿地景观美学及其碳排放，尝试通过不同评价方法互相验证，提高结论可信度，以期为小微湿地的景观设计与湿地保护管理提供基础支撑，并为其他景观类型的综合效益评价提供借鉴。

1　研究区概况

基于典型性与可行性原则，选取安徽省合肥市安徽建筑大学南校区小微湿地野外长期观测试验样地作为研究场地（图 1）。场地面积约 150 m^2，常年积水面积约 40 m^2，常年积水深度约 96 cm，属于小微湿地定义中典型的湿地类型（面积<80 000 m^2）。场地内植物有孝顺竹（*Bambusa multiplex*）、木槿（*Hibiscus syriacus*）、海桐（*Pittosporum tobira*）和马尼拉（*Zoysia matrella*）。



注：A 试验样地区位图；B 试验样地观赏面示意图；C 碳减排指标野外实测示意图。

图 1　试验样地示意图

2　研究方法

2.1　数据来源与预处理

2.1.1　数据来源

合肥地处北亚热带湿润季风气候，春秋短夏冬长。因此，本研究选择夏季与冬季逐月拍摄，每个季节筛选出 3 张照片作为重复。

采用分形维数和生理测量对小微湿地景观美学进行客观评价，其中分形维数可量化景观要素轮廓形态的客观特征，常作为景观美学的定量指标[23]。采用计盒维数法计算图片样本中各要素轮廓分形值[15]。皮电（electrodermal activity，EDA）、肌电（electromyogram，EMG）、呼吸（respiration，RESP）和心率（heart rate variability，HRV）常作为景观美学或人体愉悦度的定量评价指标[24]。采用人因生理记录仪（ErgoLAB Biosensor，北京

津发）及配套的人机工效分析系统（ErgoLAB 3.0，ver. 3.16.3.0，北京津发），同步采集被试观看试验素材的生理指标数据[25-26]。生理试验共计招募被试 30 人，多为风景园林和土木工程专业的本科生与硕士研究生（男性 18 人，女性 12 人），年龄分布在 18~40 岁。采用 G-power 计算样本效应，当样本效应量为 0.55，显著性水平 α 为 0.05 时，检验功效为 0.82，表明试验结果可信，符合统计分析要求。通过被试填写主观问卷获取图片样本的主观打分作为主观评价指标[27]，并保证被试人员与生理试验一一对应。CO_2 和 CH_4是两种主要的温室气体，其排放是碳减排评价的重要指标[28]。于 2021 年 12 月、2022 年 1、2、6、7 和 8 月选择晴天，采用 LGR 超便携温室气体测定仪（GLA131-GGA，北京理加）和多通道气体收集系统（SF-3500，北京理加）进行野外测定。

2.1.2 数据预处理

为消除分形、生理和生态中各项指标的量纲影响，使各指标处于同一数量级后再综合对比评价[29]。选取最小最大标准化法进行数据归一化处理[30]。公式如下：

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (1)$$

式（1）中：x'为评价指标归一化数值；x 为评价指标原始数值；min(x) 为评价指标最小值；max(x) 为评价指标最大值。EDA、EMG、RESP 3 个指标数值与人愉悦度呈负相关，即指标数值越高，愉悦度越低。碳排放指标 CO_2和 CH_4数值越高，则碳减排效益越低。因此，对以上指标进行正向化（1-标准化指标绝对值）以更符合日常理解习惯。

2.2 小微湿地综合效益评价

2.2.1 综合评价体系

选取两级指标建立小微湿地综合效益评价体系（表 1），包含 2 个一级指标和 8 个二级指标（表 1）。

表 1 小微湿地景观综合效益评价指标体系

目标层	一级指标		二级指标
综合效益 A	美学评价（愉悦度）B1	主观打分指标	主观打分 C1
		客观分形指标	分形维数 C2
		客观生理指标	EDA C3
			EMG C4
			HRV 变异性 C5
			RESP C6
	生态效益（碳减排）B2	生态效益指标	CO_2排放当量 C7
			CH_4排放当量 C8

2.2.2 多重评价方法

1）雷达图法。雷达图可直观反映各评价指标的相对优劣[31]。雷达图围合的面积越大代表对应指标的效益越高。本研究对归一化处理后的各指标取均值，计算雷达图围合算术面积。

2）TOPSIS。选择以人的主观认知为主的 AHP 和以客观数据为主的熵权法，分别获取各指标权重。结合 TOPSIS 进行综合评价与总分计算。TOPSIS 综合评价指标值越接近 1，代表备选方案越接近于正理想解，即越优；反之越差。总分可直观反映每个备选方案在各个指标上的综合表现，得分越高代表备选方案在各个指标上的表现越好[32]。

3）基于 AHP 权重的 TOPSIS。基于专家从事行业、专业等方面扩大问卷范围，并参考已有研究专家有效问卷样本量，以尽可能减少系统误差[33]。共收集有效 AHP 打分问卷 36 份（男性 24 份，女性 12 份）。专家主要从事风景园林相关行业，包括企事业单位和高校教科研博士或高级职称人员。所有问卷均通过一致性检验[34]，各指标权重取均值。

4）基于熵权的 TOPSIS。熵权越小权重系数越大，表示该指标的重要性越高。因此，熵权法中的目标通常是最小化熵权，以便找到最优的权重分配方案。信息熵计算公式如下[35]：

$$E_j = -\frac{1}{\ln n}\sum_{i=1}^{n} p_{ij}\ln p_{ij} \quad (2)$$

式（2）中：E_j是第 j 个指标的熵值；n 是样本数；p_{ij}是第 i 个样本在第 j 个指标上的标准化值；ln 是以 e 为底的对数运算。权重计算公式如下[35]：

$$W_j = -\frac{1 - E_j}{m - \sum_{k=1}^{m} E_j} \tag{3}$$

式（3）中：W_j是第 j 个指标的权重；m 是指标数量；E_j是第 j 个指标的信息熵。

2.3　数据分析

采用 IBM SPSS Statistics 25 对各指标进行归一化处理[36]。采用 R Studio（ver. 4. 3. 2）进行 AHP 权重、熵权和 TOPSIS 计算。采用 Origin 2021 制作雷达图。

3　结果与分析

3.1　雷达图法评估小微湿地综合效益

由表 2 可知，冬季 CH_4 排放指标值最高（0. 917），HRV 指标值最低（0. 166）。夏季 EMG 指标值最高（0. 916），HRV 指标值最低（0. 145）。

表 2　美学客观指标标准化统计表

参数		EDA	EMG	RESP	HRV	分形维数	CO_2	CH_4	主观打分
指标值	冬季	0. 708	0. 83	0. 315	0. 166	0. 302	0. 600	0. 917	0. 559
	夏季	0. 772	0. 916	0. 325	0. 145	0. 319	0. 779	0. 866	0. 630

由图 2 可知：冬季小微湿地景观综合效益为 0. 671，生理评价综合效益为 0. 272；夏季小微湿地景观综合效益为 0. 857，生理评价综合效益为 0. 324。其中，夏季分形维数、主观评价、EDA、EMG、CO_2均大于冬季，而 HRV、CH_4均小于冬季。

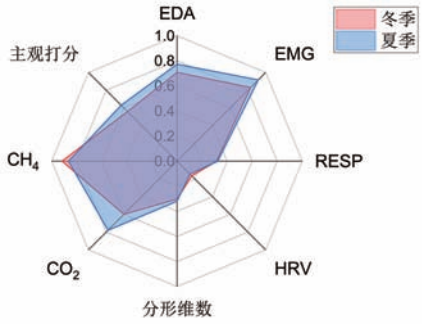


图 2　各指标综合效益雷达图

3.2　TOPSIS 评估小微湿地综合效益

3.2.1　基于 AHP 权重指标的 TOPSIS

由表 3 可知，美学评价指标权重最高（0. 552），而 HRV 评价指标权重最低（0. 071）。各指标排序结果为美学评价>生态效益>CO_2>CH_4>主观打分>分形维数>EDA>RESP>EMG>HRV。

表 3　AHP 各指标权重统计表

参数	权重值
B1 美学评价	0. 552
B2 生态效益	0. 448
C1 主观打分	0. 159
C2 分形维数	0. 087
C3 EDA	0. 080
C4 EMG	0. 076
C5 HRV	0. 071
C6 RESP	0. 077
C7 CO_2排放当量	0. 235
C8 CH_4排放当量	0. 214

由表 4 可知，冬季总分均值为 0. 54，CH_4均值最高（0. 16），而分形维数与 HRV 综合评价指标均值最低（0. 03）。夏季总分均值为 0. 56，CH_4均值最高（0. 15），而分形维数综合评价指标均值最低（0. 03）。

表 4　AHP 权重系数下各评价指标 TOPSIS 综合评价指标与总分

季节	月份	综合评价指标								总分
		CH_4	CO_2	EDA	RESP	EMG	HRV	主观打分	分形维数	
冬季	12	0. 18	0. 04	0. 11	0. 07	0. 06	0. 01	0. 04	0. 03	0. 54
	1	0. 22	0. 05	0. 06	0. 03	0. 05	0. 04	0. 05	0. 04	0. 54
	2	0. 08	0. 05	0. 15	0. 02	0. 12	0. 04	0. 03	0. 02	0. 51
	均值	0. 16	0. 05	0. 11	0. 04	0. 08	0. 03	0. 04	0. 03	0. 54
夏季	6	0. 19	0. 06	0. 11	0. 08	0. 06	0. 02	0. 05	0. 02	0. 59
	7	0. 19	0. 06	0. 06	0. 03	0. 06	0. 05	0. 05	0. 05	0. 55
	8	0. 06	0. 05	0. 15	0. 02	0. 12	0. 06	0. 04	0. 03	0. 54
	均值	0. 15	0. 06	0. 11	0. 04	0. 08	0. 04	0. 05	0. 03	0. 56

3.2.2 基于熵权权重指标的 TOPSIS

由表 5 可知：CH_4 排放指标信息熵最低（0.948 3），信息效用值最高（0.051 7），权重系数最高（49.00%）；EDA 和 RESP 评价指标信息熵最高（0.999 9），信息效用值最低（0.000 1），EDA 指标的权重系数最低（0.11%）。

由表 6 可知：夏季总分均值为 0.55；CH_4 排放综合评价指标均值最高（0.23）；主观打分和 CO_2 排放综合评级指标均值最低（0.00）。冬季总分均值为 0.54。CH_4 均值最高（0.24）；主观打分和 CO_2 均值最低（0.00）。

表 5 冬夏两季各评价指标熵权法权重

参数	信息熵 E	信息效用值 D	权重系数 W/%
CH_4	0.948 3	0.051 7	49.00
CO_2	0.965 8	0.034 2	32.38
EDA	0.999 9	0.000 1	0.11
RESP	0.999 9	0.000 1	0.12
EMG	0.999 8	0.000 2	0.16
HRV	0.999 2	0.000 8	0.74
主观打分	0.983 1	0.016 9	16.05
分形维数	0.998 5	0.001 5	1.44

表 6 熵权法权重系数下各评价指标 TOPSIS 综合评价指标与总分

月份	综合评价指标								总分
	CH_4	CO_2	EDA	RESP	EMG	HRV	主观打分	分形维数	
12	0.42	0.00	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63
1	0.30	0.00	0.01	0.00	0.01	0.08	0.00	0.04	0.44
2	0.00	0.01	0.34	0.00	0.12	0.05	0.00	0.00	0.52
均值	0.24	0.00	0.15	0.03	0.04	0.04	0.00	0.02	0.54
6	0.43	0.00	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.66
7	0.27	0.00	0.01	0.00	0.01	0.12	0.00	0.05	0.45
8	0.00	0.01	0.34	0.00	0.12	0.08	0.00	0.01	0.55
均值	0.23	0.00	0.15	0.04	0.04	0.07	0.00	0.02	0.55

4 讨论

4.1 小微湿地景观美学评价

AHP 与熵权法所得主观打分的权重均较高，分别为 15.9%（表 3）和 16.05%（表 5），表明主观问卷仍是景观评价的重要手段。夏季景观主观打分高于冬季，表明季相变化对人的主观认知偏好具有影响。EDA 与 EMG 在雷达图中数值高，表明上述指标在该评价体系中贡献度高[37]，可作为雷达图法评价小微湿地景观美学的参考指标。而 EDA 与 EMG 指标权重在 AHP 与熵权法中均较低，这可能由于 EDA 与 EMG 的数据浮动较大，归一化后经计算得到了较大的熵权，从而降低了其权重系数。皮电与肌电等生理信号可测量人复杂的情绪变化[38]，这也表明 EDA 与 EMG 指标敏感度较高，更容易体现小微湿地景观对人的影响。EDA 与 EMG 均值降低时表明人情绪趋于稳定和平静，此时愉悦度较高，进而反映出图像美景度较高。RESP 与 HRV 的权重系数同样较低，这可能与指标本身的变化幅度有关，也可能与试验时被试所受刺激相关。未来研究可围绕这两项指标细化试验设计，深入分析数据。此外，本研究中夏季客观生理总分高于冬季，这与主观打分结果一致，也验证了夏季景观对人愉悦度高于冬季的结果。

分形维数指标权重系数在两种方法下均大于生理各评价指标，而小于主观打分评价指标，这表明分形维数指标具有一定稳定性，可作为评价指标或作为景观设计的辅助指标[39]。基于此，建议今后小微湿地景观美学评价可结合问卷调查，考虑补充分形维数与客观生理指标，综合评价小微湿地景观美学效益。此外，冬季小微湿地分形维数低于夏季，因此宜种植高大乔木，丰富小微湿地景观立面轮廓，以提高景观美景度和观赏者的感受。同时，应尽量避免观赏面以单一建筑作为背景；可通过种植设计提高植物层次，丰富植物组合，提高景观轮廓分形值，进而提升景观美景度。

4.2 小微湿地生态效益评价

CO_2 与 CH_4 是主要的碳排放气体类型，其排

放当量是评价小微湿地景观综合效益的重要指标。熵权法所得 CH_4 排放当量指标权重系数大于 CO_2，这与 TOPSIS 总分计算结果一致。虽然雷达图法中 CH_4 排放当量值均大于 CO_2 排放当量，这与 AHP 中的权重相反，但基于 AHP 的 TOPSIS 总分计算表明 CH_4 排放当量总分高于 CO_2 排放当量，这与雷达图法结果一致。

夏季 CO_2 排放高于冬季，这与前人对城市河流温室气体排放的研究结果一致[40]，这可能与本研究区域植物夏季光合与呼吸作用，以及土壤微生物呼吸作用增强有关。夏季气温高，处于北方地区的生长期，可促进 CO_2 排放；而冬季气温低，研究样地植物地上部分枯死，微生物活性降低，导致土壤呼吸减少，因而冬季 CO_2 排放更低[41]。

今后小微湿地景观设计宜针对不同样地与景观环境，考虑不同设计手法与植物配置对碳排放的影响[36]，以降低碳排放强度。景观评价中宜更多考虑景观生态功能与效益，将碳排放纳入景观评价指标体系，并重视湿地的生态价值与自身功能。例如，宜选择固碳量高的植物造景以获得更高碳减排效益。由于我国长江以北地区冬夏季相变化和气候差异明显，具有较好的典型性和差异性，因此，本研究重点比较冬夏两季对景观美学和碳减排的影响。未来还可考虑更多碳排放时序组合，进一步深化不同气候区小微湿地景观综合效益研究。

4.3　小微湿地景观综合评价

雷达图法与 TOPSIS 均表明，夏季小微湿地景观综合效益大于冬季。这两种方法均可作为景观评价中互相验证的方法。在今后的景观设计与评价中，针对夏季得分较高的评价指标，宜做到良好的景观维护。对于冬季得分较低的评价指标，可参考夏季得分较高的景观环境进行相应的设计补充与完善，弥补季节原因所导致的环境要素缺失，提高全年景观的综合效益。

AHP 和熵权法所得指标权重排序基本一致。其中，客观生理指标权重均最低。美学评价指标中，主观打分权重大于分形维数权重。生态效益中的 CO_2 与 CH_4 排放当量指标权重均大于美学主客观与分形评价指标，总分计算结果则均为美学评价大于生态效益，这表明如何提高生态效益是未来研究的重点。因此，在今后的景观评价过程中，宜综合考虑美学与生态效益。

此外，夏季主观、生理与分形的评估值均高于冬季，但 CH_4 排放效益低于冬季。因此，在冬季可通过种植常绿植物提高景观美学价值，并保持其较高的生态效益值；在夏季可通过种植枝叶茂密的固碳乔木遮荫降温[42]，提高碳排放效益，以促进小微湿地景观美学与生态效益的提高。

5　结论

本文在同一度量上用分形、生理和生态多重评价指标评估不同季节小微湿地综合效益。结果表明，雷达图法与 TOPSIS 所得评价结果均为夏季优于冬季；AHP 与熵权法所得夏冬两季景观综合评级指标权重排序基本一致。以上方法经互相验证，均可用于小微湿地综合效益评价。建议景观美学以主观打分为主要主观评价指标，以分形维数、EDA 和 EMG 为主要客观评价指标；生态效益以 CO_2 和 CH_4 排放当量为主要评价指标。冬季种植常绿植物可提高景观美学价值，夏季选取高固碳植物可提高碳减排效益。夏季的碳减排效益和冬季的美学效益是未来设计优化的方向。

参考文献

[1]耿仕涛,高鸽.小微湿地:家门口的生态“百宝箱”[J].自然资源科普与文化,2024(1):28-31.

[2]袁艺,周立志.城市化背景下小微湿地景观动态变化及其驱动因素[J].生态学报,2022,42(17):7028-7042.

[3]宋晴,朱义,张春松,等.上海小微湿地保护与多元利用模式研究[J].湿地科学与管理,2021,17(2):54-57.

[4]胡敏,蒋启波,高磊,等.山地小微湿地生态修复探讨:以梁平区猎神村梯塘小微湿地为例[J].三峡生态环境监测,2021,6(1):46-52.

[5]王正浩,程璜鑫.美景度评价在湿地景观质量评价中的应用与发展趋势[J].中国水运,2023(20):73-76.

[6]李娜,高云,孙乔昀,等.国家公园视觉景观评估实证研究趋势、进展和应用[J].中国城市林业,2023,21(1):156-165.

[7]李莉.张掖国家湿地公园景观设计研究[D].兰州:西北师范大学,2020.

[8]白院生.南昌市艾溪湖湿地公园植物景观评价研究[D].南昌:江西财经大学,2018.

[9]刘樱园,李帅,吴铮,等.基于 AHP 法与 SBE 法的郑州北龙湖湿地公园植物景观评价[J].林业调查规划,2024,49(6):68-75.

[10]李晓蓝,徐振东,陈中义.城市湿地近自然景观评价体系构建与应用[J].现代园艺,2024(5):30-32.
[11]王鹏,俞飞,何友均,等.国家公园景观视觉美学质量对公众生理反应的影响[J].自然保护地,2024,4(1):13-24.
[12]吴江洲.多空间尺度森林公园景观质量评价研究[D].长沙:中南林业科技大学,2023.
[13]陈筝,塞巴斯蒂安·舒尔兹,刘雨菡,等.基于生理反馈的建成环境体验评价与设计辅助[J].时代建筑,2017(5):24-28.
[14]张耀文,贾婕,边奕霏,等.不一样的嗅觉景观:消极气味植物对人体健康及情绪反馈研究[J].园林,2024,41(9):99-107.
[15]丁明静,葛之葳,张青萍,等.环秀山庄假山组合要素轮廓线分形量化研究[J].中国园林,2021,37(9):128-132.
[16]段传宏,张敬丽,王晓云,等.基于维数特征的园林植物林冠线和色彩分析[J].农学学报,2022,12(2):60-64.
[17]王子豪,徐鑫溢,陈庆锋,等.人类活动对黄河三角洲湿地碳排放的影响研究进展[J].湿地科学,2024,22(2):310-326.
[18]徐昉,李明慧,施以,等.基于双碳目标的园林植物景观营建策略研究:以北京市海淀公园为例[J].园林,2023,40(1):34-41.
[19]黄卓,荆贝贝.大城市楔形绿地碳汇能力评估及提升策略研究:以上海张家浜楔形绿地为例[J].环境生态学,2024,6(3):44-52.
[20]翟夏杰,崔丽娟,李伟,等.湿地生态系统评价的常用方法和应用研究进展[J].生态科学,2024,43(5):189-199.
[21]黄广远,徐程扬,朱解放,等.基于层次分析法和逼近理想解排序法的高校校园绿地景观评价[J].东北林业大学学报,2012,40(9):113-115,123.
[22]聂移同.基于生态-审美感知的城市湿地公园景观评价标准构建及应用[D].西安:西安建筑科技大学,2021.
[23]袁旸洋,朱辰昊,成玉宁.城市湖泊景观水体形态定量研究[J].风景园林,2018,25(8):80-85.
[24]孙进.城市街道景观空间要素对缓解情绪压力的影响[D].合肥:安徽建筑大学,2022.
[25]王倩.基于生理反馈的红色文化景观视觉偏好识别及感知评价[D].合肥:安徽建筑大学,2023.
[26]李鑫,王子尧,吴丹子,等.基于生理反馈的城市滨河步道对青年人压力缓解的研究[J].中国园林,2022,38(5):86-91.
[27]林志浩,姚兴达,杨凡,等.基于景观偏好理论的公园绿地植物景观[J].中国城市林业,2021,19(2):68-72.
[28]沙晨燕,谭娟,王卿,等.不同类型河滨湿地甲烷和二氧化碳排放初步研究[J].生态环境学报,2015,24(7):1182-1190.
[29]孙心雨,田佳榕,徐雁南,等.基于地基激光雷达的道路生态景观评价:以黄海海滨国家森林公园为例[J].生态与农村环境学报,2020,36(11):1477-1484.
[30]陈岚,成国强,廖晨阳,等.成都市武侯区城市公园可达性分析[J].中国城市林业,2022,20(2):30-35.
[31]付赟,方德英.雷达图法在综合评价中的应用研究[J].统计与决策,2007,23(24):176-178.
[32]江婉舒,周立志,周小春.基于熵权法的安徽省湿地重要性评估[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1164-1174.
[33]闫景利.基于AHP法的郑州市城市道路植物景观评价与分析研究[J].农业与技术,2024,44(3):143-147.
[34]刘漫,李夏颖,郭芳婷,等.基于AHP法的森林公园消极性气味景观评价[J].中国城市林业,2020,18(5):66-70.
[35]王琼,卢聪,李法云,等.基于主成分分析和熵权法的河流生境质量评价方法:以清河为例[J].生态科学,2017,36(4):185-193.
[36]李伯华,杨家蕊,刘沛林,等.传统村落景观价值居民感知与评价研究:以张谷英村为例[J].华中师范大学学报(自然科学版),2018,52(2):248-255.
[37]刘琦,苑飞燕,段茂庆,等.基于雷达图的永定河水环境质量评价[J].环境生态学,2024(7):21-28.
[38]韩颖,董玉琦,毕景刚.学习分析中情绪的生理数据表征:皮肤电反应的应用前瞻[J].现代教育技术,2018,28(10):12-19.
[39]康昱.杭州传统园林山石景观分形研究及应用[D].杭州:浙江理工大学,2022.
[40]胡晓康,咎逢宇,常素云,等.天津市海河温室气体排放特征与影响因素研究[J].生态环境学报,2021,30(4):771-780.
[41]LI G,LI H L,YANG M,et al.Seasonal and diurnal methane and carbon dioxide emissions from the littoral area of the Miyun Reservoir in Beijing, China [J]. Marine and Freshwater Research,2018,69(5):751.
[42]郭婷婷,朱思瑾,楼一蕾,等.城市公园常见植物固碳能力评估[J].中国城市林业,2024,22(2):113-120.