

污水处理与回用

马越, 姬国强, 胡艺泓, 等. 基于层次分析法的建筑再生骨料人工湿地植物评价模型构建与应用[J]. 净水技术, 2024, 43(4): 76-84, 201.
MA Y, JI G Q, HU Y H, et al. Plant evaluation modeling and application for construction recycled aggregate constructed wetland based on analytic hierarchy process[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4): 76-84, 201.

基于层次分析法的建筑再生骨料人工湿地植物评价模型构建与应用

马越¹, 姬国强¹, 胡艺泓¹, 杨亚欧², 王辉^{3,4}, 李家科^{3,4}, 李亚娇^{2,*}

(1. 陕西省西咸新区沣西新城开发建设(集团)有限公司海绵城市技术中心, 陕西西安 712000; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西西安 710054; 3. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西西安 710048; 4. 西安理工大学水利水电学院, 陕西西安 710048)

摘要 研究以混合建筑再生骨料、红砖和砾石为填料, 菖蒲、香蒲、鸢尾、芦苇、美人蕉、再力花、风车草为供试植物, 利用层次分析法, 构建了基于植物生长特性、生理特性、水质净化效果和经济成本为准则层的人工湿地植物评价体系。结果表明, 对4个准则层进行排序为水质净化效果(0.6144) > 生长特性(0.1727) > 经济成本(0.1187) > 生理特性(0.0942); 在净化效果中, 4个因子的权重排序为 TN(0.3050) = TP(0.3050) > 氨氮(0.2769) > COD_{Cr}(0.1131)。生长特性中风车草得分最高(0.585), 鸢尾得分最低(0.229); 生理特性中芦苇得分最高(0.410), 鸢尾得分最低(0); 净化效果中风车草得分最高(2.858), 菖蒲和再力花得分最低(1.361)。根据该评价体系, 7种植物的综合排序依次为风车草、香蒲、芦苇、美人蕉、鸢尾、菖蒲、再力花。为充分发挥植物在湿地中的作用, 可选取综合排序前3的植物用于影响因素的研究。

关键词 人工湿地 建筑再生骨料 层次分析法 湿地植物 净化效果 评价模型

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)04-0076-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.04.010

Plant Evaluation Modeling and Application Construction Recycled Aggregate Constructed Wetland Based on Analytic Hierarchy Process

MA Yue¹, JI Guoqiang¹, HU Yihong¹, YANG Ya'ou², WANG Hui^{3,4}, LI Jiako^{3,4}, LI Yajiao^{2,*}

(1. Technology Research Center for Sponge City, Fengxi New City Development and Construction Group Co., Ltd. of Shanxi Xixian New Area, Xi'an 712000, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

3. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

4. School of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract In this study, mixed construction recycled aggregates, red bricks and gravels were used as fillers, *Acorus calamus* L., *Typha orientalis* Presl, *Iris tectorum* Maxim., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud, *Canna indica* L., *Thalia dealbata* Fraser and *Cyperus involucratus* Rotboll were used as test plants. A constructed wetland plant evaluation system based on plant growth characteristics, physiological characteristics, water purification effect and economic cost was constructed using analytic hierarchy

[收稿日期] 2023-06-29

[基金项目] 陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2022KXJ-115)

[作者简介] 马越(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向为给水排水、水环境科学及海绵城市技术,E-mail:610344573@qq.com。

[通信作者] 李亚娇(1978—),女,博士,副教授,研究方向为城市降雨径流污染与水资源保护、城市给排水管网优化配置,E-mail:65942271@qq.com。

process (AHP). Results showed that the four criterion layers were ranked as water purification effect (0.614 4) > growth characteristics (0.172 7) > economic cost (0.118 7) > physiological characteristics (0.094 2). The weights of the four purification factors were ranked as TN (0.305 0) = TP (0.305 0) > ammonia nitrogen (0.276 9) > COD_{Cr} (0.113 1). The highest score for growth characteristics was 0.585 (*Cyperus involucratus* Rottboll) and the lowest score was 0.229 (*Iris tectorum* Maxim.); the highest score for physiological characteristics was 0.410 (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud) and the lowest score was 0 (*Iris tectorum* Maxim.); the highest score for purification effect was 2.858 (*Cyperus involucratus* Rottboll) and the lowest score was 1.361 (*Acorus calamus* L. and *Thalia dealbata* Fraser). According to the evaluation system, the comprehensive ranking of the seven plants was *Cyperus involucratus* Rottboll, *Typha orientalis* Presl, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud, *Canna indica* L., *Iris tectorum* Maxim., *Acorus calamus* L. and *Thalia dealbata* Fraser. To take full advantage of the role plants play in wetlands, the top three plants in the composite ranking can be selected to study influencing factors.

Keywords constructed wetland construction recycled aggregates analytic hierarchy process (AHP) wetland plants purification effect evaluation mode

植物对人工湿地净化水质有重要作用。在人工湿地中,不同植物其耐污性与抗逆性有所区别,通常在选择湿地植物时,人们会根据污水水质、景观、成本、净水效果进行合理选择,尽可能地在保证系统生物多样性的同时,提高污水净化效率。研究^[1-2]发现,有植物的湿地系统对氮、磷等去除率要明显高于无植物的湿地系统。对于季节来说,春季期间,美人蕉、芦苇对氮的去除率小于60%,而生长旺盛的夏季对氮的去除率超过85%^[3]。翟旭等^[4]研究发现,芦苇、水葱、香蒲和千屈菜4种湿地植物对氨氮、TN、TP的平均去除率分别约为50%、40%、25%,出水pH值为7左右,4种湿地植物的选择顺序为香蒲>芦苇>水葱>千屈菜。Reddy等^[5]研究了凤眼莲等8种水生植物净化污水的能力,结果发现,夏季和冬季8种水生植物去氮效果的优劣次序有所不同。陈永华等^[6]根据湿地植物的适应能力和生理特性、耐污去污能力进行聚类分析,最终将17种湿地植物分为了3类。可以发现,不同的湿地植物对污水的净化效果不同,而且这些研究多集中于以砾石为填料的湿地植物筛选,同时对湿地植物的筛选和评价多局限于水质净化效果,缺乏从植物、填料、水质等多方面进行综合评价的体系,而且未出现定量的植物评价结果。

随着资源化利用的提出,建筑再生骨料开始成为一种新型的人工湿地填料。研究^[7-10]结果表明,废砖块、混凝土等建筑再生骨料具有较高的孔隙率和比表面积,对氮磷有较好的吸附效果;从生物附着性能来看,建筑再生骨料适于湿地微生物的富集和植物的生长。田伟等^[11]以混凝土块和碎砖为人工湿地的填料,发现这两种建筑垃圾对污水中SS、

COD_{Cr}、TP、TN、氨氮等指标有很好处理的效果。但是基于建筑再生骨料的人工湿地植物筛选及其综合评价体系的构建仍需深入研究。

层次分析法 (analysis of hierarchy process, AHP) 是一种确定目标权重的方法,常用于多目标决策系统中^[12]。运用AHP时,将评价体系分为目标层、准则层与方案层3个层面,各准则在目标层中的相对重要性不同,因此,需要建立包含所有准则相对重要性的数学模型进行两两比较,从而将定性问题转为定量问题解决^[13]。在评价植物时,AHP多用于城市生态公园的景观美感评价以及海绵城市建设中景观植物的配置设计^[14-15]。然而这些评价体系无法满足基于特殊填料的人工湿地植物筛选。因此,本研究以混合建筑再生骨料、红砖和砾石为人工湿地填料,以风车草、美人蕉、芦苇、菖蒲、香蒲、再力花、鸢尾为人工湿地植物,采用AHP从植物的生长特性、生理特性、水质净化效果以及经济成本4个准则层对7种人工湿地植物进行综合评价,并给出植物的优先次序,筛选出基于建筑再生骨料的人工湿地植物。

1 AHP构建的过程与步骤

1.1 综合层次评价结构建立

本研究所构建植物评价体系的准则层包括生长特性、生理特性、水质净化效果、经济成本。具体而言,包含了植物株高、分株数、生物量、花果期、聚集度,叶绿素、类胡萝卜素、化学需氧量(COD_{Cr})、氨氮、总氮(TN)、总磷(TP),具体层次结构如图1所示。

目标层(A):将植物筛选作为总目标,并将目标分解为四大要素,以此为出发点,通过计算衡量相对

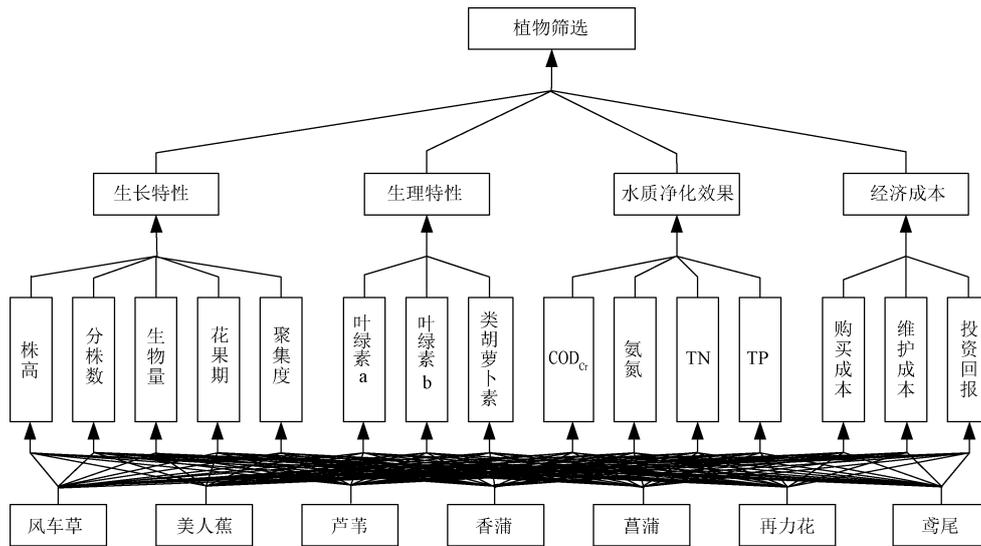


图1 植物筛选层次分析结构图

Fig. 1 Hierarchical Structure Diagram of Plants Screening

重要性,得出评价的最终结果。

准则层(B):将植物筛选分解为生长特性(B1)、生理特性(B2)、水质净化效果(B3)、经济成本(B4)4个指标,应用计算方法分别得出各指标的权重,得出对总目标的影响程度。

指标层(C):对准则层的4个指标继续进行划分,其中生长特性(B1)划分为植物株高(C1)、分株数(C2)、生物量(C3)、花果期(C4)和聚集度(C5);生理指标(B2)划分为叶绿素a(C6)、叶绿素b(C7)和类胡萝卜素(C8);水质净化效果(B3)划分为COD_{Cr}(C9)、氨氮(C10)、TN(C11)和TP(C12);经济成本(B4)划分为购买成本(C13)、维护成本(C14)和投资回报(C15)。各指标之间两两对比得出权重。

1.2 判断矩阵的构造

一般认为成对比较因素的每层不宜超过9个,故常用1~9及其倒数的标度法判断两因素的重要性(表1)。两两比较判断矩阵的标度通过数字来定义:1、3、5、7、9分别代表一个因素*i*与另一个因素*j*相比同样重要、稍微重要、明显重要、强烈重要、极端重要;2、4、6、8表示相邻两种重要性的中值。其中*a_{ij}*为*i*对*j*的重要性,*a_{ji}*为*j*对*i*的重要性,*a_{ji}* = 1/*a_{ij}*。

假定*B_n*为准则,下一层的元素*C₁*、*C₂*、...、*C_n*可被*B_n*支配,则需要针对*B_n*下*C_i*、*C_n*的重要性进行数量化比较,建立两两比较判断矩阵,如式(1)。

$$B_n = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \dots & C_{2n} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & \dots & C_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & \dots & C_{nn} \end{vmatrix} \quad (1)$$

表1 不同阶数的*R₁*取值
Tab. 1 *R₁* Values for Different Orders

阶数(<i>n</i>)	<i>R₁</i>	阶数(<i>n</i>)	<i>R₁</i>
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12		

1.3 计算相对权重

在准则*B_n*下,计算元素*C₁*、*C₂*、...、*C_n*权重,得到判断矩阵*C*的最大特征根*λ_{max}*,以符合公式(2)。

$$AX = \lambda_{max} X \quad (2)$$

其中:*A*——*n*阶矩阵;

X——*λ_{max}*特征向量,分量*X_i*(*i* = 1, 2, ..., *n*)为对应元素*C₁*、*C₂*、...、*C_n*在准则下单排序的权重。

本文求解判断矩阵采用方根法[式(3)]。

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AX)_i}{nX_i} \quad (3)$$

其中： X_i ——对应元素归一化后的特征向量。

1.4 一致性检验

n 阶判断矩阵,它的最大特征根为单根,并且 $\lambda_{\max} \geq n$ 。当 $\lambda_{\max} = n$, 其他特征根等于 0 时, B_n 具有完全一致性。 $\lambda_{\max} > n$, 其他特征根接近等于 0, B_n 具有满意一致性。一致性检验公式为式(4)~式(5)。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (5)$$

其中： C_1 ——一致性指标；

C_R ——一致性比率；

R_1 ——随机一致性指标。

$C_1 = 0$ 时,矩阵是完全一致性, C_1 值愈大,矩阵的一致性愈差。考虑到随机性误差,最后一致性指标应加上 R_1 , R_1 的取值如表 1 所示(准则层的元素一般不超过 9 个,因此,判断矩阵的阶数一般不超过 9)。

当 $C_R < 0.10$ 时,认为具有一致性,否则需一

直调整判断矩阵各因素的取值直到符合要求为止。

1.5 计算各因子层各项指标的综合权重

综合权重值是准则层相对于目标层的权重值,计算如式(6)。

$$Q_M = X_{B_j} \times X_{C_{ij}} \quad (6)$$

其中： X_{B_j} —— B_j 对于 A 的权重值；

Q_M ——综合权重值；

$X_{C_{ij}}$ —— C_{ij} 相对 B_j 的权重值。

2 各指标体系的构建

2.1 植物筛选模型建立

根据 15 项评价因子构建了多层次评价模型,如表 2 所示。

2.2 数据归一化处理

以风车草、美人蕉、芦苇、香蒲、菖蒲、再力花、鸢尾 7 种植物作为评价对象,准则层下各指标作为评价内容,将指标层不同评价体系的数据(表 3)进行归一化处理使之统一无量纲化,各指标归一化数据如表 4 所示。

表 2 植物多层次评价模型
Tab. 2 Multi-Level Evaluation Model of Plants

目标层	准则层	指标层	评价内容
植物筛选(A)	生长特性(B1)	株高(C1)	混合建筑再生骨料中 7 种植物植株最高值
		分株数(C2)	混合建筑再生骨料中 7 种植物在 7 月分株数
		生物量(C3)	生物量增长量平均值
		花果期(C4)	有花果期,且花果期较长;有花果期,但花果期较短;无花果期
		聚集度(C5)	植株较聚集/分散/生长杂乱
	生理特性(B2)	叶绿素 a(C6)	冬季叶绿素 a 含量相比夏季下降百分比
		叶绿素 b(C7)	冬季叶绿素 b 含量相比夏季下降百分比
		类胡萝卜素(C8)	冬季类胡萝卜素含量相比夏季下降百分比
	水质净化效果(B3)	COD _{Cr} (C9)	COD _{Cr} 去除率
		氨氮(C10)	氨氮去除率
		TN(C11)	TN 去除率
		TP(C12)	TP 去除率
	经济成本(B4)	购买成本(C13)	每颗 12 元或 17 元
		维护成本(C14)	仅需日常浇水;需经常浇水、施肥、日晒等;植物有虫害,需要喷洒杀虫剂
		投资回报(C15)	花果、枝干等有无利用价值

表3 不同植物在各指标层中的数据
Tab. 3 Data of Different Plants in Each Index Layer

指标层	风车草	美人蕉	芦苇	菖蒲	香蒲	再力花	鸢尾
株高/cm	50	44.8	70.4	49.4	103.8	63.5	46.3
分株数/株	29	3	8	2	1	3	1
生物量/g	83.73	23.8	7.73	10.2	33	30.9	2.6
花果期	1	3	1	2	1	2	1
聚集度	2	3	1	3	3	2	3
叶绿素 a/(mg·L ⁻¹)	94.32	86.38	90.09	97.54	80.29	98.15	-
叶绿素 b/(mg·L ⁻¹)	92.49	89.87	54.21	83.14	78.68	95.99	-
类胡萝卜素/(mg·L ⁻¹)	88.14	87.37	77.5	78.32	83.88	98.25	-
COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	28.02	24.31	29.05	22.51	40.39	20.2	47.15
氨氮/(mg·L ⁻¹)	95.83	94.72	95.24	95.93	95.84	91.63	94.14
TN/(mg·L ⁻¹)	87.21	81.9	81.56	78.94	89.31	93.64	55.43
TP/(mg·L ⁻¹)	89.31	84.32	86.8	82.27	84.77	77.63	86.72
购买成本	1	1	2	2	2	1	1
维护成本	3	2	1	2	3	3	2
投资回报	1	2	2	1	1	2	1

表4 各指标归一化数据
Tab. 4 Normalized Data of Each Index

指标层	风车草	美人蕉	芦苇	菖蒲	香蒲	再力花	鸢尾
株高	0.09	0	0.43	0.08	1	0.32	0.03
分株数	1	0.07	0.25	0.04	0	0.07	0
生物量	1	0.26	0.06	0.09	0.37	0.35	0
花果期	0	1	0	0.5	0	0.5	0
聚集度	0.5	1	0	1	1	0.5	1
叶绿素 a	0.71	0.31	0.5	0.88	0	0.91	-
叶绿素 b	0.84	0.78	0	0.63	0.53	0.91	-
类胡萝卜素	0.47	0.44	0	0.04	0.28	0.92	-
COD _{Cr}	0.29	0.15	0.33	0.09	0.75	0	1
氨氮	0.98	0.72	0.84	1	0.98	0	0.58
TN	0.83	0.69	0.68	0.62	0.89	1	0
TP	1	0.57	0.79	0.4	0.61	0	0.78
购买成本	0	0	1	1	1	0	0
维护成本	1	0.5	0	0.5	1	1	0.5
投资回报	0	1	1	0	0	1	0

2.3 层次单排序及其一致性检验

计算准则层(生长特性、生理特性、净化效果和

经济成本)下各指标的相对权重并进行一致性检验,结果如表5~表9所示。

表 5 判断矩阵(A-B)权重值及一致性检验

Tab. 5 Weight Value of Judgment Matrix (A-B) and Consistency Test

评价要素	生长特性(B1)	生理特性(B2)	净化效果(B3)	经济成本(B4)	权重	一致性检验
生长特性(B1)	1	2	1/5	2	0.172 7	$\lambda_{\max} = 4.177 4$ $C_R = 0.066 4 < 0.1$
生理特性(B2)	1/2	1	1/4	1/2	0.094 2	
净化效果(B3)	5	4	1	6	0.614 4	
经济成本(B4)	1/2	2	1/6	1	0.118 7	

如表 5 所示,生长特性权重值为 0.172 7,生理经济成本权重值为 0.118 7,可以看出在准则层中净化效果的影响最大,生理特性影响最小。

表 6 判断矩阵(B1-C)权重值及一致性检验

Tab. 6 Weight Value of Judgment Matrix (B1-C) and Consistency Test

生长指标(B1)	株高(C1)	分株数(C2)	生物量(C3)	花果期(C4)	聚集度(C5)	权重	一致性检验
株高(C1)	1	1	1/2	1	2	0.178 0	$\lambda_{\max} = 5.141 8$ $C_R = 0.031 6 < 0.1$
分株数(C2)	1	1	1	1	3	0.226 0	
生物量(C3)	2	1	1	3	3	0.331 8	
花果期(C4)	1	1	1/3	1	3	0.183 0	
聚集度(C5)	1/2	1/3	1/3	1/3	1	0.081 1	

由表 6 可知,植物株高在生长特性层所占权重为 0.178 0,植物分株数在生长特性层所占权重为 0.226 0,生物量在生长特性层所占权重为 0.331 8,花果期在生长特性层所占权重为 0.183 0,聚集度在生长特性层所占权重为 0.081 1。

表 7 判断矩阵(B2-C)权重值及一致性检验

Tab. 7 Weight Value of Judgment Matrix (B2-C) and Consistency Test

生理特性(B2)	叶绿素 a (C6)	叶绿素 b (C7)	类胡萝卜素(C8)	权重	一致性检验
叶绿素 a (C6)	3	1	1/2	0.319 6	$\lambda_{\max} = 3.018 3$ $C_R = 0.017 6 < 0.1$
叶绿素 b (C7)	4	2	1	0.558 4	
类胡萝卜素(C8)	1	1/3	1/4	0.122 0	

由表 7 可知,叶绿素 a 在生理特性层所占权重为 0.319 6,叶绿素 b 在生理特性层所占权重为 0.558 4,类胡萝卜素在生理特性层所占权重为 0.122 0。

表 8 判断矩阵(B3-C)权重值及一致性检验

Tab. 8 Weight Value of Judgment Matrix (B3-C) and Consistency Test

净化效果(B3)	COD _{Cr} (C9)	氨氮(C10)	TN(C11)	TP(C12)	权重	一致性检验
COD _{Cr} (C9)	1	1/2	1/3	1/3	0.113 1	$\lambda_{\max} = 4.020 6$ $C_R = 0.007 7 < 0.1$
氨氮(C10)	2	1	1	1	0.276 9	
TN(C11)	3	1	1	1	0.305 0	
TP(C12)	3	1	1	1	0.305 0	

由表 8 可知,COD_{Cr} 在净化效果层所占权重为 0.113 1,氨氮在净化效果层所占权重为 0.276 9,TN 在净化效果层所占权重为 0.305 0,TP 在净化效果层所占权重为 0.305 0。

由表 9 可知,购买成本在经济成本层所占权重为 0.319 6,维护成本在经济成本层所占权重为 0.558 4,

投资回报在经济成本层所占权重为 0.122 0。

层次总排序的权值经式(6)计算,结果如表 10 所示。

由表 10 可知,TN 与 TP 的总权重最大,其次是氨氮。COD_{Cr}、维护成本和生物量这 3 个评价因子权重较为接近,接着是叶绿素 b,其次是分株数、购

表 9 判断矩阵(B4-C)权重值及一致性检验

Tab. 9 Weight Value of Judgment Matrix (B4-C) and Consistency Test

经济成本(B4)	购买成本(C13)	维护成本(C14)	投资回报(C15)	权重	一致性检验
购买成本(C13)	1	1/2	3	0.319 6	$\lambda_{\max} = 3.018 3$ $C_R = 0.017 6 < 0.1$
维护成本(C14)	2	1	4	0.558 4	
投资回报(C15)	1/3	1/4	1	0.122 0	

表 10 植物筛选评价指标总权重

Tab. 10 Total Weight of Plant Screening Evaluation Index

目标层	准则层	单层权重	指标层	单层权重	综合权重
植物筛选	生长特性	0.172 7	株高	0.178 0	0.031
			分株数	0.226 0	0.039
			生物量	0.331 8	0.057
			花果期	0.183 0	0.032
			聚集度	0.081 1	0.014
	生理特性	0.094 2	叶绿素 a	0.319 6	0.030
			叶绿素 b	0.558 4	0.053
			类胡萝卜素	0.122 0	0.011
			COD _{Cr}	0.113 1	0.069
			氨氮	0.276 9	0.170
	净化效果	0.614 4	TN	0.305 0	0.187
			TP	0.305 0	0.187
			购买成本	0.319 6	0.038
			维护成本	0.558 4	0.066
			投资回报	0.122 0	0.014
经济成本	0.118 7	购买成本	0.319 6	0.038	
		维护成本	0.558 4	0.066	
			投资回报	0.122 0	0.014

买成本、花果期、株高、叶绿素 a, 聚集度、投资回报、类胡萝卜素 3 个指标权重最小。因此, 在对植物评价过程中, TN、TP、氨氮这 3 个方面对植物筛选影响较大, 而 COD_{Cr}、维护成本、生物量、叶绿素 b、分株数、购买成本、花果期、株高、叶绿素 a 的影响力相对较小, 剩余 3 个评价因子的影响度最低。

3 人工湿地植物筛选试验设计

3.1 试验装置

本试验共构建了 24 个小型人工湿地植物筛选装置, 装置如图 2 所示, 上口口径尺寸为 20 cm × 20 cm, 下口径尺寸为 11 cm × 11 cm, 高度为 35 cm。装置底部采用 10~20 mm 砾石作为支撑介质, 深度为 3 cm, 介质上层为 25 cm 不同填料, 填料上预设 5 cm 淹没深度, 在距箱底 3 cm 处设置出水口以收集水样。

3.2 试验设计

本试验中所用填料为混合建筑再生骨料、红砖、

砾石。其中混合建筑再生骨料由建筑场地的建筑垃圾经过破碎、筛分等工艺简单加工而成, 由沥青混凝土、红砖组成(两者的质量比例超过 90%), 含少部分碎玻璃、瓷砖等其他杂质。

选取大小均匀、生长较健壮的植株分别种植在装有混合建筑再生骨料、红砖、砾石的不同塑料桶中, 每种填料设置 8 个塑料桶, 分别种植风车草、美人蕉、芦苇、菖蒲、香蒲、再力花、鸢尾、空白(无植物), 共 24 个。进水浓度按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准配制, 采用一次性进水方式, 每次进水 3 L, 排水时直接由阀门放空。水力停留时间设置为 3 d, 共运行 45 d(表 11)。

4 评价结果与分析

根据表 2 对植物进行打分, 每个指标分为 5 个等级: 0~0.2、0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0, 每个等级 1 分。叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝

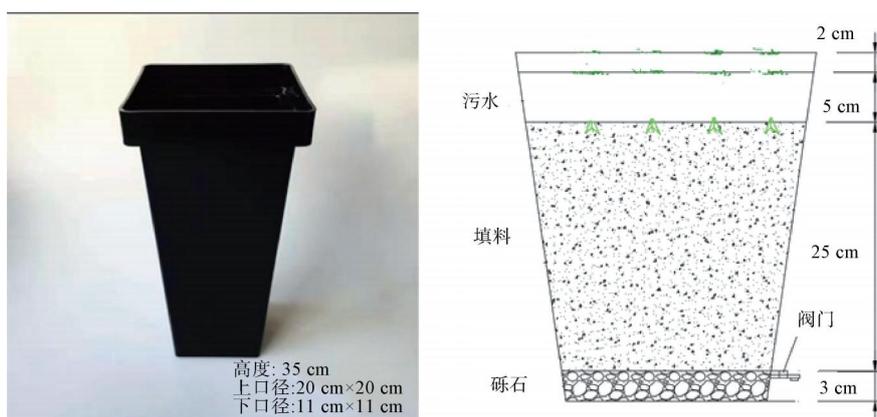


图2 试验装置图

Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Setup

表 11 人工湿地植物筛选试验设计

Tab. 11 Experimental Design for Screening Constructed Wetlands

试验序号	C/N	水力停留时间/d	填料	检测指标
1	1.25	3	混合建筑再生骨料	水质指标+植物
2	1.25	3	红砖	生长特性指标
3	1.25	3	砾石	

卜素是以冬季下降百分比作为评价指标,故下降越多,分值越低,其余指标均为数据越高,分值越高,鸢尾后期死亡没有生理特性分值以 0 计算。7 种植物详细得分如表 12 所示。每种植物的最后得分由评分乘以权重获得。

由表 12 可知,植物株高中评分最高的是香蒲,程宪伟等^[16]在研究芦苇、香蒲、美人蕉等 6 种植物对盐分胁迫的生理生态响应试验中发现,香蒲株高

表 12 植物评价因子得分

Tab. 12 Scores of Plant Evaluation Factor

评价指标	风车草	美人蕉	芦苇	菖蒲	香蒲	再力花	鸢尾
株高	1	1	3	1	5	2	1
分株数	5	1	2	1	1	1	1
生物量	5	2	1	1	2	2	1
花果期	1	5	1	3	1	3	1
聚集度	3	5	1	5	5	3	5
叶绿素 a	2	4	3	1	5	1	0
叶绿素 b	1	2	5	2	3	1	0
类胡萝卜素	3	3	5	5	4	1	0
COD _{Cr}	2	1	2	1	4	1	5
氨氮	5	4	2	1	4	1	5
TN	5	3	4	4	5	5	1
TP	5	3	4	2	4	1	4
购买成本	1	1	5	5	5	1	1
维护成本	5	3	1	3	5	5	3
投资回报	1	5	5	1	1	5	1

增长量最大;风车草的植物分株数得分最高,赖闻玲等^[17]在研究风车草、芦苇等 4 种湿地植物在人工湿

地的生长特性时也发现风车草分株数最多;植物花果期中评分最高的是美人蕉,美人蕉、菖蒲、香蒲、鸢

尾的聚集度得分最高,叶绿素 a 得分最高的是菖蒲,叶绿素 b 得分最高的是芦苇,类胡萝卜素中芦苇和菖蒲得分最高, COD_{Cr} 中鸢尾得分最高,氨氮中风车草和鸢尾得分最高, TN 中风车草、香蒲和再力花得分最高, TP 中风车草、芦苇、香蒲和鸢尾得分较高,风车草、香蒲、再力花的维护成本得分最高,芦苇的购买成本和投资回报均最高而鸢尾、风车草均最低。

如表 13 所示,生长特性中风车草得分最高(0.585),鸢尾得分最低(0.229);生理特性中芦苇得分最高(0.410),鸢尾得分最低,后期死亡没有使

用,故得分为 0;净化效果中风车草得分最高(2.858),菖蒲和再力花得分最低,得分为 1.361,李慧敏等^[13]采用 AHP 对菖蒲、美人蕉、风车草、水葱进行评价筛选,4 种植物净化效果依次为风车草、美人蕉、水葱、菖蒲;经济成本中香蒲得分最高(0.534),鸢尾得分最低(0.250)。根据评价结果,7 种植物的综合排序依次为风车草、香蒲、芦苇、美人蕉、鸢尾、菖蒲、再力花。为充分发挥植物在湿地中的作用,可选取综合排序前 3 的植物用于影响因素的研究。

表 13 评价因子综合得分

Tab. 13 Comprehensive Scores of Evaluation Factors

植物	生长特性	生理特性	净化效果	经济成本	总分	排名
风车草	0.585	0.146	2.858	0.382	3.971	1
美人蕉	0.414	0.259	1.871	0.306	2.850	4
芦苇	0.274	0.410	1.974	0.326	2.984	3
香蒲	0.410	0.191	2.639	0.534	3.774	2
菖蒲	0.293	0.353	1.361	0.402	2.409	6
再力花	0.353	0.094	1.361	0.438	2.246	7
鸢尾	0.229	0	2.130	0.250	2.609	5

5 结论

本研究以混合建筑再生骨料、红砖和砾石为填料,菖蒲、香蒲、鸢尾、芦苇、美人蕉、再力花、风车草为供试植物,利用 AHP,构建了基于植物的生长特性、生理特性、水质净化效果和经济成本的人工湿地植物评价体系。

(1) 4 个准则层权重得分依次为净化效果(0.614 4)、生长特性(0.172 7)、经济成本(0.118 7)、生理指标(0.094 2)。

(2) 7 种植物的水质净化效果(得分)依次为风车草(2.858)>香蒲(2.639)>鸢尾(2.130)>芦苇(1.974)>美人蕉(1.871)>再力花(1.361)=菖蒲(1.361)。

(3) 采用 AHP 对植物的生长生理特性、水质净化效果和经济成本进行评价,7 种植物的综合排序(得分)为风车草(3.971)>香蒲(3.774)>芦苇(2.984)>美人蕉(2.850)>鸢尾(2.609)、菖蒲(2.409)>再力花(2.246)。

参考文献

- [1] 刘斯平,陶少丹. 植物在人工湿地净化污水中的作用及其影响因素[J]. 吉林农业, 2018(16): 36-36.
LIU S P, TAO S D. The role of plants in sewage purification in

constructed wetlands and its influencing factors [J]. Jilin Agriculture, 2018(16): 36-36.

- [2] 刘文杰,许兴原,何欢,等. 4 种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6313-6319.

LIU W J, XU X Y, HE H, et al. Comparison of treatment performances of simulated urban sewage in constructed wetlands planted with four types of wetland plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6313-6319.

- [3] 梁锦堃. 水解酸化-人工湿地无动力污水处理工程技术在郁南农村生活污水治理的推广应用[J]. 广东化工, 2018, 45(12): 206-209.

LIANG J K. Application of hydrolysis acidification artificial wetland non power sewage treatment technology in rural domestic sewage treatment in Yunan[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(12): 206-209.

- [4] 翟旭,吴树彪,侯保朝,等. 人工湿地植物净化效果研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(31): 15368-15370.

ZHAI X, WU S B, HOU B C, et al. Study on purification effect by plants in constructed wetland [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(31): 15368-15370.

- [5] REDDY K R, DE BUSK W F. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes [J]. Journal of Environmental Quality, 1985, 14(4): 459-462.

(下转第 201 页)

- a northern city[J]. *Construction Science and Technology*, 2023 (10): 32-36.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021 年城乡建设统计年鉴[EB/OL]. (2022-10-12) [2023-07-25]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical yearbook of urban-rural development in 2021 [EB/OL]. (2022-10-12) [2023-07-25]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [4] 张善文. MATLAB 在时间序列分析中的应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
- ZHANG S W. Application of MATLAB in time sequence analysis [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2007.

(上接第 84 页)

- [6] 陈永华, 吴晓芙, 蒋丽鹏, 等. 处理生活污水湿地植物的筛选与净化潜力评价[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(8): 1549-1554.
- CHEN Y H, WU X F, JIANG L J, et al. Screening and evaluation of plant purification potential for phytoremediation of sanitary sewage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8): 1549-1554.
- [7] 刘超, 杨永哲, 宛娜. 建筑废料粉煤灰砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究[J]. *水处理技术*, 2013, 39(8): 30-33.
- LIU C, YANG Y Z, WAN N. Study on phosphorus removal capability of constructed wetlands filled with fly ash blocks[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(8): 30-33.
- [8] WANG Z, LIU C X, LI P Y, et al. Study on phosphorus removal capability of constructed wetlands filled with broken bricks[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12): 4373-4379.
- [9] 王振, 刘超翔, 董健, 等. 人工湿地中除磷填料的筛选及其除磷能力[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(2): 227-233.
- WANG Z, LIU C X, DONG J, et al. Screening of phosphate-removing filter media for use in constructed wetlands and their phosphorus removal capacities [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2): 227-233.
- [10] WANG Z, DONG J, LIU L, et al. Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 57-65. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.01.017.
- [11] 田伟, 赵俊, 田进, 等. 以建筑废弃物为填料的人工湿地对污染物去除性能研究[J]. *科技展望*, 2016, 26(5): 23-23.
- TIAN W, ZHAO J, TIAN J, et al. Study on pollutant removal performance of constructed wetland with construction waste as filler[J]. *Science and Technology Prospects*, 2016, 26(5): 23-23.
- [12] SAATY T L, VARGAS L G. Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012: 1-3.
- [13] 李慧敏, 丰远平, 黄德英, 等. 基于层次分析法和群决策的湿地植物评价筛选[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(11): 232-236.
- LI H M, FENG Y P, HUANG D Y, et al. Evaluation and selection of wetland plants based on analytic hierarchy method and group decision[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 42(11): 232-236.
- [14] 蒋子银. 城市公园生态景观美满意度评价研究——以西安市为例[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- JIANG Z Y. Beauty evaluation and research of ecological landscape in Xi'an City parks[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [15] 程骅. 海绵城市理论下陆生草本植物在景观设计中的配置研究——以南京仙林大道绿地规划设计为例[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- CHENG H. Sponge terrestrial herbaceous plants configuration in the landscape design under the theory of sponge city—Taking Nanjing Xianlin avenue planning and design for example [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [16] 程宪伟, 梁银秀, 祝惠, 等. 六种植物对盐胁迫的响应及脱盐潜力水培实验研究[J]. *湿地科学*, 2017, 15(4): 635-640.
- CHENG X W, LIANG Y X, ZHU H, et al. A hydroponic experimental on response of six plant species to salt stress and their desalination potentiality[J]. *Wetland Science*, 2017, 15(4): 635-640.
- [17] 赖闻玲, 王玉彬, 彭长连, 等. 四种湿地植物在人工湿地的生长特性研究[J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(3): 238-244.
- LAI W L, WANG Y B, PENG C L, et al. Growth characteristics of four species in surface-flow constructed wetlands[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2010, 18(3): 238-244.