

工业废水处理方案的绿色度模糊综合评价模型及应用

陈世金^{1*}, 刘圣东¹, 孙理密², 朱丽^{3#}

¹中交第三航务工程局有限公司, 上海

²山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南

³山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2023年2月27日; 录用日期: 2023年3月27日; 发布日期: 2023年4月4日

摘要

为适应工业废水处理绿色、低碳和循环的发展趋势, 本文从工艺绿色先进水平、资源能源节约水平、环境影响水平和处理效果四个方面, 构建了工业废水处理方案的绿色度评价指标体系和包括四个等级的模糊综合评价模型, 提出了定量和定性指标的赋值和隶属度确定方法, 采用层次分析法确定指标权重, 利用权重作用明显、综合程度强的模糊算子进行合成运算。利用水质、水量和工艺相近的三个印染废水方案进行了应用研究, 结果表明, 三个方案的绿色度评价值分别为0.782、0.763和0.720, 均属于中等, 反映了该评价方法具有一定的可操作性、科学性和适用性, 能够体现出各方案绿色度的差异化程度, 并为企业提升改造废水处理的方案选用提供了依据。

关键词

工业废水, 处理方案, 绿色度, 模糊综合评价

Fuzzy Comprehensive Evaluation Model and Application of the Green Degree of Industrial Wastewater Treatment Scheme

Shijin Chen^{1*}, Shengdong Liu¹, Limi Sun², Li Zhu^{3#}

¹CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai

²School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

³School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

Received: Feb. 27th, 2023; accepted: Mar. 27th, 2023; published: Apr. 4th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈世金, 刘圣东, 孙理密, 朱丽. 工业废水处理方案的绿色度模糊综合评价模型及应用[J]. 水污染及处理, 2023, 11(2): 23-30. DOI: 10.12677/wpt.2023.112004

Abstract

In order to adapt to the development trend of green, low carbon and circulation of industrial wastewater treatment, an evaluation index system of the green degree of industrial wastewater treatment scheme and a fuzzy comprehensive evaluation model including four levels have been constructed considering the green and advanced level of process, resource and energy conservation level, environmental impact level and treatment effect in this paper. The model proposes the method of assignment and membership degree determination of the indicators. The hierarchical analysis method is used to determine the index weight and the fuzzy arithmetic reflecting obvious weight effect and strong synthesis degree is used. Using three printing and dyeing wastewater schemes with similar water quality, water quantity and process, the results showed that the green evaluation values of the three schemes were 0.782, 0.763 and 0.720, respectively, all at the medium level. Case application reflects that the evaluation method has certain operability, scientificity and applicability, which can reflect the green differentiation degree of each scheme, and provides a basis for enterprises to improve the selection of the transformation of the wastewater treatment scheme.

Keywords

Industrial Wastewater, Treatment Scheme, Green Degree, Fuzzy Comprehensive Evaluation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

工业废水种类多,水质差异大,处理工艺偏重考虑适应性、处理效果和成本,常忽略处理工程的二次污染、绿色低碳水平等问题。随着国家大力推动实施“绿色、低碳、循环”的发展战略,工业废水处理领域的绿色低碳化是必然的发展趋势。因备选的废水处理工艺不是唯一,且多个单元处理工艺还存在优化组合问题,因此,建立一套易于操作的、科学的废水处理方案的绿色低碳水平评价方法十分必要。废水处理涉及工艺设备、资源能源、管理维护、处理效果等多个要素和环节,各种因素与处理效果之间的关系较难量化且具有不确定性,难以用简单的量化关系进行度量,而模糊综合评价模型可以对不易量化的因素进行量化评价,可有效解决这一问题[1]。本文从废水处理方案的绿色度内涵界定入手,识别方案绿色度的主要影响因素,构建基于模糊综合评价模型的评价方法,并利用三个具体方案进行实证研究,为废水处理方案的升级优化提供依据,为绿色度评价提供工具方法,同时可促进工业废水处理领域的绿色、低碳、循环发展。

2. 工业废水处理方案绿色度的内涵及评价意义

目前,“绿色度”的概念已经应用于很多领域,如建筑的绿色度[2] [3]、施工的绿色度[4]、建筑材料或产品的绿色度[5] [6] [7] [8]等,关于这一概念没有统一的表述,但基本内涵均为环境友好性程度,绿色度越高,说明某物质、活动或服务等对生态环境的负面影响越小。本研究提出的工业废水处理方案的绿色度,通过废水处理的工艺设备、环境影响、资源能源利用等方面的环境友好水平进行表征,表征体系具有层次性和多参数特点。

工业废水处理工艺通常具有较多的处理单元，一般包括一级处理、二级处理以及深度处理，方案整体的绿色度不能依据某个处理单元或某个设备的环境友好程度进行评价，而要涵盖全部流程，用多个影响方案绿色度的代表性指标构建综合评价模型，才能比较客观地反映一个废水处理方案的绿色度。工业废水处理属于典型的点源治理模式，随着环保标准的加严，大量企业的废水处理工艺及设施需要升级改造，如何科学、合理地选用处理工艺、制定优化的升级方案至关重要。而研究建立工业废水处理方案绿色度模糊综合评价模型，不仅可为工业废水处理方案进行全面量化评价提供方法，评价结果还可以对比不同处理方案的绿色度差异，为废水工艺方案的优化与决策提供依据和指导。

3. 建立模糊综合评价模型

工业废水处理方案的绿色度评价首先应建立评价指标体系，然后构建模糊综合评价模型，即通过构造等级评语集和因素评价矩阵，把与评价目标相关的指标因素进行定量化，选择合适的模糊算子进行合成运算得到评价价值，最后根据最大隶属度原则确定评价等级。本研究建立的是二级模糊综合评价模型，具体步骤如下。

3.1. 构建评价指标体系

工业废水处理方案绿色度评价是一个多层次、多因素的综合评估问题，评价指标的选取遵循科学性、适用性、可操作性、定性指标与定量指标结合的原则，具体指标体系由一级指标和二级指标构成，其中一级指标包括 5 个即工艺清洁与智能化水平 A_1 、资源能源节约水平 A_2 、环境影响水平 A_3 、施工、处理效果 A_4 ，每一个一级指标由数个二级指标来表征，共设置 16 个，具体见图 1。



Figure 1. Evaluation index system of green degree of industrial wastewater treatment scheme

图 1. 工业废水处理方案绿色度评价指标体系

3.2. 建立评语集

划分评价指标的评分等级并确定评语集。工业废水处理方案绿色度的评语等级分为高、中等、一般、

低四个等级[9] [10], 评语等级与综合评价值的对应见表 1。

Table 1. Evaluation range and its value

表 1. 评语等级及评价值

绿色度等级	高	中等	一般	低
综合评价值	[1~0.8]	(0.8~0.6]	(0.6~0.4]	(0.4~0]

3.3. 指标赋值方法

1) 定量指标

指标 $B_8 \sim B_{16}$ 均为定量指标, 根据企业提供的数据进行直接或通过计算得到。 B_8 赋值方法为: 将污水处理过程中的二次污染划分为水污染、大气(含恶臭)污染、固体废物污染, 若方案对二次污染没有妥善合理的控制措施, 则视为存在二次污染问题。三类污染比例各占三分之一, 总和为 100%, 如只有水的二次污染, 则赋值 33.3%; B_9 统计方法为低噪声设备数量与所有产生噪声设备总数量的比值, 低噪声设备的界定依据为《工业企业噪声卫生标准》中的规定“工业企业的生产车间和作业场所的噪声允许值为 85 dB (A)”; B_{10} 统计方法为节能设备数量与设备总数量的比值, 节能设备包括安装有节能控制装置或节能控制系统的设备或列入已发布的节能设备目录的设备; B_{11} 为直接排放和间接排放的 CO_2 与污水厌氧反应排放的 CH_4 的总和, 以 CO_2 -eq/t 污水表示。

2) 定性指标

包括工艺清洁水平、工艺组合优化水平和系统运维智能化运维水平, 其赋值方法采用专家打分法: 将调查问卷发放给 11 位行业专家, 进行等级评判; 清洁生产水平按国际先进、国内先进和国内一般进行评价; 工艺组合优化水平和智能化运维水平均按水平高、一般和差三个等级进行评价。将评为某一等级的专家人数占比最大值确定为该指标值即隶属度, 如对于 F1 的工艺组合优化水平, 11 为专家中评价结果为高、一般和差三个等级的人数分别为 7 个、4 个和 0 个, 则 F1 的工艺组合优化水平赋值为 64%。

3.4. 评价指标权重的确定

各指标对于评价目标的影响程度通常由指标权重来反映, 选择合理的权重确定方法至关重要。考虑该指标体系包括定性和定量指标, 本研究选用主客观相结合的层次分析法(AHP)来确定指标权重, 其确定过程包括建立权重判断矩阵、权重的计算及一致性判断, 具体计算布置参考文献[8]。

经计算并经过一致性检验合格, 一级指标 $A_1 \sim A_4$ 的权重分别为 0.24、0.29、0.21、0.26; 各二级指标的层次单排序权重见表 2。

3.5. 建立指标隶属度函数及确定隶属度

3.5.1. 定性指标的隶属度

工艺清洁水平、工艺组合优化水平和智能化运维水平指标的隶属度为指标值归一化处理后的结果。

3.5.2. 定量指标的隶属度函数

1) 效益型指标

考虑工业废水处理要求及平均处理程度, 确定这些指标的约束条件为 $30\% \leq X \leq 100\%$, 采用线性隶属度函数[11], 即

$$u(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.3) \\ \frac{x-0.3}{1-0.3} & (0.3 < x \leq 1) \end{cases} \quad (1)$$

对于节能设备占比、低噪声设备占比,采用下列公式[11]计算其隶属度:

$$u(x) = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \quad (2)$$

2) 成本型指标

二次污染率、处理吨水新鲜水耗、处理吨水电耗、处理吨水药剂消耗、吨水处理 CO₂ 排放量属于越小越优型即成本型指标,采用下列公式[11]计算其隶属度:

$$u(x) = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (3)$$

3.6. 建立单因素模糊评价矩阵 R

根据上述方法确定各二级指标的隶属度后,构建4个子系统 $B_1 \sim B_4$ 的评价矩阵,记为 R_{Bi} ($i=1,2,\dots,5$),隶属度值记为 r_{ij} 。

$$R_{Bi} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

3.7. 模糊合成运算

3.7.1. 第一级模糊合成运算

当已知权重集 W 和构造出单因素(B层指标)评判矩阵 R_{Bi} 后,就可以运用模糊算子进行合成运算。模糊运算公式为 $A = W \bullet R$, 其中“ \bullet ”为算子,这里采用权重作用明显以及综合程度强的算子 $M(\bullet, \oplus)$ 进行模糊合成运算。计算公式[12]为:

$$A = W \bullet R = (w_1, w_2, \dots, w_m) \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (4)$$

其中, b_j ($j=1,2,\dots,n$) 是由 W 与 R 的第 j 列运算得到的,表示被评价对象从整体上看对某等级模糊子集的隶属程度。

3.7.2. 第二级模糊合成运算与综合评价

二级指标(B层指标)的模糊合成运算结果作为上一级指标(A层指标)的隶属度,重复一级模糊综合评价计算过程,得到各方案的最终评价价值。

综合评判准则采用最大隶属度原则,根据一级指标元素对应的评价等级,得出工业废水处理方案的绿色度等级。

4. 案例研究

4.1. 案例简介

现有位于绍兴、常州和杭州的三家印染企业,均以棉纺印染为主营业务,生产废水均混合收集,废水处理规模分别为 4500 m³/d、5000 m³/d 和 3500 m³/d,均采用混凝沉淀→厌氧→好氧为主的处理工艺,其废水处理方案分别记为 F1、F2 和 F3。

4.2. 指标赋值及隶属度计算

对方案 F1、F2 和 F3 的二级评价指标按上述方法进行赋值,并依据上述隶属度计算方法(公式(1)、(2)、(3)), 计算各二级指标的隶属度, 见表 2。

Table 2. Index weight, value result and membership degree

表 2. 指标权重、赋值结果及隶属度

一级指标	权重	二级指标	权重	指标赋值			指标隶属度		
				F1	F2	F3	F1	F2	F3
A ₁	0.24	B ₁	0.41	0.91	0.73	0.82	0.37	0.30	0.33
		B ₂	0.35	0.73	0.82	0.73	0.32	0.36	0.32
		B ₃	0.24	0.64	0.73	0.73	0.30	0.35	0.35
A ₂	0.29	B ₄	0.24	5.6	5.2	5.9	0.93	1.000	0.88
		B ₅	0.33	1.46	1.65	1.59	1.00	0.91	0.92
		B ₆	0.14	2.2	2.5	2.8	1.00	0.88	0.79
		B ₇	0.15	18.2	16.3	17.5	0.90	1.00	0.93
A ₃	0.21	B ₈	0.35	33.3	33.3	66.7	1.00	1.00	0.50
		B ₉	0.20	70	58	65	1.00	0.83	0.93
		B ₁₀	0.28	52	46	55	0.95	0.84	1.00
		B ₁₁	0.17	35.7	36.2	38.5	0.93	0.94	1.00
A ₄	0.26	B ₁₂	0.20	1.57	1.65	1.61	0.95	1.00	0.98
		B ₁₃	0.20	90.2	92.5	86.6	0.98	1.00	0.94
		B ₁₄	0.20	85.2	83.7	80.8	1.00	0.98	0.95
		B ₁₅	0.20	86.7	85.5	79.4	1.00	0.99	0.92
		B ₁₆	0.20	97.2	93.1	95.3	1.00	0.96	0.98

4.3. 模糊运算

1) 首先确定二级指标(B 层)的模糊评价矩阵 $R_{B1} \sim R_{B5}$ 。

$$R_{B1} = \begin{bmatrix} 0.37 & 0.30 & 0.33 \\ 0.32 & 0.36 & 0.32 \\ 0.30 & 0.35 & 0.35 \end{bmatrix}, R_{B2} = \begin{bmatrix} 0.93 & 1.00 & 0.88 \\ 1.00 & 0.91 & 0.92 \\ 1.00 & 0.88 & 0.79 \\ 0.90 & 1.00 & 0.93 \end{bmatrix}$$

$$R_{B3} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 0.50 \\ 1.00 & 0.83 & 0.93 \\ 0.95 & 0.84 & 1.00 \\ 0.93 & 0.94 & 1.00 \end{bmatrix}, R_{B4} = \begin{bmatrix} 0.95 & 1.00 & 0.98 \\ 0.98 & 1.00 & 0.94 \\ 1.00 & 0.98 & 0.95 \\ 1.00 & 0.99 & 0.92 \\ 1.00 & 0.96 & 0.98 \end{bmatrix}$$

2) 进行二级指标模糊运算

按照 2.1 节中的方法进行二级指标的模糊运算, 结果为:

$$B_1 = (0.41, 0.35, 0.24) \cdot \begin{bmatrix} 0.37 & 0.30 & 0.33 \\ 0.32 & 0.36 & 0.32 \\ 0.30 & 0.35 & 0.35 \end{bmatrix} = (0.337, 0.331, 0.332)$$

$$B_2 = (0.24, 0.33, 0.14, 0.15) \cdot \begin{bmatrix} 0.93 & 1.00 & 0.88 \\ 1.00 & 0.91 & 0.92 \\ 1.00 & 0.88 & 0.79 \\ 0.90 & 1.00 & 0.93 \end{bmatrix} = (0.828, 0.814, 0.765)$$

$$B_3 = (0.35, 0.20, 0.28, 0.17) \cdot \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 0.50 \\ 1.00 & 0.83 & 0.93 \\ 0.95 & 0.84 & 1.00 \\ 0.93 & 0.94 & 1.00 \end{bmatrix} = (0.974, 0.911, 0.811)$$

$$B_4 = (0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20) \cdot \begin{bmatrix} 0.95 & 1.00 & 0.98 \\ 0.98 & 1.00 & 0.94 \\ 1.00 & 0.98 & 0.95 \\ 1.00 & 0.99 & 0.92 \\ 1.00 & 0.96 & 0.98 \end{bmatrix} = (0.986, 0.986, 0.954)$$

3) 进行一级指标的模糊运算

根据二级指标模糊运算结果，进行一级指标的模糊运算，得到三个方案总的模糊综合评价值：

$$A = (0.24, 0.29, 0.21, 0.26) \cdot \begin{bmatrix} 0.337 & 0.331 & 0.332 \\ 0.828 & 0.814 & 0.765 \\ 0.974 & 0.911 & 0.811 \\ 0.986 & 0.986 & 0.954 \end{bmatrix} = (0.782, 0.763, 0.720)$$

4.4. 评价结果与分析

根据上述模糊综合评判结果，方案 F1、F2 和 F3 的模糊综合评价值分别为 0.782、0.763 和 0.720。对照表 1，可以看出，方案 F1、F2 和 F3 的绿色度均属于中等，相对优劣看方案 F1 的绿色度最高，方案 F3 的绿色度最低，评价结果表明，三个方案从绿色度方面均有较大提升潜力，亦为企业废水处理的提升改造方案选用提供了依据。若升级改造，应从工艺绿色先进水平、资源能源节约水平、环境影响水平、处理效果等四个方面优化提高处理方案的绿色度。

5. 结语

本文首次将模糊综合评价方法应用于工业废水处理方案绿色度评价中，并在建立的评价指标体系中考虑了智能化水平、工艺清洁化水平及低碳效应指标，是相对于现有绿色工艺评价等研究的一个改进，研究成果能在一定程度上引导污水处理领域的工艺设计者及建设单位，从绿色低碳角度选择废水处理方案以及优化已有污水处理方案具有较好的实用价值。案例研究表明：用模糊综合评价模型能够对工业废水处理方案做出较为客观的绿色度评价，评价结果能反映工艺方案的细微差异，评价方法具有可操作性、科学性和适用性，能够从设计源头促进工业废水处理的绿色、低碳、循环发展，为实现双碳目标做出贡献。

基金项目

中交第三航务工程局有限公司产学研项目《空间受限条件下工业废水综合治理回用工程关键技术研

究与应用》, LX-2021-5。

参考文献

- [1] 赵春容, 赵万民. 模糊综合评价法在城市生态安全评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 179-183.
- [2] 潘和平, 王翔宇. 基于绿色度的绿色建筑关键主体博弈研究[J]. 安徽理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(1): 12-18.
- [3] 陶妍艳, 徐刚, 陈雁, 等. 建筑绿色度评价与预测优化[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(1): 120-126.
- [4] 王乾坤, 年春光, 邓勤犁. 基于云物元理论的装配式建筑施工绿色度评价方法研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(11): 84-90.
- [5] 鲍学英, 李雨浓. 艰险山区铁路机制砂混凝土绿色度评价研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(9): 81-86+105.
- [6] 张凯峰, 尚建丽, 吴雄. 建筑材料绿色度评价方法的研究进展[J]. 材料导报, 2012, 26(20): 354-356.
- [7] 罗福周, 王文心. 考虑产品绿色度的闭环供应链政府补贴策略研究[J]. 工业工程, 2020, 23(6): 18-27.
- [8] 吴俐滢, 杨涛远, 翁顺, 等. 基于综合层次分析法的赣江特大桥安全评估[J]. 土木工程与管理学报, 2009, 39(2): 133-140.
- [9] 洪锋, 王东, 万云华. 基于模糊综合评判的桩基础绿色施工指标体系研究[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2009, 34(4): 47-52.
- [10] 邓利辉. 基于层次分析法和模糊综合评判的绿色施工评价体系研究[J]. 建筑技术开发, 2009, 36(10): 52-55.
- [11] 冯峰, 许士国. 灌区水资源综合效益的改进多级模糊优选评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 56-62.
- [12] 郭卫, 张弘. 模糊综合评判法在绿色工艺方案决策中的应用研究[J]. 制造业自动化, 2002, 24(6): 40-43.