

活性污泥厌氧发酵产酸外源添加剂 评价研究

程尚^{1,2}, 陈红跃^{1,2}, 李莎³, 李勇⁴, 钱庆渝³, 潘伟亮^{2,3*}

(1.重庆市畜牧技术推广总站, 重庆 401120; 2.重庆市生猪产业技术体系创新团队, 重庆 401120; 3.重庆交通大学环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074; 4.重庆川卓环境科技有限公司, 重庆 400021)

摘要:厌氧发酵可将废水中的有机物转化为挥发性脂肪酸(VFAs),其可作为生物燃料或用于化学合成。为了提高厌氧发酵的效率和产挥发性脂肪酸的量,通常会向发酵系统中投加外源添加剂。研究旨在建立一个有效的模型来评价外源添加剂的效果,以优化厌氧发酵过程。基于外源添加剂的单价、投加量、产酸量等指标,收集了实际投加外源添加剂的相关数据;通过层次分析法(AHP)和CRITIC权重法,计算了各评价指标的综合权重;最后,通过综合权重公式,得到了该模型的评价结果。

关键词:厌氧发酵;挥发性脂肪酸;层次分析法;CRITIC权重法;模型评价

中图分类号:TQ9;X52

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S1-0267-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S1.044

Study on evaluation of the exogenous additive for the production of VFAs by anaerobic fermentation of activated sludges

CHENG Shang^{1,2}, CHEN Hong-yue^{1,2}, LI Sha³, LI Yong⁴, QIAN Qing-yu³, PAN Wei-liang^{2,3*}

(1.Chongqing Animal Husbandry Technology Extension Station, Chongqing 401120, China; 2.Chongqing Swine Industry Technology System Innovation Groups, Chongqing 401120, China; 3.Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing Municipal, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4.Chongqing Chuazhuo Environmental Technology Co., Ltd., Chongqing 400021, China)

Abstract: Anaerobic fermentation is an important biotechnology that can convert organic matter in wastewater into volatile fatty acids (VFAs), which can be used as biofuels or for chemical synthesis. To improve the efficiency of anaerobic fermentation and the yield of volatile fatty acids, exogenous additives are usually dosed into the fermentation system. This study aims to establish an effective model to evaluate the effect of exogenous additives and optimize the anaerobic fermentation process. Based on indicators such as unit price, dosage, and acid production of exogenous additives, relevant data from actual additive application were collected; the comprehensive weights of each evaluation indicator were calculated using the analytic hierarchy process (AHP) and the CRITIC weighting method; finally, the evaluation results of the model were obtained through the comprehensive weight formula.

Key words: anaerobic fermentation; volatile fatty acids; analytic hierarchy process; criteria importance through intercriteria correlation weighting method; model evaluation

面对全球水资源短缺和能源需求不断增长的严峻挑战,可持续的废水处理技术变得尤为重要^[1-3]。这种技术不仅能够保护环境,还能有效回收资源^[4]。与传统方法相比,厌氧发酵具有操作简便、二次污染小、投资成本低等优点^[5],并且作为一种温和且可持续的方法,能够将有机废物转化为具有高价值的挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acids, VFAs),从而成为从污泥中回收有机资源的重要途径,也为生物燃料的生产和化学合成提供了原料^[6-8]。

VFAs作为一种性能良好的发酵产物,因较佳的可生化性,在农业、食品加工业以及化妆品行业作为农药、食品添加剂、个人护理产品而得到了广泛应用^[9]。为了进一步提升厌氧发酵的效率和VFAs的产量,研究人员通常会向发酵系统中添加外源添加剂。这些添加剂包括微生物代谢物、表面活性剂、酶、金属离子和有机物等^[10]。选择合适的外源添加剂对优化厌氧发酵过程至关重要,因此,建立一个有效的评价模型来评估外源添加剂的效果显得

收稿日期:2025-12-24;修回日期:2026-03-31

基金项目:重庆市现代农业产业技术体系(CQMAITS202312);重庆市研究生联合培养基地(JDLHPYJD2024004);企业委托项目(CSEC2023-R006003);重庆交通大学研究生科研创新项目(2024S0066)

作者简介:程尚(1981-),男,硕士,副研究员,研究方向为有机固废资源化利用技术推广,chengshang3@126.com;潘伟亮(1985-),博士,教授,博士生导师,研究方向污水处理理论与技术,通讯联系人,pan0316@126.com。

尤为关键。

当前,确定权重系数的方法主要分为主观赋权法和客观赋权法^[11]。主观赋权法,如层次分析法^[12] (Analytic Hierarchy Process, AHP)、G1 法和德尔菲法等^[13],特别强调决策者的主观意见,具有操作简便、灵活的特点,能够将复杂系统通过定性和定量相结合的方式进行层次化和条理化处理^[14]。客观赋权法则包括熵权法、变异系数法和 CRITIC 法 (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC) 等^[13],其中 CRITIC 法基于指标间的相关性来确定权重,能够充分考虑数据间的对比强度和冲突性^[15]。

本研究采用 AHP-CRITIC 复合加权法,结合实

际数据,旨在建立一个综合评价模型,以确定活性污泥厌氧发酵产 VFAs 的最佳外源添加剂。通过评价模型,综合考量了外源添加剂的单价、投加量和产酸量等关键因素,为厌氧发酵过程中外源添加剂的选择提供科学依据,进而推动废水资源的高效回收。

1 材料与方法

1.1 AHP 法计算权重

将决策的目标、考虑的因素(决策准则)和决策对象根据其相互关系分为最高层、中间层和最底层,结合多种影响因素和研究目的等,绘制出模型评价的层次结构图,如图 1 所示。

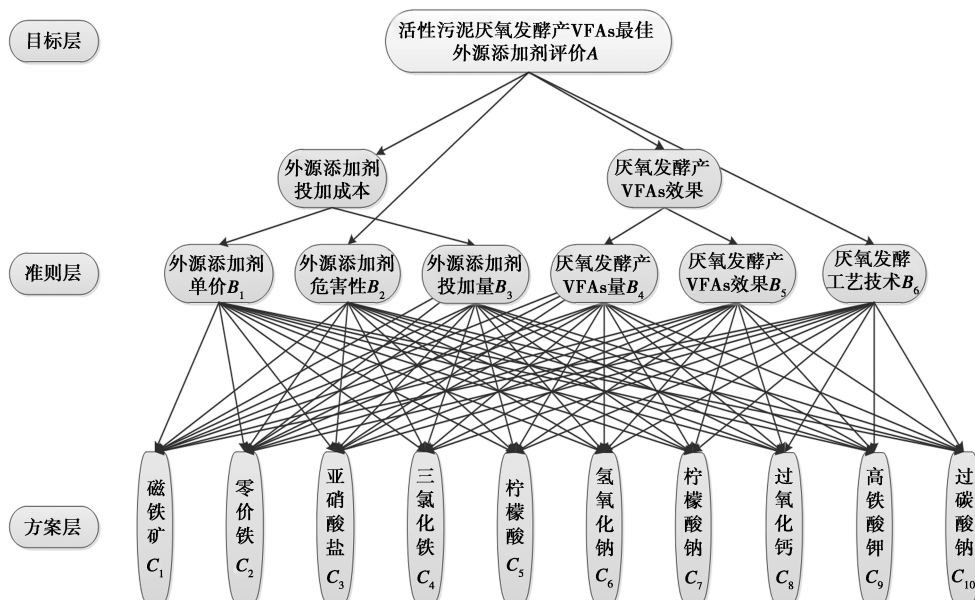


图 1 评价层次结构示意图

通过 AHP 层次分析法确定主观权重,依次对评价体系中的准则层和指标层进行赋值,采用 1~9 标度法^[16]建立判断矩阵,对权重分配进行一致性检验^[17-18]。运用 AHP 法确定主观权重的基本步骤如下:

(1) 首先将决策问题分解为若干组成因素,按照控制层级关系分为目标层、准则层和方案层等。

(2) 采用专家打分法构造判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$, 进而计算权重向量。

(3) 依据指标相对权重进行一致性检验,利用算术平均法、几何平均法和特征值法计算每个指标的权重。

为确保指标权重的合理性,通过公式(1)~(2)分别计算一般一致性指标 CI 值、随机一致性比率 CR 值,并进行一致性检验。当 $CI=0$,则表明矩阵具

有完全一致性,不存在逻辑矛盾,反之 CI 值越大,则表示矩阵中的不一致性程度加剧。当 $CR < 0.1$ 时,表明判断矩阵 A 满足一致性原则,此时可用 A 的特征向量进行权重计算;若 $CR \geq 0.1$,则判断矩阵 A 不满足一致性原则,需要重新进行调整,其中 RI 是判断矩阵的平均随机一致性指标。

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

$$CR = CI / RI \quad (2)$$

(4) 权重确定。通过一致性检验后,对指标权重进行归一化处理得到各评价指标的主观权重值 α_j 。

1.2 CRITIC 法计算权重

CRITIC 法是一种多属性决策分析中的客观赋权方法,与只考虑数据分散程度的熵权法不同,CRITIC 法在权重的确定中还考虑了评价指标间的

相关性;运用 CRITIC 法确定客观权重的基本步骤如下:

计算信息度衡量指标 C_i 如式(3)所示。

$$C_i = \delta_i \sum_{j=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad (3)$$

式中, C_i 为第 i 项指标的信息含量(信息度); δ_i 为第 i 项指标的标准差; ρ_{ij} 为第 i 与第 j 项指标的皮尔逊相关系数, 范围为 $-1 \sim 1$; n 为评价指标总个数;

$\sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij})$ 为指标间冲突程度总和。

C_i 的值越大, 表示该评价指标越重要, 应该给其分配更多的权重, 从而进一步得到客观权重值 β_i , 如式(4)所示。

$$\beta_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

1.3 AHP-CRITIC 法计算权重

为了使得最后的评价结果更加具有可靠性, 需要通过确定主客观综合权重的方法, 反映出主客观的综合情况。计算主客观综合权重的方法采用 AHP-CRITIC 复合权重计算方法, 确定出综合权重 W_j , 见计算公式如式(5)所示。

$$W_j = \alpha_j \beta_j / \sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j \quad (5)$$

式中, W_j 为第 j 项指标的 CRITIC 权重, 范围为 $0 \sim 1$;

$\sum_{j=1}^n \alpha_j \beta_j$ 为所有指标信息度之和。

1.4 数据来源

为了对剩余污泥厌氧发酵产 VFAs 投加外源添加剂进行评价, 针对本研究构建的评价指标体系, 通过查阅不同文献, 得到该评价模型准则层外源添加剂单价 B_1 、外源添加剂危害性 B_2 、外源添加剂投加量 B_3 、厌氧发酵产 VFAs 量 B_4 、厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5 、厌氧发酵工艺技术 B_6 的具体情况 & 数据, 此后将数据带入模型计算, 得到权重得分, 最终得分最高的指标即为最佳外源添加剂。

其中外源添加剂的投加成本从外源添加剂单价和外源添加剂投加量这两个方面来考虑。获取外源

添加剂的购买价格, 筛选出不同规格的外源添加剂的最低购买价格, 随后通过文献查阅与比较得出厌氧发酵时外源添加剂的最佳投加量, 结果如表 1 所示; 由表可知, 所有外源添加剂中高铁酸钾的成本最高, 可达 24 000 元/t; 而磁铁矿的成本最低, 仅 350 元/t。

表 1 外源添加剂的基本情况

外源添加剂	外源添加剂规格/%	外源添加剂成本/剂成本/(元·t ⁻¹)	外源添加剂最佳投加量
磁铁矿 C_1	85	350	0.6 g/g 挥发性悬浮固体(VSS)
零价铁 C_2	95	2580	10 g/L
亚硝酸盐 C_3	98	2800	200 mg/L
三氯化铁 C_4	98	2100	0.235 g/g 总悬浮固体(TSS)
柠檬酸 C_5	65	2600	0.08 g/g TSS
氢氧化钠 C_6	98	3000	0.9 g/g VSS
柠檬酸钠 C_7	99	4500	0.3 g/g TSS
过氧化钙 C_8	75	6000	0.2 g/g TSS
高铁酸钾 C_9	90	24000	0.2 g/g VSS
过碳酸钠 C_{10}	99	4600	0.2 g/g VSS

此外活性污泥厌氧发酵的产 VFAs 的效果从厌氧发酵产 VFAs 量及厌氧发酵产 VFAs 效率这两个方面来考虑。而厌氧发酵产 VFAs 效率可通过厌氧发酵最佳产酸量的速度表达, 其中柠檬酸钠的时间最短为 3 d^[19]; 零价铁、过碳酸钠、柠檬酸为 4 d^[20]; 三氯化铁、亚硝酸盐、高铁酸钾为 6 d^[21-23]; 过氧化钙和氢氧化钠为 7 d^[24-26]; 而磁铁矿的时间最长高达 9 d^[27-28]。

2 结果与分析

2.1 AHP 法计算主观权重系数结果

2.1.1 准则层权重计算

准则层被划分为 6 个关键指标, 通过构建两两比较的标度赋值矩阵, 利用 AHP 法对判断矩阵进行权重计算, 并对权重分配的一致性进行检验, 其结果显示(表 2), 一般一致性指标 CI 值为 0.019 0, 随机

表 2 准则层标度赋值

	外源添加剂单价 B_1	外源添加剂危害性 B_2	外源添加剂投加量 B_3	厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	厌氧发酵工艺技术 B_6
外源添加剂单价 B_1	1	1/2	1	1/3	1/3	2
外源添加剂危害性 B_2	2	1	2	1/2	1/2	3
外源添加剂投加量 B_3	1	1/2	1	1/3	1/3	2
厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	3	2	3	1	1	3
厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	3	2	3	1	1	3
厌氧发酵工艺技术 B_6	1/2	1/3	1/2	1/3	1/3	1

一致性比率 CR 值为 0.015 072,均小于 0.1,由此可见判断矩阵的一致性是可以接受的。

随后利用 Matlab 软件分别采用算术平均法、几何平均法和特征值法计算每个指标的权重,将这 3 种方法得到的权重值取平均,得到每个指标的最终权重,计算结果如表 3 所示,准则层的权重得分为: $B_5 = B_4 > B_2 > B_1 = B_3 > B_6$,这表明在评价活性污泥厌氧发酵产 VFAs 最佳外源添加剂时,产酸效率和产酸量是重要的考量因素。

表 3 基于 AHP 活性污泥厌氧发酵产 VFAs 外源添加剂准则层权重

指标	算术平均法	几何平均法	特征值法	指标权重
外源添加剂单价 B_1	0.1005	0.1000	0.0997	0.1001
外源添加剂危害性 B_2	0.1731	0.1732	0.1730	0.1731
外源添加剂投加量 B_3	0.1005	0.1000	0.0997	0.1001
厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	0.2788	0.2804	0.2800	0.2797
厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	0.2788	0.2804	0.2800	0.2797
厌氧发酵工艺技术 B_6	0.0683	0.0661	0.0675	0.0673

2.1.2 方案层权重计算

方案层的权重计算是针对准则层下的各个外源添加剂进行的,具体来说,准则层对应的下属方案层共包含 10 个方案,分别对应 10 种不同的外源添加剂。

表 4 列出了基于 AHP 法得到的方案层各指标的权重。通过权重,可以进一步分析和比较不同外源添加剂在活性污泥厌氧发酵产 VFAs 过程中的表现和效果。

表 4 AHP 活性污泥厌氧发酵产 VFAs 外源添加剂方案层权重

指标	外源添加剂单价 B_1	外源添加剂危害性 B_2	外源添加剂投加量 B_3	厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	厌氧发酵工艺醇技术 B_6
磁铁矿 C_1	0.2977	0.1509	0.0310	0.0843	0.0300	0.0876
零价铁 C_2	0.1646	0.2151	0.1956	0.0451	0.1394	0.0653
亚硝酸盐 C_3	0.0881	0.0362	0.2520	0.1395	0.0792	0.0510
三氯化铁 C_4	0.1760	0.0652	0.0552	0.0189	0.0981	0.1688
柠檬酸 C_5	0.0960	0.0885	0.1371	0.0243	0.1394	0.0986
氢氧化钠 C_6	0.0786	0.0438	0.0195	0.2009	0.0484	0.0283
柠檬酸钠 C_7	0.0540	0.0558	0.0395	0.2878	0.2120	0.0994
过氧化钙 C_8	0.0259	0.0175	0.0900	0.0606	0.0447	0.1532
高铁酸钾 C_9	0.0134	0.2362	0.0900	0.1019	0.0743	0.0448
过碳酸钠 C_{10}	0.0327	0.0908	0.0900	0.0366	0.1344	0.2031

2.1.3 AHP 层次分析法综合权重计算

综上所述,AHP 法用来计算评价体系中各个指标的权重值,如表 5 所示。在准则层中,厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5 和厌氧发酵产 VFAs 量 B_4 的权重最大,而厌氧发酵工艺技术 B_6 的权重最小;在方案层中,柠檬酸钠 C_7 的综合权重最大,而三氯化铁 C_4 的综合权重最小,这表明在评价活性污泥厌氧发酵产 VFAs 最佳外源添加剂时,产酸效率和产酸量是最重要的评价指标。综合权重的计算结果为进一步的评价分析提供了科学依据,有助于确定最佳的外源添加剂。

表 5 基于 AHP 活性污泥厌氧发酵产 VFAs 外源添加剂方案层权重

目标层	准则层	权重	方案层	综合权重
活性污泥厌氧发酵产 VFAs 最佳外源添加剂 A	外源添加剂单价 B_1	0.1001	磁铁矿 C_1	0.0991
	外源添加剂危害性 B_2	0.1731	零价铁 C_2	0.1293
	外源添加剂投加量 B_3	0.1001	亚硝酸盐 C_3	0.1049
			三氯化铁 C_4	0.0687
	厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	0.2797	柠檬酸 C_5	0.0911
			氢氧化钠 C_6	0.0898
	厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	0.2797	柠檬酸钠 C_7	0.1655
			过氧化钙 C_8	0.0777
	厌氧发酵工艺技术 B_6	0.0673	高铁酸钾 C_9	0.1035
			过碳酸钠 C_{10}	0.0895

2.2 CRITIC 确定客观权重

根据实际数据与分析出的理论数据,得到的数据见表 6 所示。其中 B_1 、 B_3 、 B_5 为负向指标,即该指

表 6 CRITIC 法相关指标数据

指标	外源添加剂单价 B_1	外源添加剂危害性 B_2	外源添加剂投加量 B_3	厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	厌氧发酵工艺醇技术 B_6
磁铁矿 C_1	350	7.5	0.600	1037.96	9	4.5
零价铁 C_2	2580	8.5	0.010	638.85	4	3.5
亚硝酸盐 C_3	2800	2.0	0.002	1398.32	6	2.5
三氯化铁 C_4	2100	3.5	0.235	161.29	6	8.0
柠檬酸 C_5	2600	4.5	0.080	241.54	4	5.0
氢氧化钠 C_6	3000	2.5	1.000	1558.27	7	1.5
柠檬酸钠 C_7	4500	3.0	0.300	3624.69	3	4.5
过氧化钙 C_8	6000	1.0	0.200	978.88	7	7.5
高铁酸钾 C_9	24000	9.0	0.200	1267.48	6	2.0
过碳酸钠 C_{10}	4600	4.5	0.200	612.54	4	9.0

标数据值越小越精确;而 B_2 、 B_4 、 B_6 为正向指标,即该指标的数据值越大越精确,从而最终计算结果越准确。

CRITIC 法计算结果如表 7 所示,结果显示综合权重最大的为柠檬酸钠 C_7 ,氢氧化钠 C_6 的综合权重最小。在添加柠檬酸钠条件下厌氧发酵的产酸量较其他外源添加剂相比,产酸量较多,且产酸效率也最好;然而氢氧化钠本身存在危害性以及厌氧发酵工艺技术较差从而导致其综合权重最小。

表 7 CRITIC 法权重计算结果

目标层	准则层	权重	方案层	综合权重
活性污泥厌氧发酵产 VFAs 最佳外源添加剂 A	外源添加剂单价 B_1	0.1802	磁铁矿 C_1	0.5010
	外源添加剂危害性 B_2	0.1969	零价铁 C_2	0.6643
			亚硝酸盐 C_3	0.4820
	外源添加剂投加量 B_3	0.1416	三氯化铁 C_4	0.5032
			柠檬酸 C_5	0.5657
	厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	0.1929	氢氧化钠 C_6	0.3174
			柠檬酸钠 C_7	0.6822
	厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	0.1279	过氧化钙 C_8	0.4673
			高铁酸钾 C_9	0.4467
	厌氧发酵工艺技术 B_6	0.1606	过碳酸钠 C_{10}	0.6397

2.3 AHP-CRITIC 复合加权法确定综合权重

基于上述 AHP 法和 CRITIC 法的计算结果,得出污泥厌氧发酵产酸最佳外源添加剂评价体系中准则层的综合权重及最终评价指标的综合评分,结果见表 8 和表 9 所示。

表 8 准则层综合权重

指标	AHP 法	CRITIC 法	$A * B$	AHP-CRITIC 法
外源添加剂单价 B_1	0.1001	0.1802	0.0180	0.1078
外源添加剂危害性 B_2	0.1731	0.1969	0.0341	0.2043
外源添加剂投加量 B_3	0.1001	0.1416	0.0142	0.0851
厌氧发酵产 VFAs 量 B_4	0.2797	0.1929	0.0540	0.3235
厌氧发酵产 VFAs 效率 B_5	0.2797	0.1279	0.0358	0.2145
厌氧发酵工艺技术 B_6	0.0673	0.1606	0.0108	0.0647

表 9 污泥厌氧发酵产酸外源添加剂的综合评分

指标	AHP 法	CRITIC 法	$A * B$	AHP-CRITIC 法
磁铁矿 C_1	0.0991	0.5010	0.0496	0.0896
零价铁 C_2	0.1293	0.6643	0.0859	0.1552

亚硝酸盐 C_3	0.1049	0.4820	0.0506	0.0914
三氯化铁 C_4	0.0687	0.5032	0.0346	0.0625
柠檬酸 C_5	0.0911	0.5657	0.0515	0.0931
氢氧化钠 C_6	0.0898	0.3174	0.0285	0.0515
柠檬酸钠 C_7	0.1655	0.6822	0.1129	0.2040
过氧化钙 C_8	0.0777	0.4673	0.0363	0.0656
高铁酸钾 C_9	0.1035	0.4467	0.0462	0.0835
过碳酸钠 C_{10}	0.0895	0.6397	0.0573	0.1035

根据表 8 中准则层的综合权重的计算结果可知,准则层的权重值大小排序为: $B_4 > B_5 > B_2 > B_1 > B_3 > B_6$ 。其中 B_4 、 B_5 、 B_2 这 3 个影响因素的综合权重均大于 0.2,且 B_4 的综合权重大于 0.3,较大程度的超过另外 2 个影响因素,其权重之和超过 0.5,远超另外 3 个影响因素的值,即“厌氧发酵产 VFAs 量”、“厌氧发酵产 VFAs 效率”属于准则层中最为重要的影响因素,特别是“厌氧发酵产 VFAs 效率”,会较大的影响活性污泥厌氧发酵最佳外源添加剂的评价结果。

由表 9 可将各指标的权重值大小排序: $C_7 > C_2 > C_{10} > C_3 > C_5 > C_1 > C_9 > C_8 > C_4 > C_6$ 。该评价体系共 10 种外源添加剂,其中柠檬酸钠的综合评分最大,其次是零价铁和过碳酸钠;由此可知,最终评价结果为柠檬酸钠,并且是评分唯一超过 0.2 的外源添加剂,远高于其他外源添加剂权重。

3 结论

通过构建模型评价体系,从而得到活性污泥发酵产 VFAs 最佳外源添加剂,结果显示影响评价体系因素有 6 种,其中主要影响因素为厌氧发酵产 VFAs 产量、厌氧发酵产 VFAs 效率,综合权重远超其他影响因素。经过 AHP 主观评价法进行计算,结果表明柠檬酸钠的主观权重最大,而三氯化铁的主观权重最小;CRITIC 客观评价结果表明,柠檬酸钠的客观权重最大,而氢氧化钠的客观权重最小。综合运用 AHP-CRITIC 复合加权法,得到活性污泥厌氧发酵最佳外源添加剂为柠檬酸钠。

参考文献

- [1] Ungureanu N, Vldu V, Voicu G. Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation [J]. Sustainability, 2020, 12(21): 1-18.
- [2] Guven H, Ersahin M E, Ozgun H, et al. Energy and material refineries of future: Wastewater treatment plants [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329(3): 117130.

- [3] Rijsberman F R. Water scarcity: Fact or fiction? [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(1/3): 5-22.
- [4] 任建军, 毛洪刚, 朱李霞, 等. 红霉素菌渣厌氧消化产气潜能及动力学特性[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(9): 199-208.
- [5] 全翠, 陈常祥, 高宁博, 等. 表面活性剂及聚乳酸塑料对餐厨垃圾发酵产酸特性影响[J]. *化工进展*, 2024, 43(10): 5791-5804.
- [6] Tian L, Guo H, Wang Y, *et al.* Unveiling the mechanism of urine source separation-derived pretreatment on enhancing short-chain fatty acid yields from anaerobic fermentation of waste activated sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(22): 16178-16188.
- [7] Paulinetti A P, Augusto I M G, Batista L P P, *et al.* Anaerobic digestion as a core process for sustainable energy production in the soybean biorefinery: A techno-economic assessment[J]. *Sustainable Horizons*, 2022, 3(9): 100024.
- [8] 代康康, 杨元珠, 胡长玲, 等. 化学法强化污泥厌氧发酵产酸及其作为碳源应用研究现状[J]. *现代化工*, 2025, 45(6): 64-68, 74.
- [9] 肖向哲, 陈思远, 滕俊, 等. 厌氧水解的新解读: 快速水解和慢速水解[J]. *化工进展*, 2021, 40(3): 1586-1593.
- [10] 孙鸿, 罗进财, 王欣芸, 等. 外源添加剂强化剩余污泥厌氧发酵产酸的影响研究[J]. *水处理技术*, 2024, 50(3): 7-12.
- [11] 陈述, 王辉, 张泰赫, 等. 基于云模型的引调水工程突发水污染事件风险评价——以引江济淮工程(河南段)为例[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(10): 48-55.
- [12] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1): 83-98.
- [13] 吕锐颖, 赵丹霞, 史健, 等. 基于 AHP-CRITIC 法的食品安全评价性抽检分配模型研究[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(10): 1432-1439.
- [14] 陈润琪, 马晓茜, 余昭胜, 等. 耦合 AHP-模糊综合评价的垃圾焚烧炉吹灰策略研究[J]. *应用化工*, 2022, 51(1): 286-289, 296.
- [15] 王永洁, 孙铭忆, 邓莉莉, 等. 基于 AHP-CRITIC 的 D-最优混料设计优化复方黄芪乳膏处方[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2020, 26(3): 110-116.
- [16] 朱倩, 周红宇, 张敏祥. 基于改进熵权-云模型的果园运输小车适应性评价研究[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(36): 15420-15426.
- [17] 张丽维, 侯恩科, 段中会, 等. 基于 AHP 熵权 TOPSIS 模型的矿石充填方案评价和优选研究[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(5): 120-126.
- [18] Saaty T L. Modeling unstructured decision problems—the theory of analytical hierarchies[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 1978, 20(3): 147-158.
- [19] Ding W, Fang Q, Zhou W, *et al.* Performance and mechanism of sodium citrate pretreatment to promote waste activated sludge disintegration and short-chain fatty acid production during anaerobic fermentation[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(1): 109161.
- [20] Ding W, Fan X, Zhou X, *et al.* Performance and mechanisms of zero valent iron enhancing short-chain fatty acids production during thermophilic anaerobic fermentation of waste activated sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912(2): 169025.
- [21] Wang Y, Sun P, Guo H, *et al.* Performance and mechanism of sodium percarbonate (SPC) enhancing short-chain fatty acids production from anaerobic waste activated sludge fermentation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 313(1): 115025.
- [22] Zhang X, Huang X, Li X, *et al.* Performance and mechanisms of citric acid improving biotransformation of waste activated sludge into short-chain fatty acids[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 373(4): 128754.
- [23] Zhan W, Li L, Tian Y, *et al.* Insight into the roles of ferric chloride on short-chain fatty acids production in anaerobic fermentation of waste activated sludge: Performance and mechanism[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 420(9): 129809.
- [24] Lu Y, Xu Y, Chen S, *et al.* Effect of nitrite addition on the two-phase anaerobic digestion of waste activated sludge: Optimization of the acidogenic phase and influence mechanisms[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261(6): 114085.
- [25] Qiao Z, Xu S, Zhang W, *et al.* Potassium ferrate pretreatment promotes short chain fatty acids yield and antibiotics reduction in acidogenic fermentation of sewage sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, (10): 41-52.
- [26] Wang Y, Yin J, Li X, *et al.* Effects of calcium peroxide pretreatment on the substrate, microenvironment, and microbial community in an anaerobic digestion system of waste sludge[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 59(3): 104985.
- [27] Wu Y, Yue X, Zhou A, *et al.* Simultaneous recovery of short-chain fatty acids and phosphorus during lipid-rich anaerobic fermentation with sodium hydroxide conditioning[J]. *Chemosphere*, 2023, 312(1): 137227.
- [28] Jiang B, Lu D, Shen X, *et al.* Magnetite enhancing sludge anaerobic fermentation to improve wastewater biological nitrogen removal: Pilot-scale verification[J]. *Chemosphere*, 2023, 336(9): 139197. ■