

薛念涛, 张国臣, 王莹, 等. 属性综合评价法评估黄姜皂素废水处理工艺[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(2): 163-166. Xue Niantao, Zhang Guochen, Wang Ying, et al. Comprehensive attribute evaluation on the treatment process of wastewater from production of *Dioscorea zingiberensis* C.H. wright[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(2): 163-166.

属性综合评价法评估黄姜皂素废水处理工艺

薛念涛¹, 张国臣², 王莹¹, 曹明利^{1,3}, 孟尧¹, 王凯军¹

(1.清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084;

2.北京国环清华环境工程设计研究院有限公司, 北京 100084; 3.合肥工业大学, 安徽 合肥 230009)

摘要 运用属性综合评价法, 评估了 5 项黄姜皂素废水处理工艺。通过确定评价指标的属性级别, 建立分级标准矩阵, 计算得到评价技术属性测度和各项工艺的分值。中和/沉淀-兼有脱硫功能的两相厌氧-固定化微生物-曝气生物滤池(GBAF)工艺得分最高; 石灰中和-二级 UASB-二级接触氧化工艺次之; 内电解-三段式两相厌氧-生物接触氧化-催化氧化脱色处理工艺排第三; 电化学-UASB-接触氧化-生物过滤工艺与 EGSB-A/O-生物接触氧化工艺得分较低, 但这 2 种工艺基本能满足达标排放要求。评价结果为环保行政管理部门进行环境管理、相关企业选择适用工艺提供科学依据。

关键词 黄姜皂素; 废水处理; 属性综合评价法

中图分类号: X703 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2014.02.032 文章编号: 1003-6504(2014)02-0163-04

Comprehensive Attribute Evaluation on the Treatment Process of Wastewater from Production of *Dioscorea zingiberensis* C.H. Wright

XUE Niantao¹, ZHANG Guochen², WANG Ying, CAO Mingli^{1,3}, MENG Yao¹, WANG Kaijun¹

(1.State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.Beijing Guohuan Tsinghua Environment Engineering Design & Research Institute Co. Ltd, Beijing 100084, China; 3.Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Five treatment processes of wastewater from production of *Dioscorea zingiberensis* C.H. Wright were assessed using comprehensive attribute evaluation. By determining the attribute level of evaluation index, grading criteria matrix was established, and scores of the process and measures of the technical attributes were calculated. Neutralization/precipitation-two phase anaerobic-immobilized microorganisms-biological aerated filter with desulfurization function (GBAF) process got the highest score, followed by lime neutralization-two UASB-two contact oxidation process. Internal electrolysis-three section two phase anaerobic-biological contact oxidation-catalytic oxidative decolorization process ranked the third, and electrochemical-UASB-contact oxidation-biological filtration process and EGSB-A/O-biological contact oxidation process got lower scores. However, both the processes could basically meet the discharge standards. The evaluation results would provide a scientific basis for environmental management of environmental administrative departments and choice of applicable process for related companies.

Key words: *Dioscorea zingiberensis* C.H. Wright; wastewater treatment; comprehensive attribute evaluation

黄姜皂素是合成甾体激素和甾体避孕药的重要前体^[1], 可合成三大类甾体激素药物 400 个产品, 有“激素之母”和“药用黄金”之美誉, 世界上只有我国和墨西哥等少数几个国家拥有这一重要资源。

但黄姜皂素生产过程中产生大量难以处理的酸性废水, 具有以下特点: 可生化性差, BOD₅ 8 000 mg/L, BOD₅/COD ≈ 0.27, 糖份含量高, 综合废水总糖含量约 2%, 其中大部分为单糖; 污染负荷高, COD 20 000~

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://jks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkyjs@126.com

收稿日期 2013-03-06; 修回 2013-07-08

基金项目 环保公益性行业科研专项 黄姜皂素行业污染防治技术评估及最佳工艺确定研究(200909030)

作者简介 薛念涛(1969-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事污水、固体废物、恶臭气体治理研究 (电话) 010-82150886 (电子信箱) xueniantao@163.com。

40 000 mg/L ,酸度高 ,pH 值 0.5~2.5 ,盐度高 ,在 pH 为 1.0 的废水中 SO_4^{2-} 约 11 300 mg/L ,色素浓 ,富含大量的变性色素 ,胶质重 ,头道废液中胶体约为 8% ,处理过程中泡沫极大 ,非常难消除^[2]。

黄姜皂素产业的废水排放已严重威胁着调水工程水源地水质^[3]。目前 ,全国皂素生产企业超过 200 家 ,主要集中在汉江流域的陕西省和湖北省 ,80% 以上位于十堰市丹江口水库上游的汇水盆地内 ,而这里正是国家实施南水北调中线工程的水源地^[4-5]。在该水源区高压环保态势下 ,企业为生存而投入资金进行污染治理(主要为废水处理)^[6] ,但由于缺乏处理工艺的评估、鉴定结果 ,造成工艺选择困难。

环境技术评估是实施环境技术管理的重要手段 ,客观、科学、公正、透明的评价制度可用于评估各类环境技术在预防、检测、控制和减少环境污染等方面的能力和效果 ,最终为潜在技术购买者进行选择 and 决策时提供可靠的信息^[7]。对黄姜皂素污水处理工艺进行评估 ,有利于该行业的健康可持续发展 ,有利于环保部门的环境监管 ,有利于发展当地经济、提高农民收入 ,对南水北调中线水源区的污染防治具有重要意义。

1 待评估工艺

根据文献及现场调研 ,确定待评估工艺见表 1。

表 1 待评估工艺概况
Table 1 Overview of processes to be assessed

序号	名称	优点	缺点
工艺 1	中和/沉淀-兼有脱硫功能的两相厌氧-固定化微生物-曝气生物滤池 (GBAF) 工艺	污染物去除效果好 ;去除部分硫化物提高了废水中有机物去除率 ,固定化微生物-曝气生物滤池系统中形成了好氧-缺氧-厌氧环境 ,提高了脱氮效率。	工艺较复杂。
工艺 2	石灰中和-二级 UASB-二级接触氧化工艺	工艺流程相对简单 ,好氧段生物膜生长好 ,处理效果达到了设计要求。	厌氧池回流效果差 ,处理率偏低 ,产生恶臭气体。
工艺 3	电化学-UASB-接触氧化-生物过滤工艺	设水解酸化反应迅速 ,池容小 ,停留时间短 ,经 UASB 处理后 ,显著提高可生化性 ,生物膜提高处理效率。	如 pH 值过低会导致反应阳极的消耗增加 ,填料有时结垢。
工艺 4	EGSB-A/O-生物接触氧化工艺	反应器内部的液体上升流速高于 UASB ,强化了废水与微生物之间的接触 ,提高了处理效率 ,回收沼气作为能源 ;A/O 强化脱氮除磷。	如果硫酸盐去除效率较差 ,则影响到 EGSB 产甲烷菌。
工艺 5	内电解-三段式两相厌氧-生物接触氧化-催化氧化脱色处理工艺	内电解池可适度提高废水的 pH 值 ,降低废水的色度 ,整体设计和处理效果优良。	内电解池易板结 ,工艺较复杂。

2 工艺评估过程

2.1 工艺评估体系构建

选择污染物排放、经济成本、技术成熟度作为一级指标。通过污染物排放、技术成熟度 2 项指标体现出工艺选择的合理性 ,通过经济成本指标体现出工艺应用的经济性 ,通过污染物排放、经济成本 2 项指标对工艺进行定量评估 ,通过技术成熟度进行定性评估。确定一级指标后 ,细化各一级指标 ,建立相应二级、三级等指标 ,见图 1。技术成熟度主要从技术在实践中应用情况、自控运行状况、维护管理、操作难易程度等角度进行定性评估 ,不再构建二级、三级指标。

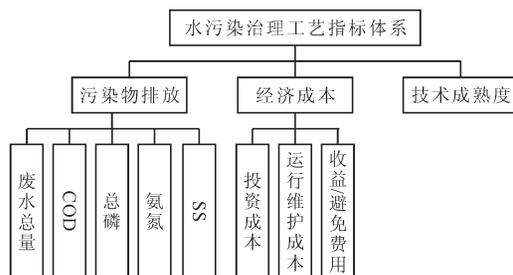


图 1 水污染物治理工艺评估指标体系
Fig. 1 Index evaluation system of water pollutant treatment process

2.2 指标赋权

采用专家赋权法为指标赋权 ,得到各指标权重如表 2 所示。

表 2 评价指标体系赋权
Table 2 Evaluation index system empowering

一级指标	一级权重	二级指标	二级权重	最终权重
污染物排放	0.50	废水总量(t/t 产品)	0.10	0.050
		COD(kg/t 产品)	0.50	0.250
		总磷(kg/t 产品)	0.15	0.075
		氨氮(kg/t 产品)	0.15	0.075
		SS(kg/t 产品)	0.10	0.050
经济成本	0.25	投资成本	0.50	0.125
		运行维护成本	0.50	0.125
技术成熟度	0.25			0.25

2.3 根据属性综合评价法评估各项工艺

属性综合评价根据评价对象和评价目的 ,从不同的侧面选取刻画系统某种特征的评价指标 ,建立指标体系 ,并通过一定的数学模型(或算法)将多个评价指标值合成一个整体性的综合评价值^[8]。多属性综合评价的过程实际上就是系统组成要素之间指标信息交换、流动和组合的过程 ,是一个集成了主客观信息的复杂过程^[9]。

根据评价指标体系汇集各项技术效能数据,见表3。

表 3 评价数据表
Table 3 Evaluation data

一级指标	二级指标	工艺1	工艺2	工艺3	工艺4	工艺5
污染物排放	废水总量(t/产品)	300	450	661	1625	420
	COD(kg/t 产品)	66	78.8	125	127	103
	总磷(kg/t 产品)	0.024	3.44	0.098	0.56	0.092
	氨氮(kg/t 产品)	3.43	5.79	8.99	4.26	1.72
	SS(kg/t 产品)	5.46	27.5	59.2	52.0	23.3
经济成本	投资成本(万元/t)	2.0	1.60	1.52	2.26	0.938
	运行维护成本(元/t)	10	9.13	24.8	10	18.2
技术成熟度		成熟	很成熟	成熟	成熟	成熟

依据二级指标,确定每一项待评价的技术对应该级指标中各项指标的属性级别。

通常,将评价级别分为 5 类(或级),A 代表“好”,B 代表“稍好”,C 代表“一般”,D 代表“稍差”,E 代表“差”。把上面的每一类(或级)都看成一个属性集。这些属性集是可比较的。可以认为,好的程度越高越好,或越高越“强”。因此,对这些属性集可建立“强”序。当属性集 O 比属性集 P“强”时,可记为 O>P。因而有{好}>{稍好}>{一般}>{稍差}>{差}。

综合客观数据和专家判断,建立分级标准矩阵,见

表 5 工艺 1 对应于评价等级的单指标、综合属性测度计算过程
Table 5 Process corresponding to the evaluation level of single indicators, calculated attribute measure

方法	单指标属性测度					指标权重	综合属性测度的计算				
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1 废水总量(t/产品)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
2 COD(kg/t 产品)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
3 总磷(kg/t 产品)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.075	0.075	0.00	0.00	0.00	0.00
4 氨氮(kg/t 产品)	0.00	0.00	0.78	0.22	0.00	0.075	0.00	0.00	0.059	0.016	0.00
5 SS(kg/t 产品)	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
6 投资成本(万元/t)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.125	0.00	0.00	0.00	0.125	0.00
7 运行维护成本(元/t)	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.125	0.00	0.125	0.00	0.00	0.00
8 技术成熟度	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00
9	综合属性测度值						0.425	0.375	0.059	0.141	0.00

注:为方便说明,对表中的行、列分别进行了编号,借用矩阵中元素的表示方法 a_{ij} 表示第*i*行,第*j*列的元素。如该表所示 $a_{11}=a_{12} \times a_{17}$ 。 $A_{93}=\sum a_{i3}, 1 \leq i \leq 5$ 。

由此,得到工艺 1 对应于评价等级的综合属性测度为(A 0.425 B 0.375 C 0.059 D 0.141 E 0.00),同理,可求得其他方法的综合属性测度。结果见表 6。

表 6 工艺 1~5 综合属性测度结果表
Table 6 Comprehensive attribute measure results of Process to

方法	对应于评价等级的综合属性测度				
	A	B	C	D	E
工艺 1	0.425	0.375	0.059	0.141	0.00
工艺 2	0.265	0.397	0.208	0.055	0.075
工艺 3	0.075	0.250	0.120	0.215	0.340
工艺 4	0.000	0.403	0.047	0.220	0.330
工艺 5	0.220	0.091	0.481	0.304	0.124

把污染程度分成 K 个等级 C_1, \dots, C_K , 它们满足 $C_1 > C_2 > \dots > C_K$, 样本 x_i 属于等级 C_k 的测度为 u_{ik} 。 依

表 4。

表 4 分级标准矩阵
Table 4 Grading criteria matrix

一级指标	二级指标	A	B	C	D	E
污染物排放	废水总量(t/产品)	300	400	500	600	700
	COD(kg/t 产品)	60	80	100	120	140
	总磷(kg/t 产品)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
	氨氮(kg/t 产品)	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0
	SS(kg/t 产品)	10	20	30	40	50
经济成本	投资成本(万元/t)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
	运行维护成本(元/t)	5.0	10	15	20	25
技术成熟度		1.0	0.8	0.6	0.4	0.2

注:其中 A 代表“好”,B 代表“稍好”,C 代表“一般”,D 代表“稍差”,E 代表“差”;对技术成熟度 A 代表“很成熟”,B 代表“成熟”,C 代表“较成熟”,D 代表“一般”,E 代表“不成熟”。

计算评价技术属性测度。以工艺 1 的单指标属性测度为例,根据实验数据、专家经验得出测度值。引入每项指标的权重,计算综合属性测度,采用加权法来获得,即:

$$\mu_{ik} = \mu(x_i \in C_k) = \sum_{j=1}^m w_j \mu(x_{ij} \in C_k), 1 \leq k \leq K$$

其中 w_j 为第 j 个指标的权系数。

工艺 1 对应于评价等级的单指标、综合属性测度计算过程如表 5 所示,其余技术的综合属性测度值以此类推。

$$q_i = \frac{100}{K} \sum_{k=1}^K (K+1-k) u_{ik} \text{ 为 } x_i \text{ 的分数。当 } 1 \leq k \leq K \text{ 时,对 } C_k \text{ 打 } \frac{100(K+1-k)}{K} \text{ 则对 } C_1 \text{ 打 } 100 \text{ 分,对 } C_k \text{ 打 } 100K \text{ 分。}$$

评价结果一般用百分制给出。如果评价级别划为 5 类,给最好的级别类 100 分,给最差的级别类 20 分。把综合属性测度作为权,对分数进行加权求和,就得到研究对象的分数。

根据该评分方法,工艺 1 得分为:

$$\frac{100(5+1-1)}{5} \times 0.425 + \frac{100(5+1-2)}{5} \times 0.375 + \frac{100(5+1-3)}{5} \times 0.059 + \frac{100(5+1-4)}{5} \times 0.141 = 81.7$$

同理,可得到其他方法的分数。综合评分结果见表 7。

表 7 属性综合评价综合评分结果
Table 7 Rating results of comprehensive attribute evaluation

工艺	分数
中和/沉淀-兼有脱硫功能的两相厌氧-固定化微生物-曝气生物滤池(GBAF)工艺	81.7
石灰中和-二级 UASB-二级接触氧化工艺	74.5
电化学-UASB-接触氧化-生物过滤工艺	50.1
EGSB-A/O-生物接触氧化工艺	50.4
内电解-三段式两相厌氧-生物接触氧化-催化氧化脱色处理工艺	70.8

从表 7 看出,中和/沉淀-兼有脱硫功能的两相厌氧-固定化微生物-曝气生物滤池(GBAF)工艺得分最高,为 81.7 分;石灰中和-二级 UASB-二级接触氧化工艺次之,为 74.5 分;内电解-三段式两相厌氧-生物接触氧化-催化氧化脱色处理工艺排第三,为 70.8 分;电化学-UASB-接触氧化-生物过滤工艺与 EGSB-A/O-生物接触氧化工艺得分较低,但这 2 种工艺均得到实际应用,基本能满足达标排放要求。本评价结果为环保行政管理部门进行环境管理、相关企业选择适用工艺提供科学依据。

由于黄姜皂素废水难以处理,因此处理工艺往往比较复杂,建议改进各工艺的缺点,进一步提高各单元处理效能,加强各单元的衔接,简化工艺流程,降低运行成本。

3 结论

属性综合评价法可用于环境技术评估,运用此方法评估黄姜皂素废水处理工艺,中和/沉淀-兼有脱硫功能的两相厌氧-固定化微生物-曝气生物滤池(GBAF)工艺得分最高,石灰中和-二级 UASB-二级接触氧化工艺次之,内电解-三段式两相厌氧-生物接触氧化-催化氧化脱色处理工艺排第三,电化学-UASB-接触氧化-生物过滤工艺与 EGSB-A/O-生物接触氧化工艺得分较低,但基本可满足达标排放要求。

[参考文献]

- [1] Dong Yuesheng, Teng Hu, Qi Shanshan, et al. Pathways and kinetics analysis of biotransformation of *Dioscorea zingiberensis* by *Aspergillus oryzae*[J]. Biochemical Engineering Journal, 2010, 52(2/3): 123-130.
- [2] 吕嘉栌, 谭新敏. 黄姜生产皂素废水综合利用研究进展[J]. 水处理技术, 2008, 34(1): 19-21.
Lv Jiali, Tan Xinmin. Progress in researches on comprehensive utilization of wastewater from diosgenin production[J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(1): 19-21.(in Chinese)
- [3] Li Hui, Ni Jinren. Treatment of wastewater from *Dioscorea zingiberensis* tubers used for producing steroid hormones in a microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(3): 2731-2735.
- [4] 李耀辰, 周旋, 刘超, 等. 黄姜皂素清洁生产工艺试验研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(1): 136-138.
Li Yaochen, Zhou Xuan, Liu Chao, et al. Clean production of diosgenin saponin[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(1): 136-138.(in Chinese)
- [5] 赵欣, 谢先军, 程胜红, 等. 南水北调水源区黄姜产业的污染治理技术与对策[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(4): 14-17.
Zhao Xin, Xie Xianjun, Chen Shenghong, et al. Technique and countermeasure of dealing with wastewater of *D. Zingiberensis* Wright industry in the source water area of south-water-to-north project[J]. Safety and Environmental Engineering, 2004, 11(4): 14-17.(in Chinese)
- [6] 向罗京, 沈晓鲤. 黄姜皂素行业清洁生产评价指标体系研究及应用案例[C]. 加快经济发展方式转变 环境挑战与机遇[A]. 2011 中国环境科学学会学术年会论文集, 2011: 2126-2129.
Xiang Luoqing, Shen Xiaoli. Research and Application Case of Clean Production Evaluation Index System of *Dioscorea Zingiberensis* CH Wright Industry[C]. Accelerate the Transformation of Economic Development Mode. Environmental Challenges and Opportunities[A]. Proceedings of 2011 Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences, 2011: 2126-2129.(in Chinese)
- [7] 汪翠萍, 贾晨夜, 王莹, 等. 我国环境技术评价制度解析及发展趋势分析[C]. 2012 中国环境科学学会学术年会论文集, 2012: 451-455.
Wang Cuiping, Jia Chenye, Wang Ying, et al. Analysis and Development Trend of China's Environmental Technology Evaluation System[C]. Proceedings of 2012 Annual Conference of Chinese Society for Environmental Science, 2012: 451-455.(in Chinese)
- [8] 李远远, 云俊. 多属性综合评价指标体系理论综述[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2009, 31(2): 305-309.
Li Yuanyuan, Yun Jun. Review on the theory of multi-attribute comprehensive evaluation index system[J]. Journal of Wuhan University of Technology Information & Management Engineering, 2009, 31(2): 305-309.(in Chinese)
- [9] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Guo Yajun. Comprehensive Evaluation Theory, Methods and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2007.(in Chinese)