

薛念涛 张国臣 陈坚 等. 层次分析-灰色关联分析法评价黄姜皂素生产工艺[J]. 环境科学研究 2014 27(1):99-105.

XUE Niantao ZHANG Guochen CHEN Jian *et al.* Evaluation on diosgenin production processes from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright using analytical hierarchy process-grey relational analysis[J]. Research of Environmental Sciences 2014 27(1):99-105.

层次分析-灰色关联分析法评价黄姜皂素生产工艺

薛念涛¹, 张国臣², 陈 坚¹, 纪玉琨³, 吕建波⁴, 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. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022

4. 中国科学院生态环境研究中心, 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 运用层次分析-灰色关联分析法评价了 6 种黄姜皂素生产工艺. 用层次分析法确定了 12 项指标(酸耗系数、水耗系数、能耗系数、单位产品废水 COD_{Cr} 产生量、废气产生量、固体废物产生量、污染物处理效果、环保成本(年环境代价/产品年产量)、环境系数(年环境代价/年产值)、成本投资、运行费用和资源综合利用收益)的权重, 其中水耗系数、废水 COD_{Cr} 产生量、酸耗系数的权重分别为 0.216、0.189、0.167, 排在前三位, 对评价结果影响较大. 通过专家打分、构造决策矩阵等步骤计算不同工艺指标列与最优指标集数据列的关联度, 得到 6 种生产工艺的综合排序. 微波破壁-甲醇提取法的关联度为 0.879, 为最优工艺; 直接分离法、直接分离-板框压滤法、糖化-膜分离回收-酸水解法的关联度分别为 0.874、0.803、0.701, 依次位列微波破壁-甲醇提取法之后. 直接酸水解法、自然发酵-酸水解法的关联度分别为 0.530、0.410, 排在最后, 建议淘汰. 评价结果可望为黄姜皂素行业的健康发展、水污染防治等方面提供一定依据.

关键词: 黄姜; 皂素; 层次分析法; 灰色关联分析法; 生产工艺

中图分类号: X798

文章编号: 1001-6929(2014)01-0099-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2014.01.15

Evaluation on Diosgenin Production Processes from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright Using Analytical Hierarchy Process-Grey Relational Analysis

XUE Nian-tao¹, ZHANG Guo-chen², CHEN Jian¹, JI Yu-kun³, LÜ Jian-bo⁴, WANG Kai-jun¹

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. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

4. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Diosgenin is an important precursor for production of steroidal drugs while *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright is the most popular raw material for diosgenin production. However, wastewater from diosgenin production using *D. zingiberensis* C. H. Wright is an acidic organic wastewater with high COD_{Cr} concentration and deep color. Cleaner production is an effective method to prevent and treat the wastewater. Six diosgenin production processes from *D. zingiberensis* C. H. Wright were evaluated using analytic hierarchy process (AHP)-gray relational analysis. Weights of 12 indicators (i. e., acid consumption coefficient, water consumption coefficient, energy consumption coefficient, wastewater production index per ton product, waste gas production index per ton product, solid waste production

index per ton product, pollutant treatment effect, environmental protection cost, environment efficiency, cost investment, operation cost, gains of comprehensive resource utilization) were determined according to AHP. Weights of water consumption coefficient, wastewater production indicators, and the acid consumption coefficient were 0.216, 0.189, and 0.167, respectively, as the top three indicators, which had a great

收稿日期: 2013-03-12 修订日期: 2013-10-14

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(200909030); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07504-004)

作者简介: 薛念涛(1969-), 男, 山东沂南人, 高级工程师, 博士, 从事废水、固废、生物脱臭研究, xueniantao@163.com.

* 责任作者 王凯军(1960-), 男, 山东莱州人, 教授, 博导, 主要从事污水与污泥处理技术、环境技术管理体系研究, wkj@tsinghua.edu.cn

impact on evaluation results. By steps of expert scoring and structure of decision matrix, associate degrees between process indicators column and data columns of optimal index set were calculated. Comprehensive ranking of the six production processes was obtained. Cell wall breakdown with microwave-methanol extraction, whose associate degree was 0.879, was optimal process. Direct separation method, direct separation-frame filter press, saccharification-membrane separation recovery, whose associate degree was 0.874, 0.803, 0.701, respectively, successively ranked after cell wall breakdown with microwave-methanol extraction. Direct acid hydrolysis and natural fermentation-acid hydrolysis, whose associate degree was 0.530, 0.410, respectively, ranked the last two and could be considered to eliminate. The explorative evaluation and the results were expected to provide a reference for the sound development of industry of diosgenin production from *D. zingiberensis* C. H. Wright and water pollution prevention, etc.

Key words: *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright; diosgenin; analytic hierarchy process; gray relational analysis; production process

薯蓣皂素(diosgenin, 薯蓣皂甙元, 下称皂素)是甾体类药物的前体化合物,在医药生产中具有十分重要的应用价值^[1-2]。它是淡黄色或白色结晶状粉末物质,化学名称为 Δ^5 -异螺旋甾烯- 3β -醇,分子式为 $C_{27}H_{42}O_3$ 。约有400多种药物,如类固醇皮质激素、性激素、孕激素等以皂素为原料或中间产物,通过衍生、合成而制得^[3-5]。全世界的皂素年需求量约为 $4 \times 10^3 \sim 6 \times 10^3$ t,但目前只有我国、墨西哥和印度等几个国家生产,其中,我国的年产量约 3×10^3 t。国外的皂素消费量自2006年起一直处于上涨态势,年增长率在6.0%~7.2%之间,预计未来几年仍保持稳定增长趋势。

我国含皂素的植物有17种,含量较高、具有工业开发价值的主要是黄姜、穿地龙和葫芦芭。黄姜生长周期相对较短,早已成为我国生产皂素最主要的药源植物。黄姜也是我国传统常用中药材^[6],俗称火头根,学名为盾叶薯蓣(*Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright),为薯蓣科薯蓣属多年生草质藤本植物^[7-8]。黄姜被誉为药用黄金,根茎含有1.0%~5.0%黄姜皂素^[9-10],居世界薯蓣属植物之冠,是一种经济效益高、开发潜力大的药用植物资源^[11]。

黄姜皂素生产行业的水污染十分严重^[7]。工业上主要用酸水解黄姜根茎来制取皂素^[12-13],生产1 t皂素产品,可排放500~700 t高酸性和高 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 废水^[14-15]。此外,还含有高浓度无机盐,使得废水处理难度大,运行费用高^[16]。鄂西北、陕南、豫西南的秦岭一大巴山一带地理环境和气候条件十分适宜黄姜生长,因此该地区人工种植的黄姜皂素含量明显高于国内其他地区,故全国85%的黄姜种植和皂素生产分布在这个地区,而该地区正位于我国重点保护的水资源——南水北调中线工程水源汉江上游,对南水北调中线水质造成了较大威胁^[17-19]。其中,仅位于汉江流域的汉中市就有38家皂素生产企业,每年排放废水将近 1×10^7 t,有些企业将废水直接排入汉江,

严重污染了汉江水质^[20]。受皂素需求增加的影响,该行业水污染防治局面严峻。

目前黄姜皂素生产工艺的资源 and 能源的利用率、适用范围和使用条件存在很大差异,我国尚无该类工艺的评价系统和技术指南,这给环境管理与企业污控技术选择带来了一定的困难。有鉴于此,该研究调研了8家秦岭一大巴山这一主要黄姜生产区域(位于湖北省、陕西省境内)、年生产能力在50~300 t的企业,并且现场对5家企业的生产工艺指标进行了测试,这些指标包括污染防治指标(水量、 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 、pH等)与生产指标(皂素含量、能耗等)。根据实测数据,对该行业的污染防治、生产技术水平进行了初步评价。

1 常用的黄姜皂素生产工艺

常用生产工艺有直接酸水解法、自然发酵-酸水解法、直接分离法、微波破壁-甲醇提取法、直接分离-板框压滤法、糖化-膜分离回收-酸水解法。

1.1 直接酸水解法

直接酸水解法应用较广泛,该工艺原理及特点:黄姜植物成分(淀粉、纤维)不分离,参加反应的物料体系粒径大,淀粉在酸水解过程对皂甙的“包裹”和“屏蔽”作用导致皂素水解不彻底,反应温度较高,水解条件要求强烈;皂素品质和产率较低。其污染状况为:黄姜中的纤维和淀粉均参与了酸水解过程,皂素的酸耗量(以硫酸计)约为8.6 t/t;废水末端 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷分别约为60和0.76 t/ $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 为 5×10^4 mg/L;生产1 t皂素产生废水 10^3 t, COD_{Cr} 总量为 5×10^4 kg,污染极其严重。

1.2 自然发酵-酸水解法

自然发酵-酸水解法应用较广泛,该工艺原理及特点:将黄姜粉碎后加水搅拌(水浸),经自然发酵(不接入菌种)后,用稀酸水解,然后将水解物过滤,废液分离后用碱中和处理,而滤出物经漂洗、粉碎、干燥后用有机溶剂提取。设备投入少、工艺技术含量低

但较成熟;运行成本方面也占有一定优势,如电耗较低。其污染状况:黄姜原料全部参与水解,薯蓣皂苷被严密的植物组织包裹,干扰了薯蓣皂甙的水解;C3位上结合的歧链糖基产生了位阻,使水解不完全;薯蓣皂甙在黄姜细胞中与细胞壁贴合较紧,对酸相对稳定,很难水解;废水 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}}) > 1 \times 10^4 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_3\text{-N}) > 100 \text{ mg/L}$ 。

1.3 直接分离法

直接分离法应用较广泛,该工艺原理及特点:黄姜中各成分相对独立,当黄姜粉碎到一定细度时,各成分单体解离,再利用各自的物理特性,就可以一一将其分离。其污染状况:只有占黄姜3%的皂甙及附着物参与酸水解,参加酸水解的物料从100%降至15%;生产1t皂素,将产生18t干纤维、15t淀粉,是传统工艺 COD_{Cr} 产生量的7.8%。

1.4 微波破壁-甲醇提取法

微波破壁-甲醇提取法已有应用实例,该工艺原理及特点:黄姜清洗后粉碎,颗粒粉碎至5~10mm,然后进行微波辐照,打开细胞壁,使有机溶剂易于进入,然后用极性较强的醇类溶剂萃取。其污染状况:大幅减少废水排放量,生产1t皂素只产生25~30t废水,只有传统工艺的约1/15,可显著提高皂素提取率。

1.5 直接分离-板框压滤法

直接分离-板框压滤法已有应用实例,该工艺原理及特点为:先将黄姜根茎中不含皂素的纤维素(及木质素)分离回收,得到高皂素含量的水解物;黄姜经过破碎、研磨、振动、带式压榨后,先提取副产品纤维素;带式压榨后黄姜浆料分离出淀粉渣料和浆料,淀粉渣料分离出淀粉。其污染状况为:利用物理方法分离黄姜中的淀粉和纤维素,大幅减少参与酸化水解的物料;板框压滤产生的高浓度酸液(黑液)在一定程度上得以回用,减少硫酸消耗量,减少进入废水中的有机物和硫酸,废水易于处理。

1.6 糖化-膜分离回收-酸水解

糖化-膜分离回收-酸水解已有应用实例,该工艺原理及特点为:将粉碎预发酵后的黄姜浆料采用双酶法液化糖化,并采用膜分离技术将糖化物料中的皂甙与淀粉糖液进行分离,分离后得到的糖渣和膜浓缩液(皂甙悬浮液)用酸催化水解得到水解物,水解物用溶剂汽油提取得到皂素。其污染状况为:在酸水解前将传统工艺中废水污染贡献率70%以上的淀粉预分离,同时使主产品皂素的得率提高20%以上,削减

了末端污染物产生量^[21],降低了酸用量;但是需要新增设备,投资有所增加,膜通量较小。

2 黄姜皂素生产工艺的评价方法

利用层次分析(analytical hierarchy process, AHP)与灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)相结合建立数据模型,采用现场调研数据与专家评价相结合的方法,对不同工艺进行客观分析、评价。

2.1 评价指标体系构建原则

a) 科学性和先进性。指标体系的选择应真实地反映黄姜皂素生产工艺的内容、基本特征、变化以及环保方面的要求。

b) 全面性和系统性。生产工艺的选择主要取决于环境 and 经济因素,但这并不全面,还需要衡量各方面的要求,如资源、能源的消耗等;同时,良好的指标系统性也可作为衡量技术方案的效果和确定指标的权重提供便利。

c) 可操作性。评价体系中的指标应具有可测性和可比性,并考虑指标数据获取的可行性、难易程度,指标数据获取手段包括现有分析测试和统计方法。指标体系应尽可能简化,计算简单,数据应易获取,避免因获取不到数据而造成指标缺失,致使无法计算和加入评价指标体系。

d) 定量指标与定性指标相结合。这样既可使评价具有客观性,便于数学模型处理,又可弥补单纯定量评价的不足及数据本身存在的某些缺陷。

2.2 评价指标体系的确定

对系统进行层次化分解,形成由若干影响工艺优化的因素组成的多层结构^[22]。通过对相关企业的现场调研,以及对湖北省环境科学研究院、中国地质大学等专家咨询,建立了生产工艺评价指标体系。指标体系全面概括了工艺情况,以实行清洁生产、优化黄姜皂素生产工艺、提高环境质量作为总目标,建立了由资源能源、污染物产生、环境效益、经济效益4个指标组成的准则层,每个准则层下又各自设立3个子指标,共同形成指标层。

a) 资源能源指标。企业对资源能源的消耗程度既可反映企业的技术工艺水平,也反映了生产过程在宏观上对生态环境的影响程度。针对黄姜皂素生产行业的情况,设置单位产品(以t计)酸耗系数、水耗系数、能耗系数(按1kg标准煤发3kW·h电计算,1t煤约可发电2777kW·h,将煤耗折算成电耗)3项指标。

b) 污染物产生指标。污染物产生指标高则说明工艺比较落后。通常情况下,污染物产生指标分3

类,即单位产品(以每 t 计)废水 COD_{Cr} 产生量、废气产生量和固体废物产生量。

c) 环境效益指标. 黄姜皂素生产工艺必须配套建设相应的污染防治工程,减少环境污染,实现达标排放,因此,环境效益指标在评价体系中不可或缺。在环境效益指标下面设立了污染物处理效果、环保成本(年环境代价/产品年产量)和环境系数(年环境代

价/年产值) 3 项子指标。

d) 经济效益指标. 在选取生产工艺时,投入和产出是企业考虑的首选,因此,将经济效益列为评价生产工艺的一项指标。经济效益指标包括成本投资、运行费用和资源综合利用收益 3 项。

最底层为可供选择的各种生产工艺,又称方案层。整个层次化系统如图 1 所示。

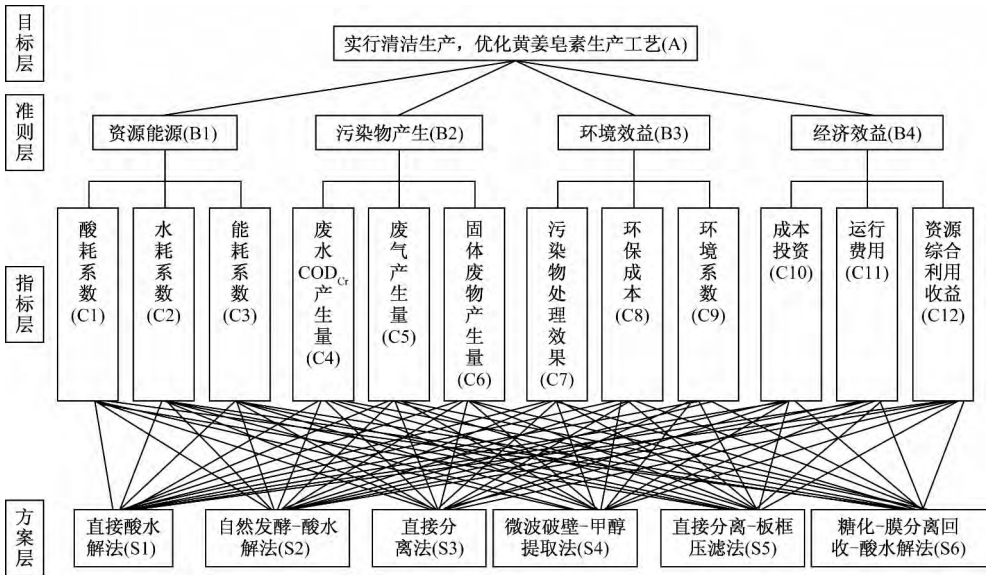


图 1 黄姜皂素生产工艺评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system of production processes from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright

2.3 层次分析法确定指标权重

根据系统优化原则、评价者主观认识符合客观实际的原则确定指标权重。指标权重选取是否合理,直接影响到评价结果,而层次分析法把复杂系统的评价过程数字化、系统化,尤其适用于多指标评价决策。因此,笔者利用层次分析法确定上述各层次指标的权重,即各指标在整个生产工艺中的重要性。根据调研的实际情况,聘请专家对各项指标打分,对各指标层进行指标赋权^[23-24]。基本步骤如下:

a) 构造判断矩阵。在咨询专家意见的基础上,

将上述层次结构模型,采用 1~9 及其倒数标度法,对各项指标通过两两对比的方式打分,确定每一层次各要素相对上一层某一要素、同一层次各要素之间的相对重要性,将比较值按顺序排列,构造判断矩阵。

b) 层次单排序及一致性检验。层次单排序指根据判断矩阵计算对于上层某元素或本层与之有联系的元素重要次序的权值,是本层元素对上层元素进行重要性排序的基础。用和法计算目标层和 4 个准则层指标(A、B1、B2、B3、B4)的特征向量与特征根,进行层次单排序及一致性检验,结果见表 1。

表 1 层次单排序及一致性检验

Table 1 Hierarchical single ranking and consistency test

判断矩阵	特征向量	特征根	CR	一致性检验
A	[0.455 0.273 0.182 0.091] ^T	4.00	0	满足一致性
B1	[0.368 0.474 0.158] ^T	3.00	0	满足一致性
B2	[0.692 0.077 0.231] ^T	1.00	0	满足一致性
B3	[0.529 0.294 0.176] ^T	1.00	0	满足一致性
B4	[0.429 0.333 0.238] ^T	1.00	0	满足一致性

计算准则层对目标层的权向量, 确定其判断矩阵

$$W^{(3)} = w \times w_B$$

为 $W = [0.455 \ 0.273 \ 0.182 \ 0.091]^T$. 指标层对目标层的权向量(w):

式中 w_B 为指标层对准则层的权向量 结果见表 2.

2.4 灰色关联分析

表 2 指标层元素相对于目标层的组合权重

Table 2 Combined weights of elements of indicator hierarchy corresponding to target hierarchy

指标	相对于指标层权重				相对于目标层权重	排序
	资源能源	污染物产生	环境效益	经济效益		
酸耗系数	0.368	0	0	0	0.167	3
水耗系数	0.474	0	0	0	0.216	1
能耗系数	0.158	0	0	0	0.072	5
废水 COD _{Cr} 产生量	0	0.692	0	0	0.189	2
废气产生量	0	0.077	0	0	0.021	12
固体废物产生量	0	0.231	0	0	0.063	6
污染物处理效果	0	0	0.529	0	0.096	4
环保成本	0	0	0.294	0	0.054	7
环境系数	0	0	0.176	0	0.032	9
成本投资	0	0	0	0.429	0.039	8
运行费用	0	0	0	0.333	0.030	10
资源综合利用收益	0	0	0	0.238	0.022	11

利用不同工艺技术各项指标与最优方案的关联度, 经专家打分、决策矩阵构造、指标规范化处理、确定最优指标值、计算灰色关联系数等步骤^[25-27], 评价出 6 种工艺的优劣排序.

以酸耗系数计算为例. 每生产 1 t 皂素, 直接酸水解法、自然发酵 - 酸水解法、直接分离法、微波破壁 - 甲醇提取法、直接分离 - 板框压滤法、糖化 - 膜分离回收 - 酸水解法的酸耗量分别为 17.50、16.90、4.48、1.80、2.11、5.13 t. 据此对 6 种工艺打分, 分别

为 9、8、2、1、1、3 分. 其余指标依此类推. 构造决策矩阵. 根据现场实测结果, 计算不同工艺指标列与最优指标集数据列的关联度, 结果如表 3 所示. 微波破壁 - 甲醇提取法与直接分离 - 板框压滤法酸耗量低, 与最优指标集数据列的关联度最高, 为 1.00; 直接酸水解法酸耗量最高, 与最优指标集数据列的关联度最低, 为 0.33. 其余关联度的意义依此类推. 与最优指标集数据列关联度最高的生产工艺即为适用工艺, 从而得到 6 种生产工艺的综合排序, 结果如表 4 所示.

表 3 不同工艺指标列与最优指标集数据列的关联度

Table 3 Associate degrees between different columns of process indicators and optimal data columns of indicators sets

指标	直接酸水解法	自然发酵 - 酸水解法	直接分离法	微波破壁 - 甲醇提取法	直接分离 - 板框压滤法	糖化 - 膜分离回收 - 酸水解法
酸耗系数	0.33	0.36	0.80	1.00	1.00	0.67
水耗系数	0.33	0.37	1.00	1.00	0.78	0.78
能耗指标	0.75	1.00	0.50	0.33	0.43	0.33
废水 COD _{Cr} 产生量	0.33	0.80	1.00	1.00	1.00	1.00
废气产生量	0.33	0.38	1.00	1.00	0.75	1.00
固体废物产生量	0.33	0.38	1.00	0.60	0.50	0.75
污染物处理效果	0.33	0.41	1.00	1.00	0.78	0.54
环保成本	0.33	0.43	0.75	1.00	1.00	0.60
环境系数	0.33	0.43	0.75	1.00	0.75	0.60
成本投资	1.00	0.71	0.45	0.38	0.38	0.33
运行费用	1.00	0.75	0.50	0.33	0.38	0.43
资源利用收益	0.33	0.37	1.00	0.78	1.00	0.54

表 4 黄姜皂素生产工艺评价结果
Table 4 Evaluation results of diosgenin production process
from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright

工艺	关联度	排序
微波破壁 - 甲醇提取法	0.879	1
直接分离法	0.874	2
直接分离 - 板框压滤法	0.803	3
糖化 - 膜分离回收 - 酸水解法	0.701	4
自然发酵 - 酸水解法	0.530	5
直接酸水解法	0.410	6

3 结果与讨论

微波破壁 - 甲醇提取法降低了水耗量,提高了皂素得率,但存在着醇提过程中甲醇挥发量大、损失多的缺点,综合各项指标,排在第 1 位。直接分离法投资、运行费用较低,显著降低了水耗量、酸耗量,产生的废水量也较少,名列第二。直接分离 - 板框压滤法工艺相对流畅,但其板框压滤分离水解物效率相对较低,虽然分离出淀粉、纤维和木质素,但实验室测试结果表明皂素夹带量较其他工艺高,排第 3 位。糖化 - 膜分离回收 - 酸水解法在一定程度上分离淀粉、纤维素,减少了废水排放,提高了皂素得率,但酶解糖的超滤(陶瓷)膜分离技术与设备不完善(分离速度很慢、膜的堵塞与清洗存在问题),其名列第四。这 4 种工艺具有合理的清洁生产要素,可称为清洁生产工艺,相对于传统工艺(直接酸水解法与自然发酵 - 酸水解法),清洁生产工艺从回收资源和污染减排着手,取得了较好的经济效益和环境效益。传统工艺中直接酸水解法特点在于设备投入少、工艺技术含量低、但较成熟;运行成本方面也占有一定优势,如电耗较低,总体来看投入少量资金即可生产,见效快。但由于该工艺淀粉、纤维素参与水解,水耗、酸耗量大,废水产生量大、酸度高、盐度大、色度高,没有清洁生产要素,建议予以淘汰。自然发酵 - 酸水解法通过生物发酵提高了皂素得率^[28-29],但黄姜成分全部参与水解,污染仍然相当严重。

根据 GB 20425—2006《皂素工业水污染物排放标准》,现有皂素企业 COD_{Cr} 排放控制限值为 240 kg/t,废水中 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 限值为 400 mg/L,此外,还规定了 $\rho(\text{BOD}_5)$ 等限值。微波破壁 - 甲醇提取法、直接分离法、直接分离 - 板框压滤法、糖化 - 膜分离回收 - 酸水解法的废水经后续设施处理, $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 排放值一般低于 300 mg/L;而传统工艺废水排放量大,难于处理,不能达标排放。

对黄姜皂素生产工艺的评价研究很少。胡菊

等^[30]以文献综述的形式评价了直接酸水解法、预发酵法、分离提取法、CO₂ 超临界萃取法,比较了这些工艺的优缺点,但未建立评价指标体系。韩枫等^[31]对黄姜中薯蓣皂苷元的提取方法进行比较发现,黄姜磨浆后超声提取的方法提取效率最好,收率比传统提取法提高 15%,用酸量降低 90% 以上,提取物纯度高。

评价过程表明,层次分析 - 灰色关联分析法既充分体现了各指标对总目标的重要性程度,又充分利用并挖掘了决策矩阵中的有效信息,是一种简便而实用的方法。使用该方法,使评价过程中灰色信息“白色”化,并且使评价因素量化,增强了评价的科学性和可靠性。

4 结论

a) 用层次分析法确定各项指标的权重,通过构造判断矩阵、层次单排序及一致性检验等步骤,确定在 12 项指标中,水耗系数、废水 COD_{Cr} 产生量、酸耗系数的权重分别为 0.216、0.189、0.167,排在前三位,对评价结果影响较大。

b) 用灰色关联分析法计算各工艺的关联度,结果表明,微波破壁 - 甲醇提取法与最优指标集数据列的关联度为 0.879,为最优工艺,直接分离法、直接分离 - 板框压滤法、糖化 - 膜分离回收 - 酸水解法的关联度分别为 0.874、0.803、0.701。这 4 种工艺具有合理的清洁生产要素,可称为清洁生产工艺。直接酸水解法、自然发酵 - 酸水解法的关联度分别为 0.530、0.410,排序最后,建议予以淘汰。

参考文献(References):

- [1] 徐升运,赵文娟,陈卫锋.应用生物酶法提取黄姜皂素的清洁工艺研究[J].环境科学与技术,2011,34(2):162-164.
- [2] LAHMANN M, GYBÄCK H, GAREGG P J *et al.* A facile approach to diosgenin and furostan type saponins bearing a 3 β -chacotriose moiety[J]. Carbohydrate Research, 2002, 337(21/22/23): 2153-2159.
- [3] 李辉,倪晋仁.薯蓣皂甙元的研究进展[J].精细化工,2010,27(1):60-65.
- [4] QIN Yuan, WU Xiaohua, HUANG Wen *et al.* Acute toxicity and sub-chronic toxicity of steroidal saponins from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright in rodents [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2009, 126(3): 543-550.
- [5] LI H M, HE P, VESTE M *et al.* Performance and photosynthetic ecophysiology of three photo-types of *Dioscorea zingiberensis* under differing light intensities[J]. Plant Biology, 2002, 4(3): 384-391.
- [6] LI Peiqin, MOU Yan, SHAN Tijiang *et al.* Effects of polysaccharide elicitors from endophytic fusarium oxysporium Dzf17 on growth and diosgenin production in cell suspension culture of *Dioscorea zingiberensis*[J]. Molecules, 2011, 16(11): 9003-9016.

- [7] ZHAO Huazhang ,CHENG Peng ,ZHAO Bin ,*et al.* Yellow ginger processing wastewater treatment by a hybrid biological process[J]. Process Biochemistry 2008 ,43(12) : 1427-1431.
- [8] 乔振杰. 盾叶薯蓣中薯蓣皂甙元提取工艺的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学 2006.
- [9] QIU Linli ,NIU Hai ,HUANG Wen. Ultrasonic and fermented pretreatment technology for diosgenin production from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright [J]. Chemical Engineering Research and Design 2011 89(2) : 239-247.
- [10] HUANG Wen ,ZHAO Huazhang ,NI Jinren ,*et al.* The best utilization of *D. zingiberensis* C. H. Wright by an eco-friendly process[J]. Bioresource Technology 2008 99(15) : 7407-7411.
- [11] 潘鹤林, 陈晨, 商利容. 黄姜皂素提取新工艺研究[J]. 高校化学工程学报 2011 2(25) : 296-301.
- [12] LEI Jing ,NIU Hai ,LI Tianhong ,*et al.* A novel beta-glucosidase from *Aspergillus fumigatus* releases diosgenin from spirostanosides of *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright (DZW) [J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology 2012 28(3) : 1309-1314.
- [13] 杨志华, 王焰新, 洪岩, 等. 黄姜皂素清洁生产污水污染物削减过程分析[J]. 环境科学与技术 2007 30(1) : 53-55.
- [14] 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.
- [15] ZHU Yuling ,HUANG Wen ,NI Jinren. A promising clean process for production of diosgenin from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright [J]. Journal of Cleaner Production 2010 18(3) : 242-247.
- [16] 郑一新. 制药行业高浓度有机废水的综合治理及资源利用研究[J]. 环境科学研究 1999 12(4) : 19-20.
- [17] 刘大银, 毕亚凡, 梅明, 等. 皂素工业废水 COD_{Cr} 排放限值的研究[J]. 环境科学研究 2007 20(2) : 94-98.
- [18] LI Hui ,NI Jinren ,LIU Wei ,*et al.* Cleaner production alternatives for saponin industry by recycling starch [J]. Resources , Conservation and Recycling 2010 54(12) : 1145-1151.
- [19] CHENG Peng ,ZHAO Huazhang ,ZHAO Bin ,*et al.* Pilot treatment of wastewater from *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright production by anaerobic digestion combined with a biological aerated filter [J]. Bioresource Technology 2009 100(12) : 2918-2925.
- [20] 胡晓莲. UV-Fenton 试剂处理皂素废水的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学 2007.
- [21] WANG Yanxin ,LIU Hui ,BAO Jianguo ,*et al.* The saccharification-membrane retrieval-hydrolysis (SMRH) process: a novel approach for cleaner production of diosgenin derived from *Dioscorea zingiberensis* [J]. Journal of Cleaner Production ,2008 ,16: 1133-1137.
- [22] 赵焕臣, 许树柏, 和金生. 层次分析法: 一种简易的新决策方法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [23] 纪玉琨, 王凯军, 郑明霞, 等. 规模畜禽养殖场的污染防治技术后评价方法研究[J]. 安徽农业科学 ,2012 ,40(10) : 6063-6067.
- [24] SAATY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill Company ,1980.
- [25] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- [26] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中理工大学出版社 2002.
- [27] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社 2008.
- [28] LIU Lin ,DONG Yuesheng ,QI Shanshan ,*et al.* Biotransformation of steroidal saponins in *Dioscorea zingiberensis* C. H. Wright to diosgenin by *Trichoderma harzianum* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology 2010 85(4) : 933-940.
- [29] 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.
- [30] 胡菊, 马俊林, 杨红琳, 等. 黄姜皂素生产方法评价[J]. 教育论坛 2008(1) : 91-93.
- [31] 韩枫, 李稳宏, 李冬, 等. 黄姜中薯蓣皂甙元提取方法的比较研究[J]. 中成药 2007 29(12) : 1765-1768.

(责任编辑: 孙彩萍)