



## 豆制品废水处理工艺探讨

王延林<sup>1</sup>, 孙启康<sup>2</sup>, 杨贞建<sup>3</sup>, 王建峰<sup>3</sup>, 陆慧锋<sup>3</sup>, 周伟竹<sup>1</sup>, 陈小光<sup>1</sup>

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心, 上海 201620;  
2. 岷山集团有限公司, 山东淄博 255200; 3. 浙江沃乐环境科技有限公司, 浙江杭州 311100)

**[摘要]** 豆制品生产废水是一种高浓度有机废水, 具有 COD 高、pH 低和生化性较好的特点。简要介绍了豆制品废水的排放情况和污染特征; 剖析了国内外关于豆制品废水处理方法的研究现状, 比如常规处理和高值利用; 综述了豆制品废水处理的工程案例, 目前主流工艺为“物化法+生物法”耦合工艺; 概述了厌氧/好氧生物流化床联合处理新工艺工程案例; 探讨了当前豆制品废水处理工程应用中存在的若干问题, 并阐明了行业发展的方向。

**[关键词]** 豆制品废水; 高浓度有机废水; 螺旋对称流厌氧反应器; 生物流化床; 高值利用

**[中图分类号]** X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2021)10-0014-08

## Discussion of the treatment technology of soybean wastewater

WANG Yanlin<sup>1</sup>, SUN Qikang<sup>2</sup>, YANG Zhenjian<sup>3</sup>, WANG Jianfeng<sup>3</sup>, LU Huifeng<sup>3</sup>, ZHOU Weizhu<sup>1</sup>, CHEN Xiaoguang<sup>1</sup>

(1. State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;  
2. Bashan Group Corporation, Zibo 255200, China; 3. Zhejiang Water-Healer Environmental Technology Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

**Abstract:** Soybean product wastewater is a kind of high concentration organic wastewater, which has the characteristics of high COD, low pH and good biodegradability. The emission and pollution characteristics of soybean wastewater were introduced briefly. The research status of soybean wastewater treatment methods at domestic and overseas was discussed, such as conventional treatment and high-value utilization. The engineering cases of soybean product wastewater treatment were summarized. The results showed that the mainstream process was coupling process of physico-chemical and biological methods. The engineering case of anaerobic/aerobic biological fluidized bed combined treatment was sketched. Some problems existing in the current engineering application of soybean product wastewater treatment were discussed, and the development direction of the industry was expounded.

**Key words:** soybean products wastewater; high concentration organic wastewater; spiral symmetry stream anaerobic bioreactor; biological fluidized bed; higher value application

大豆是世界主要粮食作物之一, 中国是大豆的生产大国和消费大国, 也是最大的大豆进口国<sup>[1]</sup>。随着消费者对饮食结构的调整, 以及诸如《国民营养计划(2017—2030)》、《大豆振兴计划实施方案》等文件的颁布, 我国大豆产量及消费量年年攀升。2018 年我国大豆总产量 1 600 万 t, 消费量突破 1 亿万 t, 占全球大豆消费量的 30%, 2019 年大豆产量增至 1 810 万 t, 同比增长了 13%, 预计到 2022 年我国豆

制品销售收入将达 1 110 亿元, 我国大豆市场规模还在不断扩大<sup>[2]</sup>。

大豆常被用于制作豆制品。根据《食品安全国家标准 豆制品》<sup>[3-4]</sup>, 豆制品可分为发酵豆制品(包括豆豉、酱油和豆腐乳等)、非发酵豆制品(包括豆浆、豆腐和百叶等)以及大豆蛋白类制品。生产豆制品会消耗大量清洁水并排放大量高浓度有机废水<sup>[5]</sup>, 我国每年可产生超过 1 000 万 t 的豆制品废水<sup>[6]</sup>。

**[基金项目]** 上海市浦江人才计划资助项目(2020PJD001)

豆制品废水属于高浓度有机废水,主要成分是不可沉淀的蛋白质和水溶性好的糖<sup>[7]</sup>,如大豆乳清蛋白、多肽、低聚糖以及异黄酮等<sup>[8]</sup>。如表 1<sup>[9-13]</sup> 所示,豆制品废水呈现高 COD、高 TN 和低 pH 的特征。该类废水在温度较高时易于酸化,酸度不断积累,可高达 1 500~3 200 mg/L<sup>[14]</sup>,易抑制产甲烷菌活性;而且废水蛋白质浓度较高,氨化作用会产生大量氨氮,影响颗粒污泥的形成,甚至出现污泥流失<sup>[15-16]</sup>。

表 1 豆制品废水水质参数

Table 1 Water quality parameters of soybean products wastewater

| 项目 | COD/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | BOD/COD | pH  | TN/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | TP/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | SS/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) |
|----|-------------------------------|---------|-----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 数值 | 5 000~<br>16 000              | 0.4~0.6 | 4~6 | 44~2 550                     | 110~180                      | 10 000~<br>21 000            |

由于豆制品废水可生化性好,因此多用生物法对其进行处理。从 20 世纪 80 年代开始,已有学者开始研究采用“厌氧-好氧”组合工艺处理豆制品废水的可行性<sup>[17-18]</sup>,结果表明,COD 去除率可达 90% 以上。膜分离技术问世以后,又有研究人员将其应用于回收豆制品废水中的可溶性蛋白和低聚糖等成分<sup>[19-22]</sup>。尽管现行工艺在豆制品废水处理领域发挥了一定的积极作用,却仍存在工艺组合不科学、运行费用高、占地大、未充分回收资源等问题。笔者基于国内外文献调研,并结合课题组豆制品废水处理经验,较为系统地综述了豆制品废水的处理现状以及资源化利用前景;同时,结合现有工程案例运行情况,探讨了豆制品废水处理工艺可能存在的问题和未来发展趋势。

## 1 豆制品废水概述

### 1.1 豆制品市场概况

据统计,我国获得生产许可证的豆制品企业数量正逐年增加,截至 2017 年 3 月,取得生产许可证的豆制品企业总计达 4 890 家,2016 年同期为 4 779 家,同比增长 2.3%。但大企业生产标准化、规模化、工业化,主要面向大卖场和大超市进行销售,无法满足区域性消费,也无法克服生鲜食品保质期短的问题(豆制品主要属于生鲜食品)<sup>[23]</sup>,所以豆制品厂大多仍是中小型企业,资金实力薄弱且分布分散。截至 2016 年,个体加工户和小作坊数量超过 10 万家<sup>[2]</sup>。这些中小型企业由于缺乏资金和技术,处理废水的

能力有限,能否在废水达标排放的前提下尽量节约成本是制约其发展的瓶颈。因此,发展高效价廉的豆制品废水处理工艺是豆制品行业可持续发展的必要前提。

### 1.2 豆制品废水特点

#### 1.2.1 传统豆制品生产过程废水(以豆腐为例)

传统豆制品主要包括豆腐、腐竹、豆豉、腐乳等,生产特点是规模小、作坊式生产、工艺众多、分布广泛。以最典型的豆腐产品为例,其生产工艺和排污工序如图 1 所示。

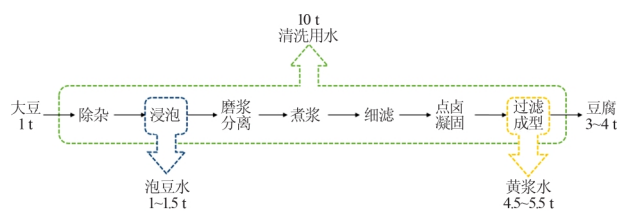


图 1 豆腐生产工艺及排污环节

Fig. 1 Tofu production process and sewage discharge

在生产豆腐过程中,会产生高浓度的泡豆水、黄浆水和低浓度的清洁用水。据统计,每使用 1 t 干大豆生产豆腐,会产生 1~1.5 t 泡豆废水、4.5~5.5 t 黄浆水和 10 t 清洁废水<sup>[24]</sup>,相应的 COD 分别为 4 000~8 000、20 000~30 000、500~1 500 mg/L。当生产工艺、产品类别、生产习惯等不同时,各种废水的水量和浓度也会发生变化。

其中,泡豆水中的主要污染物质有寡糖(水苏糖、水溶性非蛋白氮、棉子糖等)、有机酸(柠檬酸等)、矿物质、水溶性维生素等,以及异黄酮等色素物质(色素会随着大豆种皮的不同而变化);黄浆水中所含污染物质主要包括蛋白质(如大豆乳清蛋白、大豆凝血素)、可溶性固形物和氨基酸;清洁用水中的主要污染物质有糖类、乳清蛋白、清洁剂和豆渣等。

#### 1.2.2 新兴豆制品生产过程废水(以大豆分离蛋白为例)

新兴豆制品由于产量大、生产集中,因此生产过程中的废水排放量很大。以大豆分离蛋白为例,其碱溶酸沉法生产工艺和排污工序如图 2 所示。

每生产 1 t 分离蛋白将排放 100 t 废水,其中高浓度废水(乳清废水和水洗水)约 30 t,低浓度废水(清洗用水)约 70 t。乳清废水 COD 为 15 000~22 000 mg/L, BOD 为 5 000~8 000 mg/L,富含有机物(主要

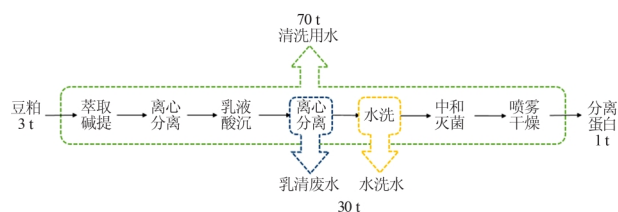


图2 大豆分离蛋白生产工艺及排污环节

Fig. 2 Production process and sewage discharge of soybean protein isolate

是低聚糖和可溶性蛋白质)、皂苷以及异黄酮<sup>[8]</sup>,其pH为4.5~5.5,呈酸性,排放温度40℃左右,极易腐败。

## 2 豆制品废水处理研究现状

### 2.1 常规处理

生物法是利用微生物的新陈代谢去除废水中有机污染物的方法,由于其具有经济性和环保性,一直备受水处理行业的青睐。通常采用好氧生物法和厌氧生物法处理豆制品废水。

#### 2.1.1 好氧生物法

陈亮等<sup>[25]</sup>采用AB活性污泥法处理豆制品

水,通过优化A、B 2段的曝气时间、污泥负荷和溶解氧,在进水COD为7000 mg/L的情况下,达到了97%的COD去除率。Kuizu SU等<sup>[26]</sup>利用SBR反应器处理豆制品废水,在进水COD为2000 mg/L的情况下达到了98%以上的COD去除率。杜天星等<sup>[27]</sup>在自制的多级反应器中,尝试通过八级接触氧化法处理豆制品废水,结果表明,在最佳运行参数下,当进水COD为800~1200 mg/L时,处理出水COD达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的二级排放标准。曹建平等<sup>[28]</sup>采用气浮—改良活性污泥法处理豆制品废水,即在活性污泥曝气池前加设了气浮处理单元,结果表明,在一定条件下,当进水COD为2000~3000 mg/L时,出水COD可降至53.9 mg/L。

尽管好氧生物法可以达到比较高的COD去除率,但进水COD不宜太高,且需要外源动力提供氧气,有机负荷越高,所需曝气量越多<sup>[29]</sup>;此外,该方法还会产生大量污泥,存在运行费用高和剩余污泥多等显著缺陷。

#### 2.1.2 厌氧生物法

厌氧生物法对豆制品废水的处理效果见表2。

表2 不同类型的厌氧生物法处理豆制品废水工艺参数与处理效果

Table 2 Process parameters and treatment effects of different types of anaerobic biological methods for soybean wastewater treatment

| 反应器                | 废水种类 | 进水COD/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | COD<br>去除率/% | COD容积负荷/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 进水pH    | 系统<br>温度/℃ | HRT/h     | 产气效果                                                        |                            | 规模 | 参考文献 |
|--------------------|------|---------------------------------|--------------|----------------------------------------------------|---------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------|----------------------------|----|------|
|                    |      |                                 |              |                                                    |         |            |           | 产气量/<br>(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | CH <sub>4</sub> 体积<br>分数/% |    |      |
| 上流式厌氧<br>反应器(UASB) | 实际废水 | 15 200~16 800                   | 90.0         | 8.0~10.0                                           | 4.0~6.0 | 35~40      | 26.0~37.0 | —                                                           | —                          | 中试 | [30] |
|                    | 实际废水 | 8 980~10 250                    | 87.0         | 10.0                                               | 5.0     | 34~36      | 24.0      | 2.23                                                        | 65~71                      | 小试 | [31] |
|                    | 实际废水 | 12 000                          | 93.0         | 10.0~12.0                                          | 5.0     | 25~35      | 48.0      | 3.2~3.8                                                     | —                          | 小试 | [32] |
| 一体式两相<br>厌氧反应器     | 实际废水 | 8 000                           | 80.0         | 5.1                                                | —       | 30         | 40.0      | 0.35                                                        | 33.5                       | 小试 | [10] |
| 厌氧折流板<br>反应器(ABR)  | 实际废水 | 14 672.3                        | 80.0         | 14.3                                               | 6.0~7.3 | 34~36      | —         | 10.2                                                        | 55~60                      | 小试 | [33] |
|                    | 实际废水 | 5 107~10 076                    | 92.0~97.0    | 1.2~6.0                                            | 4.1~4.8 | 34~36      | 39.5      | —                                                           | 45                         | 小试 | [9]  |
|                    | 实际废水 | 9 941                           | 97.0         | 6.0                                                | 4.1~5.0 | 34~36      | 39.5      | —                                                           | —                          | 小试 | [34] |
| 膨胀污泥床<br>反应器(EGSB) | 模拟废水 | 10 000                          | 85.0         | 10.2                                               | —       | 32~37      | 48.0      | 0.8~1.4                                                     | 60~75                      | 小试 | [35] |
| 厌氧生物<br>滤池(AF)     | 实际废水 | 7 520~11 450                    | 89.2~92.5    | 8.2~13.5                                           | 5.4~6.6 | 34~36      | 25.0      | 3.0~7.2                                                     | 50~90                      | 小试 | [36] |
| 内循环厌氧<br>反应器(IC)   | 实际废水 | 8 000~12 000                    | 80.0~90.0    | 9.5                                                | 3.5~4.5 | 30~38      | 20.0      | —                                                           | —                          | 中试 | [37] |
| 厌氧序批式<br>反应器(ASBR) | 实际废水 | 4 500~5 300                     | 89.7         | 7.8                                                | 6.8~7.0 | 34~36      | 14.4      | 3.9                                                         | 70                         | 小试 | [38] |
| 多级厌氧消化器            | 实际废水 | 14 000~28 000                   | 97.9~99.4    | 3.8~5.6                                            | 5.3~6.0 | 30         | —         | 2.4~2.6                                                     | 53                         | 小试 | [39] |

由表2可知,上述采用厌氧生物法处理豆制品废水的研究中,大部分使用实际废水作为进水,COD普遍在10000 mg/L以上,系统温度一般控制在30~38℃,反应器HRT通常超过30 h,COD容积负荷最大为小试规模下的14.30 kg/(m<sup>3</sup>·d),最低

仅为1.2 kg/(m<sup>3</sup>·d)。运行结果表明,各种厌氧反应器的COD去除率都超过了80.0%,最高可达99.4%,且能承受较大范围内的有机负荷和进水pH的波动;反应器产气量为2~10.2 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d),甲烷体积分数为45%~90%,具有一定的资源化利用价

值。

微生物厌氧发酵过程可分为水解酸化、产氢产乙酸和产甲烷 3 个阶段<sup>[40]</sup>,每个阶段的优势菌种不同。这 3 个阶段并非独立进行,而是相互制约、相互影响,协同降解有机物。有的厌氧反应器床层明显出现微生物分区现象<sup>[9-10,33-34]</sup>,生物相分离特征显著,即

不同厌氧发酵阶段的优势菌种富集在反应器中的不同区域,能够快速、高效地完成各阶段的代谢,这有助于提升处理速度及效率。

厌氧生物法能够处理高有机负荷的豆制品废水,但出水并未达标,需要与好氧生物法联用,进一步降低 COD、氨氮等以提升水质,如表 3 所示。

表 3 厌氧-好氧生物法处理豆制品废水效果

Table 3 Treatment effects of soybean products wastewater by anaerobic-aerobic biological process

| 工艺         | 废水种类 | 规模   | 进水 COD/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | COD 去除率/% |      |      | 厌氧段 COD 容积<br>负荷/(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | NH <sub>3</sub> -N<br>去除率/% | 产气量/<br>(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | CH <sub>4</sub> 体积<br>分数/% | 参考文献 |
|------------|------|------|----------------------------------|-----------|------|------|---------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------|------|
|            |      |      |                                  | 厌氧段       | 好氧段  | 总计   |                                                         |                             |                                                             |                            |      |
| 厌氧+缺氧+好氧   | 稀释废水 | 小试   | 517                              | —         | —    | 96.0 | 4.6                                                     | 82                          | 0.6                                                         | 59.5~69.8                  | [41] |
| ECSB+SPMBR | 模拟废水 | 小试   | 12 000~15 000                    | 88.0      | 90.0 | 99.0 | 12.3~15.3                                               | 35                          | —                                                           | —                          | [42] |
| IC-A/O     | 实际废水 | 中试   | 8 000~10 000                     | 90.0      | 96.0 | 99.2 | 9.5                                                     | 90                          | —                                                           | —                          | [43] |
| IC-CAAC    | 实际废水 | 中试   | —                                | —         | 86.0 | —    | —                                                       | 91                          | —                                                           | —                          | [29] |
| 厌氧+好氧      | 实际废水 | 生产规模 | 15 000~20 000                    | 93.5      | 59.4 | 97.3 | 6.7                                                     | —                           | 3.4                                                         | 59.0                       | [44] |

注:SPMBR,浸没式平板膜生物反应器;CAAC,连续好氧-厌氧耦合工艺。

由表 3 可知,在 2 种生物法联用的情况下,厌氧段和好氧段可分别贡献 88.0%~93.5%和 59.4%~96.0%的 COD 去除率,总 COD 去除率可达 96%以上,NH<sub>3</sub>-N 去除率为 35%~91%;厌氧段 COD 容积负荷为 4.6~15.3 kg/(m<sup>3</sup>·d),产气量为 0.6~3.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup>·d),甲烷体积分数为 59.0%~69.8%。

相较于单一生物法,在联用生物法中,厌氧段既可降低 COD,又可将豆制品废水中呈悬浮或胶体状的难降解大分子有机物水解成易降解小分子有机物,进一步提高废水的可生化性,加强后续生物好氧处理效果;另一方面,好氧段可去除剩余的 COD 和厌氧氨化作用产生的 NH<sub>3</sub>-N,对进一步净化水质起到了一定作用。由此可见,“厌氧-好氧”生物法适用

于处理豆制品废水,且效果良好。遗憾的是,鲜见有关除磷的研究。

2.2 豆制品废水高值利用

豆制品行业是薄利行业<sup>[45]</sup>,且从事这一行业的企业大多规模较小,难以承担废水处理的成本,因此,豆制品废水的高值利用受到研究者的广泛关注。

2.2.1 特殊细菌降解

生物法借助微生物形成的活性污泥处理豆制品废水,达到降低废水 BOD、COD 等指标的目的。值得注意的是,部分微生物具有卓越的降解性能,且在处理废水的同时可产生再利用资源。为此,国内外研究人员在相关领域进行了研究。不同微生物对豆制品废水的处理效果见表 4。

表 4 不同微生物对豆制品废水处理效果

Table 4 Treatment effect of different microorganisms on soybean product wastewater

| 微生物                                                                                    | 培养条件 | 处理时长/h                  | 初始 COD/(mg·L <sup>-1</sup> ) | COD 去除率/% | 参考文献 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------|------------------------------|-----------|------|
| <i>Rhodobacter sphaeroides</i> Z08                                                     | 自然条件 | 90                      | 13 140                       | 99.4      | [46] |
| <i>Rhodobacter sphaeroides</i> Z08                                                     | 光照   | 72(含 Mg <sup>2+</sup> ) | 10 000                       | 86.0      | [47] |
| <i>Rhodobacter sphaeroides</i> Z08                                                     | 自然条件 | 72                      | 10 000                       | 96.2      | [48] |
| <i>Rhodopseudomonas palustris</i> 、 <i>Rhodopseudomonas sphaeroides</i>                | 黑暗有氧 | 72                      | 2 975                        | 96.2      | [49] |
| <i>Rhodobacter sphaeroide</i> ATCC 17023、 <i>Rhodospirillum rubrum</i> ATCC 11170 etc. | 好氧   | 96                      | 12 984                       | 87.3      | [50] |
| <i>Rhodopseudomonas palustris</i> 、 <i>Rhodopseudomonas sphaeroides</i>                | 黑暗有氧 | 72                      | 11 000                       | 84.0      | [51] |
| <i>Rhodobacter capsulatus</i> 、 <i>Rhodobacter spheroids</i>                           | 黑暗有氧 | 72                      | 2 100                        | 94.8      | [52] |
| <i>Rhodopseudomonas capsulate</i> 、 <i>Rhodopseudomonas spheroides</i>                 | 光照无氧 | 144                     | 52 800                       | 92.7      | [53] |
| <i>Rhodobacter sphaeroides</i> ATCC17023                                               | 光照   | 60                      | 6 200~9 300                  | 89.5      | [54] |
| <i>Rhodopseudomonas strain</i> H                                                       | 光照   | 260                     | 7 560~12 600                 | 62.3~78.2 | [55] |
| yeasts                                                                                 | 无氧   | 22                      | 25 000                       | 67.0      | [56] |
| <i>Chlorella</i> sp. L38                                                               | 光照   | 288                     | 2 270±0.74                   | 70.5      | [57] |
| <i>Chlorella</i> sp. L166                                                              |      |                         |                              | 61.1      |      |

从表 4 可知,研究主要集中在光合细菌(Photo-synthetic Bacteria, PSB)。PSB 是在厌氧条件下进行不放氧光合作用的细菌的总称<sup>[58]</sup>,这类细菌能在光照条件下以还原性低分子有机物质作为供氢体进行自养生活,或者在黑暗环境下分解有机物进行异养生活<sup>[59]</sup>,其中很多菌株可以适应高浓度有机物环境且拥有较强的有机物去除和分解能力。如表 4 所示,该类细菌能在 COD 为 2 000~52 800 mg/L 的情况下达到 80.0%以上的 COD 去除率。值得一提的是,部分光合细菌能产生具有潜在利用价值的物质,如菌株 ATCC17023,每消耗 1 g 底物,能够产生 7.4 mg 的 5-氨基乙酰丙酸;H 菌株在光照条件下可产气 146.8~351.4 mL/(L·d),其中 57.7%~71.5%的气体是氢气。而且,经光合细菌处理后的豆制品废水会成为含有大量光合菌的菌液,既可作菌肥又可作饲料添加剂直接使用,不会造成二次污染<sup>[49]</sup>。但是利用光合细菌处理豆制品废水存在需要设置可溶化槽和菌体无法自然沉降两大缺陷<sup>[52]</sup>,有待进一步研究。采用小球藻 L38 和 L166 处理豆制品废水, COD 去除率只有 60.0%~70.0%,但是能产生多糖[1.38、2.86 mg/(L·d)]和脂质[3.89、7.22 mg/(L·d)],具有一定研究价值。

尽管有部分细菌能够在处理豆制品废水的同时生成可再利用资源,但由于该类细菌种类不多、酶活性不高、提取不易,同时面临着与其他菌竞争基质的问题,并不容易被筛选与扩增;且细菌代谢需要光照,因此反应器中生物浓度很难提高,水力停留时间也会因此延长。所以,该方法难以工程化应用。

### 2.2.2 膜分离技术

直接将豆制品废水进行多级生物处理虽然能够实现废水的净化,但废水中可回收并极具经济价值的大量低聚糖、可溶性蛋白等却难以被再利用,据分析,豆腐黄浆水中含有 0.4%~0.5%(以质量分数计)的大豆乳清蛋白,1%~2%(以质量分数计)的总糖<sup>[60]</sup>。膜分离技术的应用为解决这一问题开辟了新途径。缪畅等<sup>[19]</sup>采用纳滤膜处理模拟大豆乳清废水,结果表明,在最优条件下其能够截留 88%的乳清蛋白。袁其朋等<sup>[20]</sup>采用超滤、纳滤及反渗透技术处理实际乳清废水,实验结果表明,1 t 废水能够回收可溶性大豆蛋白 2 kg,大豆低聚糖浆 10 kg 及纯净水 700 kg,具有较高的经济效益。刘宇等<sup>[21]</sup>以壳聚糖作为絮凝剂结合超滤膜处理实际大豆黄浆水,结果表明,该方

法能够回收 76.1%的蛋白质、77.2%的异黄酮。Xiao FENG 等<sup>[22]</sup>使用再生纤维(RC)膜和聚醚砜(PES)膜处理大豆乳清废水,结果表明,其能够截留住 78.0%左右的蛋白质。王洪波等<sup>[61]</sup>采用外加压管式膜组件对黄浆水进行超滤处理,结果表明,在最适条件下可回收全部脂肪、75%以上的蛋白质和 70%以上的总糖。祁佩时等<sup>[62]</sup>在中试规模下对大豆蛋白废水进行超滤处理,达到了 90%以上的蛋白质回收率,去除了 27%以上的 COD。徐朝辉等<sup>[63]</sup>利用“超滤+纳滤+反渗透”的组合工艺使大豆乳清废水达到了回用或排放要求。

膜分离技术具有绿色环保、过程简单、分离系数大、效率高的特点,对豆制品废水中的蛋白质有很高的回收率。但其存在膜孔易堵塞、膜系统成本高、相对于生物法能耗较高等缺陷,因而难以工程推广。

### 2.2.3 其他

研究人员还探索了一些其他高值利用豆制品废水的途径。如 Lianjie WANG 等<sup>[64]</sup>研发了一种内含挡板的泡沫分离柱,应用两级泡沫分离技术从大豆乳清废水中成功回收了 80%的蛋白质;Zong WEI 等<sup>[65]</sup>制备了磁性 AB-8 树脂,并用其从大豆乳清废水中吸附大豆异黄酮;陈松林等<sup>[66]</sup>将黄浆水经絮凝、微滤以及离子交换处理,得到碳酸型蛋白饮料原浆;G. LI 等<sup>[67]</sup>对大豆乳清废水进行超滤处理,然后对保留在渗透物中的大豆寡糖进行脱色、脱盐处理,得到纯化的寡糖液体,液体再经过真空浓缩和喷雾干燥,生产出大豆寡糖产品;以及利用豆制品废水培养面包酵母和药用酵母<sup>[68]</sup>或者作为营养源培养微生物<sup>[69-71]</sup>等等。

## 3 豆制品废水处理工程应用现状

高值利用豆制品废水虽然能带来经济价值,但目前难以工程化,因此人们仍普遍以生物法为主体大规模处理豆制品废水,如表 5 所示。

现有工程应用中多采用“物化法+生物法”耦合工艺处理豆制品废水。其中,物化法以气浮、混凝和过滤居多,常用于预处理或深度处理;生物法采用厌氧生物法与好氧生物法的组合工艺。该耦合工艺被应用于处理各种规模(12~5 000 m<sup>3</sup>/d)的豆制品废水,当进水 COD 为 8 850~40 530 mg/L 时,总 COD 去除率可达 70.0%~99.9%,相应的好氧生物处理单元 COD 容积负荷为 0.15~2.3 kg/(m<sup>3</sup>·d),厌氧生物处

表 5 豆制品废水处理工程应用案例

Table 5 Project application cases of soybean products wastewater treatment

| 工艺                                | 规模/<br>(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 进水水质/(mg·L <sup>-1</sup> ) |             |     | 总去除率/% |      |     | HRT/h |    | COD 容积负荷/<br>(kg·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |           | 处理成本/<br>(元·m <sup>-3</sup> ) | 建设成本/<br>万元 | 吨水<br>占地面<br>积/m <sup>2</sup> | 地区 | 参考<br>文献 |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|-------------|-----|--------|------|-----|-------|----|-----------------------------------------------------|-----------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|----|----------|
|                                   |                                           | COD                        | TN          | TP  | COD    | TN   | TP  | 厌氧    | 好氧 | 厌氧                                                  | 好氧        |                               |             |                               |    |          |
| 水解酸化-气浮-<br>UASB-两级<br>A/O-BAF    | 1 000                                     | 22 000                     | —           | —   | 99.6   | —    | —   | —     | —  | —                                                   | <0.40     | —                             | 500         | —                             | 山东 | [72]     |
| UASB-气升<br>环流反应器                  | 1 800                                     | 10 000~<br>12 000          | 220~<br>280 | —   | 70.0   | 98.0 | —   | —     | —  | 4.0~6.0                                             | 0.48~0.70 | 1.24                          | —           | —                             | 浙江 | [11]     |
| UASB-A <sup>2</sup> O-<br>滤布滤池    | 2 500                                     | 1 261~<br>1 348            | 44~53       | 13  | 98.0   | 80.0 | 94  | 26    | 34 | 10.0                                                | <0.36     | 1.99                          | 3 697       | —                             | 云南 | [12]     |
| 絮凝沉淀-UASB-<br>生物接触氧化              | 500                                       | 12 000~<br>17 000          | —           | —   | 99.4   | —    | —   | —     | 19 | 3.5                                                 | 2.30      | 2.54                          | —           | 0.81                          | 北京 | [73]     |
| 气浮-UASB-A/O                       | 300                                       | 8 850                      | —           | —   | 98.9   | —    | —   | —     | 40 | 5.0                                                 | —         | 1.08                          | 135         | —                             | 河南 | [74]     |
| PTA <sup>3</sup> O-絮凝沉<br>淀-滤布滤池  | 900~<br>1 100                             | 631~<br>1 440              | 75          | 13  | 97.6   | 96.9 | 95  | 13    | 26 | 4.6                                                 | 0.27~0.62 | —                             | 698         | 0.54                          | 河南 | [13]     |
| 混凝过滤-<br>两级 AF-BAF                | 12                                        | 40 000                     | —           | —   | 99.7   | —    | —   | —     | 14 | —                                                   | —         | —                             | —           | —                             | 山东 | [75]     |
| 气浮-UASB-<br>SBR-砂滤-生物<br>活性炭过滤    | 900<br>(160)                              | 12 000+<br>2 500           | —           | —   | 99.2   | —    | —   | 34    | 68 | 6.0                                                 | <0.15     | 1.82                          | 320         | 2.64                          | 北京 | [76]     |
| 气浮-ICASB<br>反应池-CASS 池            | 3 300~<br>3 900                           | 11 809~<br>15 040          | —           | —   | 96.8   | —    | —   | —     | —  | 6.7~7.5                                             | 2.10      | —                             | —           | —                             | —  | [14]     |
| 气浮-混凝-水解<br>酸化-SBR-滤罐             | 40~45                                     | 38 250~<br>40 530          | —           | —   | 99.9   | —    | —   | 27    | 8  | 3.2~3.6                                             | —         | 2.00                          | 28          | 1.41                          | 辽宁 | [77]     |
| MIC-A <sup>2</sup> O 氧化<br>沟-深度处理 | 5 000                                     | ≤6 000                     | —           | ≤35 | ≥95.0  | —    | ≥85 | 16    | 20 | 8.0                                                 | —         | 1.24                          | 1 124       | 0.80                          | 浙江 | [78]     |
| IC-氧化沟                            | 2 000                                     | 3 500~<br>4 000            | —           | —   | 98.3   | —    | —   | 17    | 24 | 5.7                                                 | —         | 0.88                          | —           | —                             | 安徽 | [79]     |

注:PTA<sup>3</sup>O,强化脱氮除磷工艺;AF,厌氧生物滤池;BAF,曝气生物滤池;ICASB,内循环厌氧反应器;CASS,循环活性污泥工艺;MIC,厌氧多级内循环反应器。

理单元 COD 容积负荷为 3.2~7.5 kg/(m<sup>3</sup>·d),运行成本为 1.08~2.54 元/m<sup>3</sup>。100 m<sup>3</sup>/d 以下处理规模的吨水占地面积为 1.41 m<sup>2</sup>,1 000 m<sup>3</sup>/d 以下处理规模的吨水占地面积为 0.49~2.64 m<sup>2</sup>,5 000 m<sup>3</sup>/d 处理规模的吨水占地面积为 0.8 m<sup>2</sup>。由此可见,“物化法+生物法”耦合工艺是当前处理豆制品废水的主流工艺。

但是,尽管现行处理工艺能够达到处理要求,但物化单元的气浮、混凝等操作会产生大量的污泥,其处理处置是行业难题;另一方面,物化单元能够去除废水中的大量悬浮物以及附着在悬浮物上的有机物质,虽然会降低后续处理负荷,但也减少了厌氧基质,沼气产量会下降,不利于资源化。因此,现有处理工艺可行但并不最优。此外,当前工程案例中关于豆制品废水脱氮、除磷的报道较少。随着环保要求的日趋严格,后续工程应用中应逐渐重视对豆制品废水中 TN、TP 的处理,并研发新工艺。

4 厌氧/好氧生物流化床联合处理新工艺处理工程案例

以某 300 m<sup>3</sup>/d 的豆制品生产废水处理工程为例,该工程采用本课题组研发的厌氧/好氧生物流化

床为主体的联合处理新工艺(见图 3)。该工艺克服了传统工艺运行费用高、占地面积广等缺点。该工艺中的厌氧生物流化床采用“螺旋对称流化厌氧生物反应器(SSSAB,ZL201410800301.2)”,好氧生物流化床采用“气升式外循环涡旋强化生物脱氮反应器(AFB,ZL201410321199.8)”,该工艺运行高效、稳定和经济。SSSAB 的 COD 负荷目前稳定在 20~30 kg/(m<sup>3</sup>·d)左右,COD 去除率>80%,系统 COD 去除率达 95%以上,最终出水水质达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准。该工艺占地面积仅约 200 m<sup>2</sup>,年 COD 削减量可达 400 t,年产沼气量 24 万 m<sup>3</sup>(其热值相当于 168 t 标准煤),约折合 40 万元人民币,为企业带来了良好的经济与社会效益。

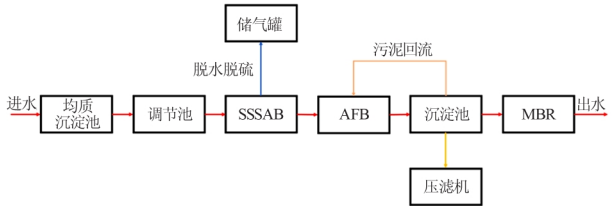


图 3 厌氧/好氧生物流化床联合处理新工艺流程

Fig. 3 New process flow of anaerobic/aerobic biological fluidized bed combined treatment

## 5 结语

无论是传统还是新兴豆制品生产过程废水,其中均含有寡糖、有机酸、可溶性蛋白和水溶性维生素等成分,其可生化性均较好。当前处理豆制品废水的主流工艺是“物化法+生物法”耦合工艺,但该工艺需要投加化学药剂,还会产生二次污染和大量剩余污泥,尽管可行但并不最优,亟需优化改进。此外,有关豆制品废水的膜分离和特殊细菌降解等高值利用技术虽然环保无污染,能够降低成本,但技术欠成熟,难以工程化。

现有大部分豆制品废水处理工程案例主要涉及对 COD 的去除,很少有关于豆制品废水中 TN 和 TP 的去除,未来应当研发高效脱氮除磷技术并应用于工程,同时优化现有工艺组合。另外,现行处理工艺虽然能够使部分出水指标(如 COD 和 pH 等)达标,但豆制品行业是薄利行业,如何以更低成本、更高效率、更小占地面积的工艺处理废水(如厌氧/好氧生物流化床联合处理新工艺)将成为今后研发的重点。而在对豆制品废水进行高值利用方面,回收废水中的大量低聚糖和可溶性蛋白不失为一个资源化的好方法。

### 参考文献

- [1] FAS Office of Agricultural Affairs (Beijing, China). Oilseeds and products annual[EB/OL]. [2018-03-20]. <https://www.fas.usda.gov/data/china-oilseeds-and-products-annual-3>.
- [2] 吴月芳. 中国大豆食品行业状况及对食品大豆发展的建议[J]. 食品工业科技, 2016, 37(17): 14-18.
- [3] GB 2712—2014 食品安全国家标准 豆制品[S].
- [4] 李德远, 李玮, 叶志能, 等. 豆制品加工业现状及发展对策研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(2): 220-222.
- [5] XUE Zhaoxia, WANG Cheng, CAO Jiashun, et al. An alternative carbon source withdrawn from anaerobic fermentation of soybean wastewater to improve the deep denitrification of tail water[J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, 132: 217-224.
- [6] 刁宁宁, 张建国, 李保国. 豆制品废水资源化利用研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(1): 20-24.
- [7] SHI Min, YANG Yingnan, HU Xuansheng, et al. Effect of ultrasonic extraction conditions on antioxidative and immunomodulatory activities of a *Ganoderma lucidum* polysaccharide originated from fermented soybean curd residue[J]. Food Chemistry, 2014, 155: 50-56.
- [8] 赵冬梅, 刘凌, 张京健. 豆制品生产中高浓度废水的检测与分析[J]. 食品与发酵工业, 2006(1): 68-71.
- [9] ZHU Gefu, LI Jianzheng, WU Peng, et al. The performance and phase separated characteristics of an anaerobic baffled reactor treating soybean protein processing wastewater[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17): 8027-8033.
- [10] YU Yaqin. Research on soybean protein wastewater treatment by the integrated two-phase anaerobic reactor[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015, 22(5): 526-531.
- [11] 姜栋, 刘锋, 陆成栋, 等. 气升环流反应器处理高氨氮豆制品废水[J]. 中国给水排水, 2014, 30(6): 58-61.
- [12] 尤鑫, 刘海燕, 邹磊, 等. 豆制品废水处理工程设计实例及分析[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 106-108.
- [13] 王建西, 崔战胜, 王海军, 等. 豆制品产业园废水处理项目设计及运行[J]. 中国给水排水, 2018, 34(24): 105-108.
- [14] 曾科, 吴连成, 金涛, 等. 酸化大豆蛋白废水的厌氧处理[J]. 环境工程, 2009, 27(2): 55-57.
- [15] 侯薇, 薛嵘, 孙春玲, 等. 气浮-水解-UASB-两级 A/O 工艺处理大豆蛋白废水[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(1): 88-90.
- [16] 曾科, 于鲁冀, 孟凡超, 等. 厌氧处理含动植物油脂废水的设计和运行[J]. 工业水处理, 2006, 26(8): 78-80.
- [17] 卞文国. 豆制品高浓度有机废水的处理[J]. 上海环境科学, 1985(5): 15-18.
- [18] 黄一南, 宋跃进, 王琴芳, 等. 厌氧-氧化塘系统工程处理豆制品废水[J]. 环境污染与防治, 1984(5): 33-36.
- [19] 缪畅, 邱运仁. NF-RO 组合膜处理大豆乳清废水[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(4): 1623-1627.
- [20] 袁其朋, 马润宇. 膜分离技术处理大豆乳清废水[J]. 水处理技术, 2001(3): 161-163.
- [21] 刘宇, 张国治, 黄纪念, 等. 絮凝-超滤处理豆制品废水研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2015, 36(2): 52-57.
- [22] FENG Xiao, REN Nanqi, CHEN Zhaobo. Performance of ultrafiltration membrane technology in treatment of soy whey wastewater[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(6): 1477-1486.
- [23] 吴月芳. 从日本豆制品行业现状看中国传统豆制品行业发展[J]. 中国食品工业, 2006(4): 38-39.
- [24] 王秋霜, 应铁进. 大豆制品生产废水综合开发研究进展[J]. 食品科学, 2007(9): 594-599.
- [25] 陈亮, 朱铮. AB 活性污泥法处理豆制品废水的工艺研究[J]. 上海环境科学, 1997(2): 19-21.
- [26] SU Kuizu, YU Hanqing. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater[J]. Environ. Sci. Technol., 2005, 39(8): 2818-2827.
- [27] 杜天星, 费庆志, 许芝. 八级生物接触氧化处理豆制品废水[J]. 大连交通大学学报, 2008(3): 67-69.
- [28] 曹建平, 许婷, 刘寅, 等. 气浮-改良活性污泥法处理豆制品废水[J]. 给水排水, 2013, 49(9): 62-65.
- [29] LI Xiaoxia, XU Ke, FU Weichao, et al. Simultaneous in-situ excess sludge reduction and removal of organic carbon and nitrogen by a pilot-scale continuous aerobic-anaerobic coupled(CAAC) process for deeply treatment of soybean wastewater[J]. Biochemical Engineering Journal, 2014, 85: 30-37.

- [30] 胡明成,龙腾锐.大豆蛋白加工废水厌氧处理工艺的优化配置[J].给水排水,2009,45(5):179-182.
- [31] DONG Fang,ZHAO Quanbao,ZHAO Jinbao,et al. Monitoring the restart-up of an upflow anaerobic sludge blanket(UASB) reactor for the treatment of a soybean processing wastewater[J]. Bioresource Technology,2010,101(6):1722-1726.
- [32] 韩丽华.大豆分离蛋白工艺废水厌氧生物净化的研究[J].中国油脂,1999(4):67-69.
- [33] 陈洪斌,张国政,高廷耀.厌氧折流板反应器处理豆制品废水的研究[J].中国沼气,1999(1):3-5.
- [34] 鲍立新,李建政,昌盛,等. ABR 处理大豆蛋白废水的效能及微生物群落动态分析[J].环境科学,2008(8):2206-2213.
- [35] 孙凯,陆晓峰,周保昌,等. EGSB 反应器处理高浓度豆制品废水的研究[J].水处理技术,2010,36(8):108-112.
- [36] YU Hanqing,HU Zhenhu,HONG Tianqiu,et al. Performance of an anaerobic filter treating soybean processing wastewater with and without effluent recycle[J]. Process Biochemistry,2002,38(4):507-513.
- [37] 鹿时雨,高宝玉,元秋波,等.中试规模 IC 反应器处理大豆蛋白废水的颗粒污泥培养和启动[J].环境工程学报,2016,10(3):1070-1074.
- [38] 王亮,李风亭,刘华,等. ASBR 反应器处理豆制品废水[J].水处理技术,2005(9):56-60.
- [39] 梁家骊,马克森,苏京军,等.用多级厌氧消化器处理豆腐废水[J].生物工程学报,1991,7(4):365-371.
- [40] APPELS L,BAEYENS J,DEGREVE J,et al. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge[J]. Prog. Energy Combust. Sci.,2008,34(6):755-781.
- [41] 杨秀山,汪洪杰,石晓东,等.厌氧-缺氧-好氧工艺去除废水中 COD、氮和磷的研究[J].中国环境科学,1995,15(4):298-301.
- [42] 周保昌,孙凯,陆晓峰,等. EGSB/SPMBR 工艺深度处理高浓度豆制品废水[J].中国给水排水,2010,26(17):19-22.
- [43] GUO Kangying,SHANG Yanan,GAO Baoyu,et al. Study on the treatment of soybean protein wastewater by a pilot-scale IC-A/O coupling reactor[J]. Chemical Engineering Journal,2018,343:189-197.
- [44] 茹征微,彭武厚,宋宝康,等.豆制品加工废水的厌氧处理研究[J].上海环境科学,1989(12):13-16.
- [45] 卫祥云,吴月芳.中国大豆食品产业发展状况[J].中国食物与营养,2010(6):4-7.
- [46] LU Haifeng,ZHANG Guangming,DAI Xiao,et al. Photosynthetic bacteria treatment of synthetic soybean wastewater;Direct degradation of macromolecules[J]. Bioresource Technology,2010,101(19):7672-7674.
- [47] WU Pan,ZHANG Guangming,LI Jianzheng.  $Mg^{2+}$  improves biomass production from soybean wastewater using purple non-sulfur bacteria[J]. Journal of Environmental Sciences,2015,28:43-46.
- [48] HE Junguo,ZHANG Guangming,LU Haifeng. Treatment of soybean wastewater by a wild strain *Rhodobacter sphaeroides* and to produce protein under natural conditions[J]. Front. Environ. Sci. Eng. China,2010,4(3):334-339.
- [49] 何萍,邱奉同,杨启银,等.光合菌处理豆制品废水影响因素的研究[J].临沂师范学院学报,2001(6):56-59.
- [50] 樊凌雯,徐军,曲运波,等.光合细菌处理大豆深加工废水的研究[J].山西大学学报:自然科学版,1999(3):82-85.
- [51] 马杰,吕跃钢,何亚明.光合细菌处理豆制品废水影响因素的探讨[J].北京轻工业学院学报,2000(1):5-9.
- [52] 郑耀通,吴小平,高树芳.光合细菌处理高浓度黄泔水试验研究[J].江西农业大学学报:自然科学版,2002(3):393-397.
- [53] 王虹,刘宏斌,刘娟.光合细菌降解 3 种有机废水的试验研究[J].西北大学学报:自然科学版,1994(3):235-240.
- [54] LIU Shuli,ZHANG Guangming,ZHANG Jie,et al. Performance,5-aminolevulinic acid(ALA) yield and microbial population dynamics in a photobioreactor system treating soybean wastewater;Effect of hydraulic retention time(HRT) and organic loading rate(OLR)[J]. Bioresource Technology,2016,210:146-152.
- [55] 刘双江,杨惠芳,周培瑾,等.固定化光合细菌处理豆制品废水产氢研究[J].环境科学,1995,16(1):42-44.
- [56] 冯运玲,吴珊,唐宝忠,等.酵母菌处理黄泔水试验研究[J].环境工程,2000,18(2):11-13.
- [57] QIU Yiting,ZU Yilin,SONG Chunfeng,et al. Soybean processing wastewater purification via *Chlorella* L166 and L38 with potential value-added ingredients production[J]. Bioresource Technology Reports,2019,7:100195.
- [58] 史家梁,翁稣颖,徐亚同.光合细菌在废水处理中的应用及菌体的综合利用[J].微生物学通报,1981(4):186-188.
- [59] 陈洪斌,高廷耀,唐贤春.豆制品废水生物处理的研究与应用进展[J].中国沼气,2000(3):13-16.
- [60] 伍军,艾启俊,于同泉,等.大豆黄浆水处理过程中超滤膜的选择[J].北京农学院学报,2003,18(3):223-225.
- [61] 王洪波,曹龙奎.豆制品加工中黄浆水无害化处理技术研究[J].农产品加工:学刊,2007(6):33-35.
- [62] 祁佩时,吕斯濠.超滤法处理大豆蛋白废水及资源回收的研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(8):1138-1141.
- [63] 徐朝辉,万端极,崔朝亮,等.膜技术在处理大豆乳清废水中的应用[J].中国油脂,2007(1):68-70.
- [64] WANG Lianjie,WU Zhaoliang,ZHAO Bin,et al. Enhancing the adsorption of the proteins in the soy whey wastewater using foam separation column fitted with internal baffles[J]. Journal of Food Engineering,2013,119(2):377-384.
- [65] WEI Zong,MA Hanjun. Adsorption of soybean isoflavones from soybean whey wastewater with magnetic AB-8 resin[C]//The 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE 2008). Shanghai,IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,2008:2739-2741.
- [66] 陈松林,梁秀茹,郭瑞珍,等.黄浆水综合利用的小试研究[J].食品科学,1995(1):40-41.

(下转第 27 页)

- [10] KUNETZ T E, OSKOUIE A, POONSAPAYA A, et al. Innovative membrane-aerated biofilm reactor pilot test to achieve low-energy nutrient removal at the Chicago MWRD[C]//WEFTEC. Proceeding of the Water Environment Federation, New Orleans, 2016.
- [11] PELLICER-NACHER C, SMETS B F. Structure, composition, and strength of nitrifying membrane-aerated biofilms[J]. Water Research, 2014, 57: 151-161.
- [12] SUNNER N, LONG Zebao, HOUWELING D, et al. MABR as a low-energy compact solution for nutrient removal upgrades—Results from a demonstration in the UK[C]//WEFTEC. Proceeding of the Water Environment Federation, Virginia, 2018.
- [13] TIAN Hailong, LIU Jie, FENG Tengfeng, et al. Assessing the performance and microbial structure of biofilms adhering on aerated membranes for domestic saline sewage treatment[J]. RSC Advances, 2017, 7(44): 27198-27205.
- [14] HOU Feifei, LI Baoan, XING Minghao, et al. Surface modification of PVDF hollow fiber membrane and its application in membrane aerated biofilm reactor(MABR)[J]. Bioresource Technology, 2013, 140: 1-9.
- [15] TIAN Hailong, ZHAO Jieyu, ZHANG Hongyu, et al. Bacterial community shift along with the changes in operational conditions in a membrane-aerated biofilm reactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(7): 3279-3290.
- [16] 张杨, 李庭刚, 强志民, 等. 膜曝气生物膜反应器研究进展[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1133-1143.
- [17] TERADA A, HIBIYA K, NAGAI J, et al. Nitrogen removal characteristics and biofilm analysis of a membrane-aerated biofilm reactor applicable to high-strength nitrogenous wastewater treatment[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2003, 95: 170-178.
- [18] 李意, 张凯松. MABR 处理二级出水深度脱氮的中试研究[J]. 工业水处理, 2018, 38(1): 35-38.
- [19] 陈文华, 潘超群, 厉雄峰, 等. MABR 技术在农村生活污水处理上的应用[J]. 水处理技术, 2019, 45(5): 126-128.
- [20] 李保安, 闫庆元, 于文志, 等. 无泡曝气膜生物反应器去除生活污水有机物的研究[J]. 膜科学与技术, 2009, 29(6): 56-59.
- [21] 李保安, 李鹏. MABR 处理受污染河道水的试验研究[C]. 中国—欧盟膜技术研究与应用研讨会论文集. 北京: 膜科学与技术编辑部, 2015.
- [22] 李浩, 李鹏, 李波, 等. MABR 用于城市景观河道水体修复的研究[J]. 膜科学与技术, 2016, 36(6): 101-107.
- [23] UNDERWOOD A, MCMAINS C, COUTTS D. Design and startup of the first full-scale membrane aerated biofilm reactor in the United States[C]//WEFTEC. Proceeding of the Water Environment Federation, Virginia, 2018.
- [24] PEETERS J, ADAMS N, LONG Z, et al. Demonstration of innovative MABR low-energy nutrient removal technology at Chicago MWRD[J]. Water Practice and Technology, 2017, 12(4): 927-936.
- [作者简介] 石岩(1980—), 博士, 正高级工程师。E-mail: 13920090062@163.com。通讯作者: 段云霞, 博士, 正高级工程师。E-mail: duanyx@126.com。
- [收稿日期] 2021-06-16(修改稿)
- 
- (上接第 21 页)
- [67] LI G, WU D, DAI Z. The application of membrane technology in concentrating soybean oligosaccharides[J]. Membrane Science and Technology, 2002, 22(1): 29-31.
- [68] 李通. 利用豆制品废水(黄浆水)工业化生产面包酵母和药用酵母[J]. 上海调味品, 1982(1): 40-43.
- [69] YONEZAWA N, MATSUURA H, SHIHO M, et al. Effects of soybean curd wastewater on the growth and hydrocarbon production of *Botryococcus braunii* strain BOT-22[J]. Bioresource Technology, 2012, 109: 304-307.
- [70] WANG Shikai, WANG Xu, MIAO Jing, et al. Tofu whey wastewater is a promising basal medium for microalgae culture[J]. Bioresource Technology, 2018, 253: 79-84.
- [71] YU Yue, ZHU Xuan, SHEN Yubiao, et al. Enhancing the vitamin B12 production and growth of *Propionibacterium freudenreichii* in tofu wastewater via a light-induced vitamin B12 riboswitch[J]. Appl. Microbiol. Biotechnol., 2015, 99(24): 10481-10488.
- [72] 蒋和团. 大豆分离蛋白生产废水污染治理的综合分析[J]. 工业水处理, 2010, 30(4): 77-80.
- [73] 潘登, 文志军, 董新华, 等. UASB/生物接触氧化工艺处理豆制品废水[J]. 中国给水排水, 2007, 23(18): 59-62.
- [74] 王宗华, 石智慧, 王志钦. 豆制品废水处理工程[J]. 水处理技术, 2010, 36(10): 125-127.
- [75] 李善评, 王兆祥, 庞艳, 等. 二级厌氧生物滤池处理大豆加工废水[J]. 工业水处理, 2006, 26(7): 68-71.
- [76] 梁延周. 豆制品生产废水处理工程[J]. 给水排水, 2007(6): 60-62.
- [77] 田葳, 张伦秋. 水解酸化-SBR 工艺处理豆腐加工废水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 116-119.
- [78] 郑海军, 郑重, 刘会成, 等. 豆制品生产工艺废水处理工艺设计[J]. 水处理技术, 2012, 38(7): 128-130.
- [79] 李宁, 陈云翔, 姜友蕾, 等. 厌氧-好氧工艺处理豆制品废水[J]. 中国给水排水, 2014, 30(20): 130-132.
- [作者简介] 王廷林(1997—), 硕士研究生。电话: 19121732843。通讯作者: 陈小光, E-mail: cxg@dhu.edu.cn。
- [收稿日期] 2021-06-15(修改稿)