



食品工业科技

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF FOOD INDUSTRY

半月刊

权威 · 核心 · 领先 · 实用 · 全面

美国《化学文摘》CA

日本科学技术振兴机构数据库JST

北大核心期刊

中国生物医学文献系统SinoMed收录期刊

中国精品科技期刊

英国《食品科技文摘》FSTA

中国科技核心期刊CSTPCD

RCCSE中国核心学术期刊

中国农林核心期刊A

大豆乳清废水的回收利用研究进展

孙慧雯, 邹雅婷, 马欣悦, 刘苗苗, 李 瑞

Research Progress on Recycling of Soy Whey Wastewater

SUN Yiwen, ZOU Yating, MA Xinyue, LIU Miaomiao, and LI Rui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120174>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

抗运动疲劳食源性活性成分的研究进展

Research and Development of Active Ingredients from Food Sources for Anti-motion Fatigue

食品工业科技. 2020, 41(24): 344-353

玉米须活性成分提取及其保健机理研究进展

Extraction of Active Ingredients from Corn Silk (*Zea mays* L.) and Its Health Care Mechanism

食品工业科技. 2021, 42(8): 388-395

苹果酸-乳酸发酵对葡萄酒中活性成分的影响

Effect of Malolactic Fermentation on the Active Ingredients in Wine

食品工业科技. 2020, 41(7): 358-364

灵芝孢子粉生物活性成分及药理作用

Research Progress in Bioactive Ingredients and Pharmacological Functions of *Ganoderma lucidum* Spores

食品工业科技. 2020, 41(6): 325-331

苏丹红I在辣椒活性成分辣椒红和辣椒油树脂提取过程中的迁移规律研究

Study on the Migration of Sudan I during the Extraction Process of Active Ingredients of Pepper: Capsicum Red and Capsicum Oleoresin

食品工业科技. 2021, 42(15): 72-77

连翘叶成分及生物活性研究进展

Research Progress on Composition and Biological Activity of *Forsythia suspensa* Leaves

食品工业科技. 2020, 41(18): 344-352



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙慧雯, 邹雅婷, 马欣悦, 等. 大豆乳清废水的回收利用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 451–457. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120174

SUN Yiwen, ZOU Yating, MA Xinyue, et al. Research Progress on Recycling of Soy Whey Wastewater[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(1): 451–457. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120174

大豆乳清废水的回收利用研究进展

孙慧雯, 邹雅婷, 马欣悦, 刘苗苗, 李 瑞*
(济宁医学院生物科学学院, 山东日照 276826)

摘 要:大豆乳清废水(SWW)是豆腐和大豆分离蛋白生产过程产生的废水。该废水排放量大, 且富含大豆乳清蛋白、低聚糖和大豆异黄酮等有机物。目前, 大部分企业将该废水排放至污水处理厂进行生化处理, 不仅造成豆腐和大豆分离蛋白生产成本的增加, 还导致大量有机物的流失。因此, 资源化大豆乳清废水成为企业亟待解决的难题。鉴于此, 本文从回收大豆乳清废水中的活性成分和生物转化大豆乳清废水两个角度, 综述了近年来大豆乳清废水资源化的相关研究报道, 并指出了两种策略的优缺点。研究发现, 大部分大豆乳清废水资源化方法尚处于实验阶段, 仅在废水中大豆乳清蛋白的回收并用于动物饲料与生物转化为沼气两个方面实现了工业化生产。针对上述现状, 提出在未来应从以下三个方面进行研究以促进大豆乳清废水资源化的大规模资源化: 降低大豆乳清废水中活性成分的分离成本并提高其利用价值; 提高大豆乳清废水生物转化效率、转化率和产品附加值; 对资源化方法进行经济效益核算, 评估其工业化的可能性。

关键词:大豆乳清废水, 活性成分, 回收, 生物转化

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)01-0451-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120174



本文网刊:

Research Progress on Recycling of Soy Whey Wastewater

SUN Yiwen, ZOU Yating, MA Xinyue, LIU Miaomiao, LI Rui*

(School of Biological Science, Jining Medical University, Rizhao 276826, China)

Abstract: Soy whey wastewater(SWW) is produced in the production processes of tofu and soybean protein isolates. It has a large discharged volume and contains rich organic compounds such as whey soy proteins, oligosaccharides and soy isoflavones. At present, SWW is discharged into sewage plants and then treated via biochemical methods by most factories. This results in an increase in the production costs of tofu and soybean protein isolate and a large loss of the organics compounds. Therefore, the recycling of SWW has become a burning problem. On this ground, the studies on the recycling of SWW in recent years were reviewed from two perspectives: recovery of active compounds from SWW and biotransformation of SWW. The advantages and disadvantages of the two perspectives were also described. The results showed that most of the methods for recycling SWW were limited in a lab-scale. Only the recovery of whey soy proteins as animal feeds and biotransformation of SWW into biogas were operated in the industrial scale. On this basis, three future research directions were proposed for promoting the recycling of SWW: reducing the separation costs and increasing the use values of active compounds in SWW, increasing the transformation efficiency and rate of SWW and added values of corresponding products and evaluating the economic benefits of recycling methods to determine the feasibility of their industrialization.

Key words: soy whey wastewater; active ingredients; recovery; biotransformation

大豆是世界上主要的粮食和油料作物之一。大豆中含有丰富的优质蛋白质、钙、钾、铁、铜、锌等微量元素、维生素 B₁ 和 B₂、有机酸与纤维素等营养物质^[1-2], 所以大豆加工产品备受广大人民群众青睐。豆腐

(tofu)和大豆分离蛋白(soybean protein isolate, SPI)是大豆加工产品的主要原料, 但是在它们的生产过程中会产生大量的大豆乳清废水^[3], 其生产流程如图 1 所示。由图 1 可知, tofu 和 SPI 乳清废水分别

收稿日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(31700211); 国家级大学生创新训练计划项目(201910443009); 济宁医学院大学生创新训练计划项目(cx2020102)。

作者简介: 孙慧雯(2000-), 女, 本科, 研究方向: 生物分离工程, E-mail: Evenyw_Sun@163.com。

* 通信作者: 李瑞(1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 生物分离工程, E-mail: rui061289@163.com。

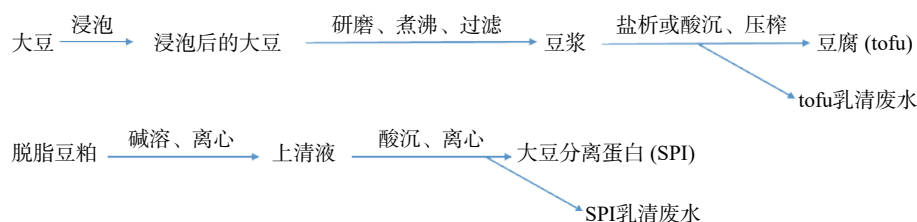


图 1 豆腐、大豆分离蛋白以及大豆乳清废水的生产流程

Fig.1 Workflow for production of tofu, soybean protein isolate (SPI) and soy whey wastewater

产生于从豆浆和碱溶上清液中提取豆腐和大豆分离蛋白的过程。因而其中含有大量的有机物(具体成分如表 1 所示), 所以大豆乳清废水的任意排放会对环境造成严重污染。目前, 大多数豆腐和大豆分离蛋白生产企业将大豆乳清废水排放至污水处理厂进行生化处理, 给企业造成了很大的经济负担。

表 1 豆腐和 SPI 乳清废水的成分分析
Table 1 Ingredients of tofu and SPI whey wastewater

成分(mg/mL)	豆腐乳清废水	SPI乳清废水
总蛋白	3800~4000 ^[4]	2000~4000 ^[5]
总糖	7000~20000 ^[4]	7000~15000 ^[5]
油脂	1700 ^[4]	/
总氮	800~1700 ^[4]	300~800 ^[5]
总磷	100~200 ^[4]	150~280 ^[5]
生化需氧量(BOD)	5000~10000 ^[4]	5000~8000 ^[5]
化学需氧量(COD)	20000~24000 ^[4]	15000~22000 ^[5]

从表 1 可知, 大豆乳清废水中含有大量的蛋白质和糖类物质。除此之外, 还含有大豆异黄酮等高价值有机物^[6]。这些有机物的回收利用, 不仅可以有效降低大豆乳清废水的处理成本和对环境的污染, 还能成为豆腐和大豆分离蛋白生产企业带来可观的经济收入。因此, 采用合适的策略综合利用大豆乳清废水, 对环境保护、节约资源和降低企业生产成本有重要的意义。目前, 大豆废水的资源化策略主要有两种: 一种是分别提取其中的活性成分加以利用, 包括蛋白质、低聚糖、异黄酮等有机物; 另一种是将大豆废水作为培养基用以生物转化产生新的产品^[3]。鉴于此, 本文将围绕上述两种策略对近年来大豆乳清废水的回收利用研究现状进行总结和分析, 并提出实现大豆乳清废水资源化所需进一步研究的问题。

1 大豆乳清废水中活性成分的回收

1.1 大豆乳清蛋白

大豆乳清蛋白(whey soy proteins, WSP)是大豆乳清废水中的酸溶蛋白, 主要包含胰蛋白酶抑制剂(包括 Kunitz 抑制剂和 Bowman-Birk 抑制剂)、细胞凝集素、脂肪氧化酶和 β -淀粉酶等组分^[7-8]。其中, 胰蛋白酶抑制剂具有良好的抑制癌症和抗虫害作用^[9], β -淀粉酶在工业上广泛用于水解淀粉生产麦芽糖。与此同时, WSP 整体还具有良好的泡沫和乳化性能^[8,10]。正是基于 WSP 在食品和医药领域的高潜在应用价值, 研究者们采用多种分离技术从大豆乳清

废水中回收了 WSP 单个组分及其整体。

1.1.1 WSP 的单组分回收 由于胰蛋白酶抑制剂和 β -淀粉酶的应用价值较高, 因此它们从大豆乳清废水中的分离研究首先取得了初步的进展。LI 等^[11]和 CHANG 等^[12]都用壳聚糖吸附法从 SPI 乳清废水中回收了 Kunitz 胰蛋白酶抑制剂。所不同的是, 前者先使目标物质吸附在壳聚糖上, 然后与多聚糖相互作用形成聚合物沉淀出来, 最后通过调控 pH 和蛋白质-壳聚糖的添加比除去壳聚糖和多聚糖, Kunitz 胰蛋白酶抑制剂的收率为 32%、纯度为 90%; 而后者是通过在 pH7.0 条件下壳聚糖上接枝三聚磷酸盐和京尼平作为吸附剂从 SPI 乳清废水中吸附 Kunitz 胰蛋白酶抑制剂, 其收率为 80.9%, 但其纯度低于前者。此外, 程芬芬等^[13]还采用硫酸钠盐析法从 SPI 乳清废水中回收了 20.54% 的 Kunitz 胰蛋白酶抑制剂, 然而其分离效果远低于 CHANG 等^[12]的研究结果。

陈超琴等^[14]利用超滤法从 SPI 乳清废水中回收了 92% 的 β -淀粉酶, 其酶活浓缩倍数为 9。为了进一步提高 β -淀粉酶的回收纯度, 关艳艳等^[15]在从 SPI 乳清废水中超滤浓缩 β -淀粉酶之后, 又对浓缩液进行了乙醇沉淀。结果表明, 超滤结合乙醇沉淀所得到的 β -淀粉酶的纯化倍数为 3.17, 远高于超滤得到 β -淀粉酶的纯化倍数(1.22)。因此, 超滤结合乙醇沉淀法可有效提高 β -淀粉酶的纯度, 但是也降低了 β -淀粉酶的活性收率(降低后为 77.54%)。

从上述研究可以看出, 回收 WSP 的单个组分需要多步分离操作才能完成, 并且每步的分离成本都相对较高, 这主要是由于大豆乳清废水中成分复杂且蛋白浓度相对较低。较高的分离成本抵消甚至高于每个蛋白组分的应用价值, 导致回收 WSP 的单个组分在经济上不合算, 因而一直未能实现工业化生产。

1.1.2 WSP 的整体回收 WSP 具有良好的泡沫和乳化性能, 因此更多学者倾向于从大豆乳清废水中整体回收 WSP 以用于食品领域。目前, 大豆乳清废水中的 WSP 整体回收技术主要包括絮凝法、膜分离法和泡沫分离法, 其优缺点对比如表 2 所示。

1.1.2.1 絮凝法 蛋白质絮凝是指通过向溶液中添加高分子有机物作为絮凝剂促进蛋白质的凝聚从而使蛋白凝聚物从溶液中分离出来。CHENG 等^[16]以壳聚糖为絮凝剂对 SPI 乳清废水中的 WSP 进行了絮凝, 随后又利用超滤对 WSP-絮凝剂混合物进行了

表 2 大豆乳清废水中的 WSP 的整体回收技术优缺点对比

Table 2 Advantages and disadvantages of techniques for recovering the whole WSP from soy whey wastewater

分离方法	优点	缺点	是否有工业化应用
絮凝法	收率高	WSP难以与絮凝剂分离, 回收的WSP应用价值不高	否
膜分离法	收率高, 回收的WSP仍能保持活性	膜污染严重, 导致分离成本高	否
泡沫分离法	成本低	收率较低, 回收的WSP大部分已丧失活性	是

回收, WSP 的最终收率可达 61.21%。XU 等^[17] 利用表没食子儿茶素没食子酸酯为絮凝剂先与 WSP 相互作用形成复合物, 随后复合物相互聚集为沉淀, 从而使 60.7% 的 WSP 从 SPI 乳清废水中分离出来, 所分离的 WSP 的纯度为 69.51% 且具有一定的抗凋亡活性。由此来看, 絮凝法可有效回收大豆乳清废水中的 WSP, 但是絮凝剂与所回收的 WSP 分离难度很大, 导致所回收的 WSP 应用价值不高甚至无法应用, 因而造成絮凝法在回收 WSP 方面应用前景不佳。

1.1.2.2 膜分离法 膜分离因其操作条件温和, 在蛋白质分离领域应用广泛, 所以很多研究者采用膜分离法从大豆乳清废水中成功回收了 WSP, 并获得了较高的回收率, 相关研究工作李琦等^[18] 已做了较为详细的总结概括。但由于大豆乳清废水粘度较高且成分复杂, 导致膜污染严重, 进而造成分离成本较高。所以, 膜分离技术在回收大豆乳清废水中 WSP 方面尚未实现工业化生产。近年来, 膜分离 WSP 相关研究工作的重点在于如何降低 WSP 回收过程中的膜污染。潘秋月等^[19] 采用转谷氨酰胺酶促进 WSP 聚合, 在提高分离效果的同时, 一定程度上降低了膜污染。CHENG 等^[16] 通过壳聚糖絮凝 WSP 也有效降低了膜污染。由此可见, 通过聚合增大 WSP 颗粒的粒径可望有效降低膜污染^[20], 从而促进膜分离技术在大豆乳清废水资源化中的工业化应用。但是, 所采用的促 WSP 聚合方法是否成本低廉、WSP 的聚合是否会降低其功能性等问题还有待进一步的研究。

1.1.2.3 泡沫分离法 泡沫分离是一项以气泡为介质分离溶液中表面活性物质的分离技术, 具有低浓度下效率高和成本低的优点^[21]。鉴于 WSP 良好的泡沫性能和在大豆乳清废水中的低浓度, 许多研究者对泡沫分离法回收废水中的 WSP 进行了研究。孙瑞婷等^[22] 通过提高泡沫分离过程的操作温度来提高 WSP 的富集比至 7.71, 采用两级泡沫分离法来提高 WSP 回收率至 82.75%。JIANG 等^[23] 采用斜壁式泡沫分离塔进一步强化了泡沫排液以提高 WSP 至 8.5, 同样采用两级泡沫分离法的 WSP 收率为 80%。随后, LI 等^[24] 开展了泡沫分离法回收 SPI 中 WSP 的中试实验, 并对所分离产品的泡沫性能和乳化性能进行了分析, 研究发现在加热的条件下 WSP 很容易聚集沉淀。基于 WSP 在泡沫分离过程中 WSP 容易聚集沉淀的现象, LI 等^[8] 通过改造泡沫分离技术开发了连续鼓泡和消泡工艺以强化 WSP 从 SPI 乳清废水中沉淀出来, 通过该工艺可以回收 88.4% WSP, 但

是所回收 WSP 的功能性已经完全丧失。山东绿邦生物科技有限公司采用泡沫分离法结合叠螺脱水从大豆乳清废水中每天回收每天生产含水率 83% 左右的 WSP 40 吨, 实现了泡沫分离法回收大豆乳清废水中 WSP 的工业化生产。由于所回收的 WSP 大部分已变性沉淀, 因此它作为动物饲料的蛋白源在市场上销售。虽然泡沫分离技术在回收 WSP 方面已经实现了工业化生产, 但是分离过程中聚集沉淀造成 WSP 功能性的丧失, 导致其利用价值大幅降低。因此, 如何保持功能活性对提高 WSP 的应用价值至关重要, 是泡沫分离 WSP 过程中需要进一步研究的问题。

1.2 大豆低聚糖

大豆乳清废水中的糖类物质主要为低聚糖, 包括水苏糖、棉子糖、蔗糖、乳糖、果糖和葡萄糖等^[3]。大豆低聚糖具有抗癌、降血脂和调节肠道菌群的作用^[25-27], 因此大豆低聚糖的回收利用对大豆乳清废水的资源化有积极的促进作用。目前, 大豆乳清废水中低聚糖的回收方法主要是超滤法, 即去除 WSP 后, 采用截留分子量为 10 kDa 的聚醚砜膜进行超滤处理, 低聚糖的收率约为 76%^[28-29]。此外, LI 等^[30] 利用 NF-3A 纳滤膜从大豆低聚糖发酵液中回收了纯度为 77.9% 大豆低聚糖, 其收率为 83.2%。该方法对有效提高大豆乳清废水中所回收低聚糖的纯度有重要的指导意义。

1.3 大豆异黄酮

大豆异黄酮是一种弱植物雌激素, 具有美容、抗癌和调节代谢的功能^[1]。由于小颗粒的异黄酮会悬浮于水中, 所以在豆腐和大豆分离蛋白生产过程中会随着大豆乳清废水流失。在大豆乳清废水中, 大豆异黄酮的浓度很低约为 0.4 g/L^[31], 这给其回收造成了很大的困难。目前, 大豆乳清废水中异黄酮的回收方法主要包括萃取法和吸附法。杨敬东等^[32] 分别采用乙酸乙酯萃取法和大孔树脂吸附法从大豆乳清废水中回收异黄酮, 并对这两种分离方法进行了对比分析。实验结果表明, 通过这两种方法大豆异黄酮的收率均可达到 60%。考虑到大豆乳清废水的排放量大, 乙酸乙酯的用量会很大, 导致萃取法的成本较高。因而大孔树脂吸附特别是动态吸附流程是更为合适的大豆异黄酮分离技术。

由于大豆异黄酮与 WSP 有很好的络合作用, 所以 LIU 等^[33] 以 WSP 为捕集剂采用两级泡沫分离法从 SPI 乳清废水中回收了大豆异黄酮, 其富集比和

回收率分别为 4.05 和 87.72%, 实现了大豆异黄酮的有效回收。在此基础上, 通过调控温度和 pH 使 WSP 与大豆异黄酮分离开来^[34], 在用泡沫分离法除去 WSP 后, 通过酸解将葡萄糖苷型异黄酮转化为异黄酮苷元增强其活性, 并采用壳聚糖微球法有效回收了异黄酮苷元^[35]。基于大豆乳清废水中的复杂组成和大豆异黄酮的低浓度, 采用泡沫分离法这一成本低效率高的技术对大豆乳清废水中的异黄酮进行初步的浓缩, 然后再采用萃取或吸附法进一步回收, 要比直接从大豆乳清废水中直接萃取或吸附大豆异黄酮从节约成本的角度考虑更为合适。

2 大豆乳清废水的生物转化

从上述分析来看, 大豆乳清废水中成分复杂, 单独回收其中的活性成分是非常困难的。并且废水中含有丰富的糖、蛋白质、氨基酸和无机盐等营养物质, 非常有利于微生物的生长。因此, 很多研究者直接将大豆乳清废水作为底物通过微生物发酵将其转化为附加值更高的产物, 如单细胞蛋白、生物柴油、维生素、氨基酸、5-氨基乙酰丙酸、虾青素和乳酸等, 刁宁宁等^[1]已对上述产品的早期相关工作进行了分析总结, 在本文中不再赘述。下面将对近年来关于大豆乳清废水生物转化上述部分产品新的研究和其他新产品的研究进行概括总结。

2.1 微藻

微藻当中含有丰富的油脂, 是生物柴油的重要来源之一, 同时还富含其他的营养物质。大豆乳清废水中的营养物质丰富因而适合微藻的生长, 因此它作为微藻的培养底物备受青睐。RIZKYTATA 等^[36]利用含有 20%~30% 豆腐乳清废水的培养基对小球藻进行了培养, 在得到 23% 的产率的同时, 还有效降低了豆腐乳清废水的 BOD、COD、磷酸盐和铵盐的浓度。WANG 等^[37]以常规绿藻培养基(BG-11)为参照, 考察了小球藻在豆腐乳清废水中的生长情况, 实验结果表明豆腐乳清废水更有利于小球藻的生长。在考察豆腐乳清废水对小型黄丝藻生长影响的过程中, WANG 等^[38]也发现了相似的结论, 即采用豆腐乳清废水为培养基小型黄丝藻的生物量比以 BG-11 为培养基时增加了约 1.5 倍。此外, SHEN 等^[39]发现豆腐乳清废水也非常适合斜生栅藻的生长。综上所述, 多种微藻适合生长于大豆乳清废水中, 这样不仅可以产生大量的生物量, 还能有效降低废水的处理成本。因此, 利用微藻处理大豆乳清废水的工业前景非常可观。

2.2 沼气

随着环境友好型社会建设的推进, 沼气因其无色、无味、无毒的优点而日益成为家庭和工业上常用的主要能源之一。由于生物燃气主要以农业废物为底物通过微生物发酵而得, 所以很多研究者尝试利用大豆乳清废水发酵来生产沼气。例如, SYAICHURROZI^[40-41]尝试了利用酿酒酵母发酵豆腐乳清废水来生产沼气,

结果表明通过适当的调整 pH 利用豆腐乳清废水发酵可以有效地产生沼气。RAHAYU^[42]研究了温度、污泥和固含量对豆腐乳清废水发酵产沼气的影响, 发现在 30 ℃ 条件下向豆腐乳清废水中添加 20% 的污泥可有效提高沼气的产量。鉴于大豆乳清废水发酵产沼气过程简便且具有很好的可行性, 目前在国内外已经实现的较大规模的工业化生产^[43-44], 成为大豆乳清废水资源化的主要方法之一。

2.3 大豆乳清功能饮料

由于大豆乳清废水中的糖、蛋白质和大豆异黄酮等物质均具有有益人体的功能活性, 因此 CHUA 等^[45]利用葡萄酒酵母发酵大豆乳清废水将其转化为了大豆酒精饮品, 在发酵的过程中糖苷类的异黄酮转化为了苷元型的异黄酮, 一些具有芳香味的化合物转化为了新的脂类物质和高级醇, 有效增强了大豆酒精饮品的功能性。TU 等^[46]采用红茶菌群将大豆乳清废水转化为了一种新型的功能性饮料, 在转化过程中大豆乳清废水的抗氧化性能和抗菌性能得到了有效的提高, 同时还产生了一些具有芳香味的物质。AZI 等^[47]也将大豆乳清废水转化为了一种饮品, 但是其利用的是含有乳酸菌、酿酒酵母和毕赤酵母的混合菌群, 在发酵过程中新合成了短肽、肽类物质和黄酮类物质, 同时糖苷类异黄酮和大豆皂甙被降解, 大豆乳清废水的 ACE 抑制活性和 DPPH 自由基清除能力得到了有效的提升。综合来看, 大豆乳清废水制备功能性饮品是可行的。目前, 日本已利用大豆乳清废水开发出功能性饮料并得到市场的认可, 但在国内还未有相关产品。

2.4 其他产品

大豆乳清废水中的丰富营养除了能满足上述研究中菌株的生长所需, 还适合其他菌株的生长并生产有益的产品, 具体如表 3 所示。大豆乳清废水营养成分多样, 可同时满足多种微生物的生长, 可协作生产同一目的产物。例如, LAY 等^[48]向 COD 为 20 g/L 的豆腐废水中添加活性污泥, 在 35 ℃ 和 pH5.5~6.0 条件下进行间歇发酵, 获得氢气的产量为 107.5 mL/g COD。CHEN 等^[49]利用豆腐乳清废水在 70 ℃ 培养含有热杆菌和杆菌等的混合菌群可生产醋酸纤维素。也可在大豆乳清废水中在不同的培养条件下, 利用同一菌株生产不同的产物。YU 等^[50]在光诱导的条件下利用费氏丙酸杆菌和豆腐乳清废水生产了维生素 B₁₂。而陈跃文等^[51]在豆腐乳清废水中无光诱导条件下培养费氏丙酸所得产物还有一定的抑菌作用, 培养其他菌株如杆菌丙酸菌和罗伊氏乳杆菌的产物也获得了抑菌产物。此外, 王薇等^[52]以豆腐乳清废水为原料, 添加 2.0% 豆粕粉、1.0% 玉米粉、0.5% MgSO₄·7H₂O 和 10% 紫红曲霉, 调整 pH 至 5.5, 培养 7 d 获得了色价为 183 U/mL 的红曲色素。FANG 等^[53]利用豆腐乳清废水培养蜡样芽胞杆菌有效增强了生物水泥的可压缩性。WANG 等^[54]和

LEE 等^[55] 利用豆腐乳清废水效促进了裂殖壶菌的生长并产生了高附加值产物二十二碳六烯酸, 在培养过程中废水的 BOD 和 COD 降低了约 60%。综上可得, 利用豆腐乳清废水可获得多种有益产物, 从而促进其资源化利用。但是上述研究均处于实验室阶段, 是否能真正走向工业化生产还有待进一步研究。

表 3 大豆乳清废水生物转化所得其他产品及相应菌株
Table 3 Products obtained by biotransformation of soy whey wastewater and corresponding used microorganisms

产品	菌株	参考文献
氢气	活性污泥	[48]
醋酸纤维素	混合菌群(热杆菌、杆菌等)	[49]
维生素B ₁₂	费氏丙酸杆菌	[50]
抑菌物质	丙酸菌、费氏丙酸杆菌以及罗伊氏乳杆菌	[51]
红曲色素	紫红曲霉	[52]
生物水泥	蜡样芽胞杆菌	[53]
二十二碳六烯酸	裂殖壶菌	[54-55]

3 结语与展望

目前, 已有大量方法用于大豆乳清废水的资源化, 概括为两个方面: 一, 回收大豆乳清废水中的有机物加以利用; 二, 生物转化大豆乳清废水为有用的物质。然而仅有少量的方法实现了工业化生产, 例如, 大豆乳清蛋白的回收并用于动物饲料与大豆乳清废水生物转化为沼气。大部分的研究还停留在实验阶段, 尚未实现工业化生产。其主要原因在于: a. 大豆乳清废水中成分复杂且活性成分浓度相对较低导致回收成本很高, 经济效益不显著; b. 生物转化法处理大豆乳清废水的效率低。

由于大豆乳清废水的排放量很大, 因此需要综合利用多种方法来实现其资源化。在未来可开展以下三方面的研究以促进大豆乳清废水的大规模资源化: a. 开发并进一步优化效率高且低成本的分离工艺回收大豆乳清废水中的有机物, 并提高所回收有机物的利用价值; b. 开发新的并进一步优化现有的大豆乳清废水生物转化方法, 提高转化效率、转化率和产品附加值; c. 对所开发的资源化方法进行经济效益核算, 评估其是否适合工业化生产。

参考文献

[1] 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. [DIAO N N, ZHANG J G, LI B G. The utilization research of soybean wastewater[J]. Food and Fermentation Technology, 2015, 51(1): 20-24.]

[2] WANG Y, SERVENTI L. Sustainability of dairy and soy processing: A review on wastewater recycling[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237: 117821.

[3] CHUA J Y, LIU S Q. Soy whey: More than just wastewater from tofu and soy protein isolate industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 91: 24-32.

[4] 车颖洁. 利用黄浆水发酵生产单细胞蛋白技术研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2017. [CHE Y J. Study on the production of

single cell protein by fermentation of yellow water [D]. Jinzhong: Shangxi Agricultural University, 2017.]

[5] 元秋波. 混凝+IC 工艺处理大豆蛋白废水研究[D]. 济南: 山东大学, 2014. [QI Q B. Research on coagulation-IC reactor process in the treatment of soybean protein wastewater[D]. Jinan: Shandong University, 2014.]

[6] JANG H H, NOH H, KIM H W, et al. Metabolic tracking of isoflavones in soybean products and biosamples from healthy adults after fermented soybean consumption[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127317.

[7] 杜明, 刘鹤楠, 易华西, 等. 大豆乳清蛋白研究进展[J]. 食品工业科技, 2008, 29(2): 302-304. [DU M, LIU H N, YI H X, et al. Review on soy whey proteins[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2008, 29(2): 302-304.]

[8] LI R, JI X, ZHU Y, et al. Precipitation of proteins from soybean whey wastewater by successive foaming and defoaming[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2018, 128: 124-131.

[9] 俞红恩, 康玉凡. 豆类胰蛋白酶抑制剂研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(4): 265-269. [YU H E, KANG Y F. Research progress in legume trypsin inhibitor[J]. *Food Industry*, 2017, 38(4): 265-269.]

[10] 韩天翔, 李杨, 毕爽, 等. 磷脂对大豆乳清蛋白乳化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(2): 13-20. [HAN T X, LI Y, BI S, et al. Effect of phospholipids on emulsifying properties of soy whey proteins[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(2): 13-20.]

[11] LI X, DONG D, HUA Y, et al. Soybean whey protein/chitosan complex behavior and selective recovery of kunitz trypsin inhibitor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(29): 7279-7286.

[12] CHANG Y L, LIU T C, TSAI M L. Selective isolation of trypsin inhibitor and lectin from soybean whey by chitosan/tripolyphosphate/genipin co-crosslinked beads[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2014, 15(6): 9979-9990.

[13] 程芬芬, 刘春, 杨晓泉. 大豆胰蛋白酶抑制剂的制备及性质[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 37-44. [CHENG F F, LIU C, YANG X Q. Preparation and properties of soybean trypsin inhibitor[J]. *Food Science*, 2017, 38(3): 37-44.]

[14] 陈超琴, 赵黎明, 蒋丽华, 等. 大豆乳清中 β -淀粉酶的超滤提取技术研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 240-243. [CHEN C Q, ZHAO L M, JIANG L H, et al. Extraction of β -amylase from the soybean whey wastewater by ultrafiltration technology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(23): 240-243.]

[15] 关艳艳, 牛延宁, 贾彩凤, 等. 大豆乳清废水中 β -淀粉酶工业生产工艺的研究[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 293-297. [GUAN Y Y, NIU Y N, JIA C F, et al. Industrial production research of β -amylase from soybean whey wastewater[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(6): 293-297.]

[16] CHENG J, XIE S, WANG S, et al. Optimization of protein removal from soybean whey wastewater using chitosan ultrafiltration[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(2):

e12370.

- [17] XU Z, HAO N, LI L, et al. Valorization of soy whey wastewater: How epigallocatechin-3-gallate regulates protein precipitation[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(18): 15504–15513.
- [18] 李琦, 李军霞. 现代膜分离技术及其在大豆加工中的应用[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(5): 380–383. [LI Q, LI J X. Modern membrane separation technology and its application in the processing of soybean[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(5): 380–383.]
- [19] 潘秋月, 孟祥河. 酶聚合结合超滤技术分离豆腐废水乳清蛋白的工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(11): 74–79. [PAN Q Y, MENG X H. Enzymatic cross-linking coupled with ultra-filtration technology to isolate soy whey protein[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2013, 28(11): 74–79.]
- [20] 秦冬玲, 马玉洁, 陆国太, 等. 大豆乳清蛋白的超滤分离及膜污染分析[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(23): 72–76. [QIN D L, MA Y J, LU G T, et al. Ultrafiltration and membrane fouling analysis for the separation of soybean whey protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(23): 72–76.]
- [21] ZHOU G, ZHANG H, YANG W, et al. Bioleaching assisted foam fractionation for recovery of gold from the printed circuit boards of discarded cellphone[J]. *Waste Management*, 2020, 101: 200–209.
- [22] 孙瑞婷, 殷昊, 卢珂, 等. 两级泡沫分离废水中大豆蛋白的工艺[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 374–378. [SUN R P, YIN H, LU K, et al. Technology of soy protein separation from wastewater by two-stage foam fractionation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 374–378.]
- [23] JIANG C, WU Z, LI R, et al. Technology of protein separation from whey wastewater by two-stage foam separation[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, 55(1): 43–48.
- [24] LI R, WU Z, WANG Y, et al. Pilot study of recovery of whey soy proteins from soy whey wastewater using batch foam fractionation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 142: 201–209.
- [25] 周玉伦. 大豆低聚糖——多功能的抗癌物质[J]. *大豆科技*, 2016(6): 37–38. [ZHOU Y L. Soybean oligosaccharides-multifunctional anticancer substances[J]. *Soybean Science and Technology*, 2016(6): 37–38.]
- [26] 李倩倩, 王艳, 罗旭, 等. 大豆低聚糖及其降血脂作用研究进展[J]. *核农学报*, 2017, 31(9): 1788–1793. [LI Q Q, WANG Y, LUO X, et al. Research progress on soybean oligosaccharide and its effect on lowering blood lipid[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(9): 1788–1793.]
- [27] MA Y, WU X, GIOVANNI V, et al. Effects of soybean oligosaccharides on intestinal microbial communities and immune modulation in mice[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2017, 24(1): 114–121.
- [28] 张元生, 孙立斌, 关忠, 等. 大豆分离蛋白的乳清废水中提取大豆低聚糖的研究[J]. *黑龙江粮食*, 2014(4): 48–50. [ZHANG Y S, SUN L B, GUAN Z, et al. Study on the extraction of soybean oligosaccharides from whey wastewater of soybean protein isolates[J]. *Heilongjiang Grain*, 2014(4): 48–50.]
- [29] 刘宇. 豆制品废水中功能性成分的分离与纯化[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015. [LIU Y. Separation and purification of functional components in soybean wastewater[D]. Zhengzhou: He'nan University of Technology, 2015.]
- [30] LI Z, WANG K, ZHANG Y. Eco-friendly separation and purification of soybean oligosaccharides via nanofiltration technology[J]. *Separation Science and Technology*, 2018, 53(5): 777–785.
- [31] 黄迪, 刘伟, 吴兆亮, 等. 分光光度法检测大豆乳清废水中大豆异黄酮浓度[J]. *河北工业大学学报*, 2013, 42(4): 48–53. [HUANG D, LIU W, WU Z L, et al. Measure of the soy isoflavone concentration in the soy whey wastewater using spectrophotometry[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2013, 42(4): 48–53.]
- [32] 杨敬东, 张国治, 刘宇. 豆制品废水中大豆异黄酮分离技术研讨[J]. *粮食加工*, 2018, 43(1): 42–46. [YANG J D, ZHANG G Z, LIU Y. Study on separation technology of soybean isoflavones from soybean wastewater[J]. *Food Processing*, 2018, 43(1): 42–46.]
- [33] LIU W, WU Z L, WANG Y J, et al. Recovery of isoflavones from the soy whey wastewater using two-stage batch foam fractionation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(38): 13761–13767.
- [34] LIU W, WU Z, WANG Y, et al. Isolation of soy whey proteins from isoflavones in the concentrated solution using foam fractionation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 149: 31–37.
- [35] LIU W, WU Z L, WANG Y J, et al. Separation of isoflavone aglycones using chitosan microspheres from soy whey wastewater after foam fractionation and acidic hydrolysis[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015, 25: 138–144.
- [36] RIZKYTATA B T, GUMELAR M T, ABDULLAH T H. Industrial tofu wastewater as a cultivation medium of microalgae *Chlorella vulgaris*[J]. *Energy Procedia*, 2014, 47: 56–61.
- [37] WANG S K, WANG X, MIAO J, et al. Tofu whey wastewater is a promising basal medium for microalgae culture[J]. *Biore-source Technology*, 2018, 253: 79–84.
- [38] WANG F, GAO B, SU M, et al. Integrated biorefinery strategy for tofu wastewater biotransformation and biomass valorization with the filamentous microalga *Tribonema minus*[J]. *Biore-source Technology*, 2019, 292: 121938.
- [39] SHEN X F, GAO L J, ZHOU S B, et al. High fatty acid productivity from *Scenedesmus obliquus* in heterotrophic cultivation with glucose and soybean processing wastewater via nitrogen and phosphorus regulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 134596.
- [40] SYAICHURROZI I, RUSDI R, HIDAYAT T, et al. Kinetics studies impact of initial pH and addition of yeast *Saccharomyces cerevisiae* on biogas production from tofu wastewater in Indonesia[J]. *International Journal of Engineering*, 2016, 29(8): 1037–1046.
- [41] SYAICHURROZI I, RUSDI R, DWICAHYANTO S, et al. Biogas production from co-digestion vinasse waste and tofu-process-

- ing waste water and kinetics[J]. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2016, 6(3): 1057–1070.
- [42] RAHAYU S S. Effect of temperature, sludge, total suspended solids(TSS) on biogas production in tofu wastewater treatment using AnSBR reactor[J]. *Advanced Science Letters*, 2017, 23(3): 2468–2471.
- [43] WAGIMAN W, ARDANISWARI I R, NUGRAVIANTO W P. Biogas production from tofu waste to improve the environmental performance of tofu industry[J]. *Agroindustrial Journal*, 2020, 7(1): 459–462.
- [44] MUFARIDA N A, SETIAWAN O D. Socialization of tofu liquid waste management (whey tofu) becomes biogas as alternative energy reserves in the framework of creating an environmentally friendly industry[J]. *Kontribusi(Research Dissemination for Community Development)*, 2020, 3(2): 326–332.
- [45] CHUA J Y, LU Y, LIU S Q. Biotransformation of soy whey into soy alcoholic beverage by four commercial strains of *Saccharomyces cerevisiae*[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 262: 14–22.
- [46] TU C, TANG S, AZI F, et al. Use of kombucha consortium to transform soy whey into a novel functional beverage[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 52: 81–89.
- [47] AZI F, TU C, MENG L, et al. Metabolite dynamics and phytochemistry of a soy whey-based beverage bio-transformed by water kefir consortium[J]. *Food Chemistry*, 2020: 128225.
- [48] LAY C H, SEN B, HUANG S C, et al. Sustainable bioenergy production from tofu-processing wastewater by anaerobic hydrogen fermentation for onsite energy recovery[J]. *Renewable Energy*, 2013, 58: 60–67.
- [49] CHEN Y, ZHANG F, WANG T, et al. Hydraulic retention time affects stable acetate production from tofu processing wastewater in extreme-thermophilic (70 °C) mixed culture fermentation[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 722–728.
- [50] YU Y, ZHU X, SHEN Y, et al. Enhancing the vitamin B₁₂ production and growth of *Propionibacterium freudenreichii* in tofu wastewater via a light-induced vitamin B12 riboswitch[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(24): 10481–10488.
- [51] 陈跃文, 王怡然, 陈铮, 等. 豆腐加工废水发酵物的抑菌作用[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(3): 184–188. [CHEN Y W, WANG Y R, CHEN Z, et al. Study of antibacterial activity of fermented tofu processing serofluid[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(3): 184–188.]
- [52] 王薇, 马波, 许云华, 等. 利用豆腐黄浆水发酵红曲色素的研究[J]. *中国调味品*, 2017, 42(1): 44–46. [WANG W, MA B, XU Y H, et al. Production of monascorubin by fermentation of tofu yellow wastewater[J]. *China Condiment*, 2017, 42(1): 44–46.]
- [53] FANG C, HE J, ACHAL V, et al. Tofu wastewater as efficient nutritional source in biocementation for improved mechanical strength of cement mortars[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2019, 36(6): 515–521.
- [54] WANG S K, WANG X, TIAN Y T, et al. Nutrient recovery from tofu whey wastewater for the economical production of docosahexaenoic acid by *Schizochytrium* sp. S31[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 710: 136448.
- [55] LEE G I, SHIN W S, JUNG S M G, et al. Effects of soybean curd wastewater on growth and DHA production in *Aurantiochytrium* sp[J]. *LWT*, 2020, 134: 110245.