

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.24.005

马铃薯淀粉加工废水资源化处理研究进展

石瑞莲^{1,2,3}, 李乐卓^{1,2,3}, 马凯^{1,2,3}, 赵博超⁴, 张国珍^{1,2,3},
周添红^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 寒旱地区水资源综合利用教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730070; 4. 中国环境科学研究院 生态环境部生态工业重点实验室, 北京 100012)

摘要: 针对马铃薯淀粉加工废水的来源、组成、特点及其处理现状,重点概述马铃薯淀粉加工废水的资源化处理途径,分析并总结利用马铃薯淀粉加工废水提取马铃薯蛋白、发展循环农业、生产新能源及培养功能性微生物四种资源化处理技术的特点,并对马铃薯淀粉加工废水的资源化处理研究方向进行展望,以期为马铃薯淀粉加工废水的综合利用和循环农业发展模式的形成提供参考。

关键词: 马铃薯淀粉加工废水; 资源化处理; 蛋白提取; 循环农业; 新能源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)24-0034-10

Research Progress on Resource Treatment of Potato Starch Processing Wastewater

SHI Rui-lian^{1,2,3}, LI Le-zhuo^{1,2,3}, MA Kai^{1,2,3}, ZHAO Bo-chao⁴,
ZHANG Guo-zhen^{1,2,3}, ZHOU Tian-hong^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. Ministry of Education Engineering Research Center of Water Resource Comprehensive Utilization in Cold and Arid Regions, Lanzhou 730070, China; 4. Key Laboratory of Eco-Industry, Ministry of Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Focusing the origin, composition, characteristics, and current treatment status of potato starch processing wastewater, this study summarizes the resource-based treatment approaches for this type of wastewater. It analyzes and summarizes the features of four resource-based treatment technologies: extracting potato protein, developing circular agriculture, producing new energy, and cultivating functional microorganisms from potato starch processing wastewater. Furthermore, the paper anticipates the future direction of research into the resource-based treatment of potato starch processing wastewater, providing a reference for the comprehensive utilization of such wastewater and the development of circular

基金项目: 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2023CYZC-41、2022CYZC-36); 甘肃省科技计划项目(23YFFA0058); 甘肃省教育厅高校科研创新平台重大培育项目(2024CXPT-14)

通信作者: 周添红 E-mail: zhouth@163.com

agriculture models.

Key words: potato starch processing wastewater; resource-based treatment; protein extraction; circular agriculture; new energy

随着对马铃薯产业政策扶持力度的加大,马铃薯淀粉加工产业已逐步成为我国西部贫困地区脱贫和实现农牧产业化的重要经济支柱,其在农业生产中的地位举足轻重。然而,淀粉生产过程中会产生大量废水,每生产1 t马铃薯淀粉将产生6~10 m³马铃薯淀粉废水^[1-2],这些废水若不处理直接排入自然水体,将对水生环境造成破坏,影响水生态系统的平衡和生物多样性。为此,综述马铃薯淀粉加工废水资源化处理途径,旨在为马铃薯行业的可持续发展和循环农业生产模式的形成提供参考。

1 马铃薯淀粉加工废水概述

1.1 废水来源、组成及特点

马铃薯淀粉加工废水主要包括3类:清洗废水、蛋白废水和淀粉洗涤废水。清洗废水产生于马铃薯原料的输送与洗涤环节,占废水总量的40%~60%,该工段废水SS浓度高、水溶性物质较少、COD浓度较低,针对其特性,可采用格栅和自然沉淀进行初步处理,处理后的上清液可用于循环再利用;蛋白废水产生于淀粉乳浓缩分离过程,占废水总量的10%~20%,该工段废水含有大量溶解性蛋白,并夹杂少量果胶、糖类和纤维等不溶物,是废水的主要污染源。此外,该类废水蛋白含量为2 000~8 000 mg/L,同时,COD也维持在40 000~60 000 mg/L的高水平,具有较高的资源化回收利用潜力,因此,在废水处理过程中应优先考虑资源的回收利用。淀粉洗涤废水产生于淀粉洗涤与精制环节,占废水总量的10%~20%,该工段废水主要含有淀粉颗粒和少量可溶性有机物,其COD为1 000~2 000 mg/L,经适当处理后出水可作为离心筛工艺的用水,实现水资源的再利用。

1.2 废水处理现状

1.2.1 物化法

物化法主要通过物理和化学手段,如膜分离、絮凝沉淀等技术对废水进行处理。王应平等^[3]采用超滤+反渗透的膜集成技术,对絮凝沉淀后的马铃薯淀粉加工废水上清液进行深度处理,最终出水COD、BOD₅、氨氮等重要指标达到《淀粉工业水污染

物排放标准》(GB 25461—2010)。此外,Bouchareb等^[4]针对马铃薯淀粉加工废水“三高”的特点,提出一种混凝和膜过滤相结合的处理工艺,他们首先将FeCl₃作为混凝剂对废水预处理,再通过超滤膜(UP150)进行过滤,经过该组合工艺处理后废水COD和浊度的去除率分别达到84.38%和96.00%。虽然这些方法在废水处理上展现了较好的效果,但实施过程中的投资和运行成本较高,并且存在二次污染的风险。

1.2.2 生物法

生物法主要通过微生物的自然降解能力,以较低的成本实现有机物的有效转化,是一种经济环保的处理方法。目前,国内外普遍采用厌氧-好氧联合法处理马铃薯淀粉加工废水。Télliez-Pérez等^[5]采用部分亚硝化-厌氧氨氧化(PN/A)工艺,在循环流化床反应器中对经过厌氧预处理的马铃薯淀粉加工废水进行处理,研究结果显示,在总氮负荷率为0.8 g/(L·d)的条件下,该工艺对总氮和氨氮的去除率较高,分别为61.5%和74.0%左右,但COD去除率较低,仅为45.9%。刘贵祥等^[6]采用强化厌氧膨胀颗粒污泥床组合好氧工艺处理马铃薯淀粉加工废水,发现在进水温度为30℃、外回流比为200%、水力停留时间为24 h的条件下,该工艺能显著降低废水中COD和氨氮含量,其中出水COD和氨氮分别为92.35和10.28 mg/L,符合《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)二级标准。尽管生物法具有诸多优势,但其对运行条件(温度、pH等)的敏感性是一个不可忽视的问题。

马铃薯淀粉加工废水有机污染物浓度高、处理难度大,同时马铃薯淀粉的加工主要集中在“三北”地区的9月—12月,具有季节性强、加工期短的特点,因此,在实际应用中,马铃薯淀粉加工废水的常规处理往往面临投资成本高和处理效果不理想等问题。基于此背景,探索一条既经济高效又适应行业特性的资源化处理技术尤为重要。

2 马铃薯淀粉加工废水资源化处理方法

将马铃薯淀粉加工废水进行资源化处理和综

合利用,以降低处理成本,是目前企业和科研工作者共同关注的焦点问题。当下,马铃薯淀粉加工废水资源化处理途径如图1所示。



图1 马铃薯淀粉加工废水资源化处理途径

Fig.1 Resource recovery pathways for potato starch processing wastewater

2.1 提取马铃薯蛋白

马铃薯蛋白为完全蛋白质,其必需氨基酸含量与鸡蛋相似,具有调节血清胆固醇水平的能力和潜在的化学预防作用。马铃薯淀粉加工为物理过程,可有效保留废水中的优质植物蛋白,且该蛋白不含动物蛋白的潜在副作用,具备作为饲料和食品原料的良好潜力,应用前景广阔。提取方法不同,蛋白质的提取率、纯度和功能特性也会发生变化。目前,马铃薯淀粉加工企业常用的蛋白提取方法优缺点及提取率^[7-12]见表1。

表1 马铃薯蛋白提取方法优缺点及提取率

Tab.1 Advantages, disadvantages, and extraction efficiencies of potato protein extraction methods

提取方法	优点	缺点	提取率/%
膜分离法	安全环保、产率高、产品质量好、可实现分级提取	设备不能连续使用,成本高,易发生膜堵塞及膜污染	90
扩张床吸附法	返混少、稳定性好、提取的蛋白质具有天然活性	主要提取 Patatin 蛋白,蛋白提取率较低	40
絮凝剂法	回收能力强、价格低廉;天然有机高分子絮凝剂和微生物絮凝剂安全环保	无机絮凝剂用量大,残渣较多,会破坏蛋白色泽并降低其纯度	51~69
酸热絮凝法	蛋白提取率高,可较快应用于产业化	提取过程中加热易使蛋白变性,只可作为动物饲料	73

2.1.1 膜分离法

马铃薯淀粉加工废水通过滤膜时,小分子物质

透过滤膜,而大分子蛋白被截留在膜上,从而实现蛋白的分离提取。Jezowski 等^[13]采用新型超滤技术提取马铃薯废水浓缩蛋白,研究发现新型超滤技术获得的马铃薯蛋白浓缩物的吸油性能为 6.30 mL/g,是传统方法提取蛋白的 2 倍以上。Li 等^[14]采用自制的中空纤维超滤膜和纳滤膜一体工艺从模拟马铃薯淀粉加工废水中提取马铃薯蛋白,工艺流程如图 2 所示。该研究结果表明,超滤膜可截留马铃薯淀粉废水中 85.62% 的大分子蛋白,纳滤膜可截留 92.10% 的小分子蛋白。

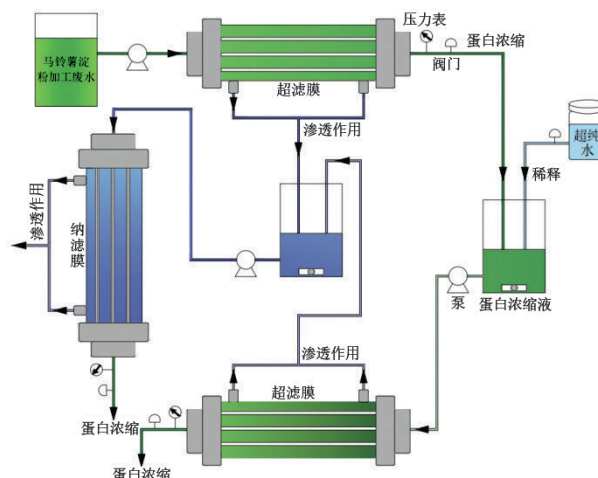


图2 超滤膜-纳滤膜一体工艺提取马铃薯蛋白流程

Fig.2 Integrated ultrafiltration and nanofiltration membrane process for potato protein extraction

膜分离法提取的马铃薯蛋白具有安全可利用性,但是膜分离技术设备投资高,且超滤膜较易吸附蛋白质和糖类,在使用过程中需经常更换、清洗,否则容易造成膜堵塞和膜污染,从而影响蛋白提取的持续工作,这在一定程度上增加了淀粉废水处理成本。因此,改进膜材料、降低膜污染是今后的研究热点。

2.1.2 扩张床吸附法

扩张床吸附法是一种经过精心设计的离子交换层析技术。荷兰某马铃薯淀粉集团在 2007 年采用扩张床吸附技术制备出适用于食品与制药工业的高性能蛋白,并表明马铃薯蛋白质量高于大豆蛋白。Zeng 等^[8]选用 Amberlite XAD7HP 为填料,利用扩张床吸附技术选择性回收马铃薯淀粉废水中的蛋白酶抑制剂,发现得到的蛋白酶抑制剂具有较高的溶解性和胰蛋白酶抑制活性。Jin 等^[15]通过扩张床吸附法从马铃薯淀粉加工废水中提取天然马铃

薯蛋白,并将蛋白质超滤浓缩成粉末,研究发现,使用扩张床吸附法得到的蛋白质为马铃薯蛋白酶抑制剂,与Zeng等^[8]的研究结果一致。

扩张床吸附法在提取马铃薯蛋白时具有分离效率高、有效保留蛋白天然活性的优势。然而,该技术在实际应用中仍面临蛋白提取率低、操作复杂、处理时间长以及缓冲液消耗量大等挑战,采用三维打印单体吸附(PMA)可以代替扩张床吸附法纯化蛋白质,能够最大限度地缩短处理时间并降低缓冲液消耗量。

2.1.3 絮凝法

在当前资源回收与环境保护的大背景下,絮凝法作为一种高效的废水处理技术,在提取马铃薯蛋白中具有独特优势。絮凝法提取马铃薯蛋白的方法分为絮凝剂法和酸热絮凝法两种。

① 絮凝剂法

使用絮凝剂法提取马铃薯蛋白时通常选用无机絮凝剂、合成有机高分子絮凝剂、天然有机高分子絮凝剂和微生物絮凝剂,它们通过不同的机制吸附并聚沉蛋白质,从而实现分离纯化。

无机絮凝剂主要包括铁盐、铝盐及其高分子聚合物。Barta等^[16]比较硫酸亚铁、氯化铁和氯化锌3种絮凝剂的蛋白提取效果,研究发现22℃条件下,硫酸亚铁和氯化铁对蛋白质的提取率分别为30.7%和80.6%。在实际应用中,无机絮凝剂常需与其他絮凝剂搭配使用。但铁制剂在分离蛋白时会产生铁屑污泥,破坏蛋白色泽降低其纯度,因此使用无机絮凝剂分离蛋白的研究近几年鲜少出现。

合成有机絮凝剂包含合成高分子絮凝剂、天然高分子絮凝剂和微生物絮凝剂。其中合成高分子絮凝剂以聚丙烯酰胺(PAM)为主,高洁^[10]向100 mL马铃薯淀粉加工废水中投加6 mg的PAM,在温度为60℃、pH为4.0的条件下,蛋白质的提取率为57.55%,纯度为72.33%。尽管PAM用量少、絮凝能力较强,但是PAM会生成N-亚硝胺类副产物,其潜在的致癌、致突变风险会对人体健康产生威胁。

天然有机高分子絮凝剂主要包括海藻酸钠、改性淀粉、羧甲基纤维素、壳聚糖、聚谷氨酸等,其中壳聚糖和聚谷氨酸凭借其独特的性质成为研究热点。Liu等^[17]采用2,3-环氧丙基三甲基氯化铵(GTA)对壳聚糖膜(CS)进行改性,将改性后的壳聚糖季铵盐(HTCC)用于马铃薯淀粉加工废水的处

理,研究发现,采用取代度为98%的HTCC作为絮凝剂,在350 r/min搅拌3 min、75 r/min继续搅拌12 min条件下,絮凝产物中的蛋白含量最高,可将絮凝产物作为饲料,实现资源的可持续利用。牛雅倩等^[11]采用聚谷氨酸作为絮凝剂去除马铃薯淀粉加工废水中的蛋白质,研究发现,在pH为3.23、温度为40℃的条件下,投加聚谷氨酸0.93 g/L,蛋白质去除率达68.43%。相比于传统的絮凝剂,天然高分子絮凝剂不会造成重金属二次污染,且具有环保、经济双重效果,在水处理方面具有广阔的前景。

微生物絮凝剂是一种通过生物技术从微生物中提取纯化得到的安全、环保、可降解的新型水处理剂。刘雨^[18]采用从“小麴子”酵母中筛选出的扣囊复膜酵母菌和洋葱伯克霍尔德菌作为微生物絮凝剂处理红薯淀粉加工废水,结果表明,在pH为8的条件下,摇瓶培养36 h后,废水的COD去除率可达58.7%,且经过脱水干燥处理,絮凝沉淀物中的蛋白质含量达24.1%,可将其制备成蛋白饲料。微生物絮凝剂弥补了无机絮凝剂和合成有机高分子絮凝剂的不足,是近几年絮凝剂法提取马铃薯淀粉加工废水中蛋白质的热点。

② 酸热絮凝法

酸热絮凝法主要通过高温作用破坏蛋白质分子的自然结构,使疏水性基团暴露,增强蛋白质分子之间的疏水作用,促使它们聚集形成更大的分子团,并利用等电点处蛋白质溶解度小的特点,聚集发生沉淀。周添红^[19]利用酸热絮凝法进行马铃薯淀粉加工废水中的蛋白质提取,得到总蛋白平均提取率为86.87%。王雪婷等^[12]采用酸热絮凝法从甘薯淀粉分离汁水中提取蛋白质,结果表明,温度对蛋白提取的影响最大,在温度为100℃、pH为4.0、转速为3 500 r/min的条件下离心10 min,粗蛋白质粉中的蛋白质含量可达73.22%,满足作为饲料原料的要求。一般的淀粉加工企业主要通过酸热絮凝法提取马铃薯蛋白,工艺流程如图3所示。酸热絮凝法对蛋白的提取率较高,但提取过程中加热和加酸可能导致蛋白质发生不可逆的变性,从而降低蛋白质功能和营养价值,只能用于动物饲料制作。

多家淀粉加工企业研究显示,提取马铃薯蛋白能够有效降低马铃薯淀粉加工废水的COD、SS、总氮、总磷等污染物含量,具体水质变化情况见表2。由表2可知,蛋白提取可以作为马铃薯淀粉加工废

水预处理的一种方法,为后续的深度处理创造有利条件。未来,可以考虑将蛋白提取与其他废水处理

技术相结合,构建更加完善的马铃薯淀粉加工废水处理系统。

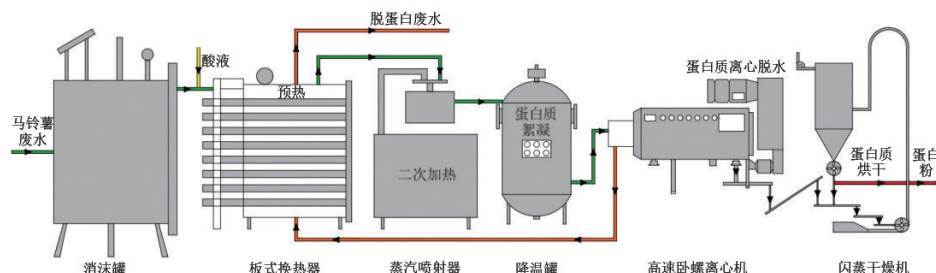


图3 酸热絮凝法提取马铃薯蛋白流程

Fig.3 Flow chart for the extraction of potato protein via the acid-heat flocculation method

表2 蛋白提取前后马铃薯淀粉加工废水水质

Tab.2 Water quality of potato starch processing wastewater before and after protein extraction $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

淀粉加工企业	蛋白提取前(汁水)					蛋白提取后(脱氮废水)				
	COD	SS	总磷	总氮	氨氮	COD	SS	总磷	总氮	氨氮
企业一	34 990	6 040	229	2 264	661	16 700	2 595	115	1 193	210
企业二	36 318	7 560		2 173		29 373	3 420	206	1 283	
企业三	28 000	17 280	191	653	81.3	19 100	15 200	157	533	68.6
企业四	34 680	5 920	328	681	65.4	20 600	7 710	187	638	58.6

2.2 发展循环农业

将马铃薯淀粉加工废水应用于循环农业,既能降低废水处理成本,又能提高农作物产量,实现水、肥资源化利用。一般利用马铃薯淀粉加工废水制备肥料、生产沼液及将处理后的废水还田等方式将其应用于循环农业。

2.2.1 制备肥料

马铃薯淀粉加工废水中含有大量的有机物和氮、磷、钾等营养元素,加入适当的菌种,可促进有机物的分解转化并制成有机肥。Li等^[20]采用壳聚糖和聚谷氨酸双重天然絮凝剂处理马铃薯淀粉加工废水,研究发现絮凝沉积物中有机质为95.0%,总养分为5.6%,高于《有机肥料》(NY/T 525—2021)中有机肥的标准值,表明该沉积物可转化为农业有机肥。刘浩等^[21]采用单因素与中心复合设计法,优化马铃薯淀粉加工废水制备 *Paenibacillus polymyxa* 菌剂,并将其应用于小白菜种植,试验结果表明,该菌剂能显著提高小白菜的产量与品质,与只使用化肥组对比发现,菌剂与化肥混用可以提高氮肥的利用效率。Xu等^[22]利用淀粉废水培养多黏类芽孢杆菌生物肥并将其用于茶树生长,试验结果表明,施用生物肥后茶叶产量、水提取量和茶多酚含量相较于对照组分别提高16.7%、6.3%和10.4%。由上述文献可知,利用淀粉废水制备的肥料能够改善土壤

环境,提高植物的养分吸收效率,增强植物的抗逆性。

2.2.2 厌氧发酵生产沼液

沼液中含有丰富的有机质、氮、磷、钾等养分,以及微量元素和生长激素,对植物生长具有良好的促进作用。Fang等^[23]通过膨胀颗粒污泥床(EGSB)反应器处理马铃薯淀粉加工废水的同时生产沼气,测试结果表明,1 L反应器厌氧消化COD负荷为3.2 g/d时,甲烷产生率为380 mL/gVS,且当反应器pH<5时,反应器出水可作为沼液肥进行还田利用。将沼液施用于土壤,在增加土壤有机质养分和酶活性的同时,还可以提高作物品质。利用马铃薯淀粉加工废水生产沼液的工艺流程如图4所示。未来,可通过浓缩沼液和复配功能性物质,实现沼液浓缩液利用的多元化,提高产品的市场值,从而有效缓解沼液处理运行中的高成本投入。

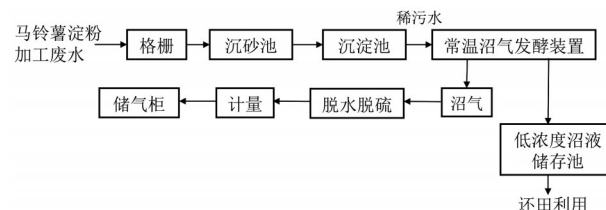


图4 马铃薯淀粉加工废水生产沼液流程

Fig.4 Flow chart for the production of biogas slurry from potato starch processing wastewater

2.2.3 还田利用

马铃薯淀粉加工废水富含蛋白质、糖类、纤维素等有机物和氮、磷、钾等营养元素,其生产过程仅涉及物理变化,无有毒有害物质添加,是一种极具利用价值的肥水资源。赵博超等^[24]采集比较了施用与未施用马铃薯淀粉加工废水的土壤养分及重金属含量,结果表明,两组土壤中重金属含量没有显著差异,且施用淀粉废水的土壤养分综合指数从53提升至83。刘智^[25]研究发现,马铃薯淀粉加工汁水滴灌可以提高表层土壤的养分及土壤酶活性,同时还可以提高线辣椒的产量和品质。宁夏固原某淀粉有限公司采用蛋白回收与土地利用相结合的新工艺替代传统末端生化处理,结果显示,该模式在减少废水量的同时降低了农田化肥施用量,增加了企业收益,实现了马铃薯淀粉加工废水的资源化、精准化处理^[24]。通过以上研究可以看出,将预处理后的马铃薯淀粉加工废水还田利用,可以优化土壤结构、提升土壤肥力,增加农作物产量,同时可以减少化肥用量,减轻环境污染。

2.3 生产新能源

在当今注重环保和可持续发展的社会背景下,废水处理和能源生产的结合成为一项重要课题。将淀粉废水有效处理并转化为有价值的能新源,不仅有助于减少污染,还可以实现资源的再利用和新能源的生产。

2.3.1 发酵生产沼气

在淀粉废水处理产生沼气的过程中,淀粉废水中的有机物质被微生物降解,产生甲烷和二氧化碳。Antwi等^[26]采用上流式污泥床反应器处理马铃薯淀粉加工废水,结果表明,有机物负荷(OLR)为3.65 kgCOD/(m³·d)时,COD降解率可高达97.7%,当OLR升高到13.27 kgCOD/(m³·d)时,甲烷和沼气产量分别从0.48、0.90 L/d增加到2.97、4.28 L/d,提高了淀粉废水处理的经济效益。虽然马铃薯淀粉加工废水具有良好的生化性,但高浓度COD容易使传统厌氧消化系统“酸败”,出现产甲烷性能降低、系统稳定性较差的情况,采用电发酵产甲烷系统可有效解决该问题。Shang等^[27]采用阴极电发酵生物反应器(见图5)进行马铃薯淀粉加工废水产甲烷的研究,结果表明,阴极电位高于-1.0 V时,甲烷产生量为1.03 mL/mgCOD,同时COD去除率达89%。该研究利用反应器中的微生物在电化学条件

下将淀粉废水转化为甲烷,实现了废水资源化处理和生产新能源的双重目的。

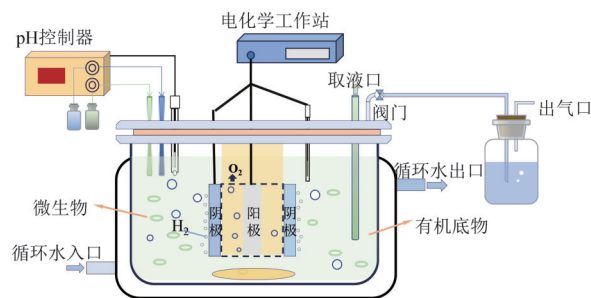


图5 阴极电发酵生物反应器示意

Fig.5 Schematic diagram of cathodic electro fermentation bioreactor

2.3.2 生物制氢

氢能被认为是一种安全、环保的替代能源,可用于取代化石燃料,其燃烧过程仅生成水,不产生有害气体,具有显著的环保优势。Khongkliang等^[28]以淀粉加工废水为原料制氢,研究发现,连续集成的两阶段高温暗发酵和微生物电解法制氢效果较好,氢气产量最高可达465 mg/L,同时COD去除率可达58%。Chaitanya等^[29]利用淀粉废水中的混合培养物来提高产氢率,在pH为6.5、温度为55℃、底物为15 g/L的条件下,向混合培养物中添加粗淀粉酶,并使用厌氧混合污泥作为接种物,最大产氢量为8.1 mol/kgCOD。目前,主流的制氢方法存在能源转化效率低、资源依赖性强等局限性,利用马铃薯淀粉加工废水发酵生物制氢,具备资源可再生、环境友好、成本低廉等优势,有望成为未来制氢技术的重要发展方向。

2.3.3 生产微生物燃料电池(MFCs)

MFCs是一种利用微生物酶的作用,将有机物中的化学能转化为电能的设备,一般可用于液体有机废物的处理和绿色能源的回收。Nwaokocha等^[30]将尼日利亚淀粉废水作为双室MFC铁电极发电装置的基质,在9 d的实验中获得了1.43 mA的电流、8.10 mA/cm²的电流密度以及7.70 mW/cm²的功率密度。Lu等^[31]将马铃薯淀粉加工废水作为单室空气阴极MFCs的基质,在处理废水的同时进行发电,实验结果表明,该MFCs的最大功率密度和最大电流密度分别为239.4 mW/m²和893.3 mA/m²,与此同时,废水中的COD和NH₄⁺-N的去除率分别高达98.0%和90.6%。从以上研究可以看出,利用淀粉

废水作为MFCs基质可有效去除废水中的COD和 NH_4^+-N ,并且以淀粉废水为燃料的MFCs功率密度明显高于使用生活污水的MFCs的功率密度。

2.4 功能性微生物资源化利用

淀粉废水功能性微生物资源化利用主要基于微生物的代谢活动,将废水中的有机物质转化为有用的产物。利用淀粉废水培养功能性微生物不仅可以有效处理废水中的有机物质,而且可实现淀粉废水的资源化处理,减轻环境污染。

2.4.1 生产乳酸

淀粉废水中通常含有大量的可发酵碳源,适合作为乳酸菌生长的营养物质,通过控制发酵条件和提供适当的培养基,可以有效利用淀粉废水生产乳酸。Lian等^[32]研究发现,在嗜温条件下,马铃薯淀粉与农业废弃物的厌氧共发酵能显著促进底物向乳酸的转变,并通过细菌群落分析进一步揭示乳酸菌在此生物转化过程中占主导作用。Tosungnoen等^[33]研究发现,植物乳杆菌可利用淀粉废水生产乳酸,这一过程被称为同步糖化发酵方法,在非灭菌条件下,乳酸浓度可达28.71 g/L,同时COD去除率高达98%。该技术不仅可以实现淀粉废水资源的再利用,还为低成本生产乳酸开辟了新途径,具有环保和经济效益。

2.4.2 生产微生物絮凝剂

微生物絮凝剂是一种利用特定的微生物菌种或其代谢产物,在水处理过程中起到絮凝沉淀悬浮颗粒物作用的物质。马铃薯淀粉加工废水中含有大量有机污染物,可将其用于培养微生物生产微生物絮凝剂。Guo等^[34]以马铃薯淀粉加工废水作为红球菌的发酵培养基生产微生物絮凝剂,研究发现发酵60 h后,1 L发酵液可生成1.12 g微生物絮凝剂,将该絮凝剂与SBR反应器结合用于马铃薯淀粉加工废水的预处理,废水COD和 NH_4^+-N 去除率分别为97.3%和94.6%,比单独使用SBR反应器分别高出29.6个百分点和28.5个百分点,表明利用马铃薯淀粉加工废水生产微生物絮凝剂并将其用于废水处理是可行的。

2.4.3 生产微生物油脂

微生物油脂是通过微生物(如微藻、真菌等)产生的油脂类物质。近年来,该物质因生产迅速、成本低廉、适应性强等优点被广泛应用到化妆品、医药、生物柴油等领域。Thangavelu等^[35]采用产油醇

母*Candida tropicalis* ASY2对含有大量淀粉和有机物的西米加工废水进行发酵生产脂质,研究发现,在淀粉含量为15.33 g/L、酵母提取物浓度为0.5 g/L、气流速率为5.992 L/min的最佳条件下,脂质产量可达2.68 g/L;通过优化酯交换反应条件将脂质转化为生物柴油,柴油提取率高达86.56%。Muniraj等^[36]使用油性丝状真菌米曲霉从马铃薯淀粉加工废水生产微生物脂质时发现,废水稀释率为20%时,生产脂质浓度高达3.5 g/L,同时可去除废水中98%的COD。由此可知,该方法在生产微生物油脂的同时,还可以有效降解废水中的COD,为淀粉废水的处理和微生物油脂的生产开辟了一条经济可行的途径。

2.4.4 生产普鲁兰多糖

普鲁兰多糖是一种来源于真菌、植物或海洋生物的多糖类化合物,具有抗氧化、免疫调节、抗肿瘤等健康功效而被广泛用作保健品或药物成分。然而,普鲁兰多糖比其他胞外多糖成本高,限制了其在市场上的发展和应用。鉴于此,Wani等^[37]提出从农业废弃物中生产普鲁兰多糖的思路和方法。An等^[38]使用马铃薯淀粉水解物和蔗糖混合物作为底物,通过真菌*Aureobasidium pullulans*进行液态发酵生产普鲁兰多糖,结果表明采用马铃薯淀粉水解物与蔗糖比例为80:20的培养基,能有效促进普鲁兰多糖的合成。该方法不仅降低了普鲁兰多糖生产成本,而且减轻了环境污染。

2.4.5 生产其他物质

在马铃薯淀粉加工废水资源化处理中,除上述方法外,还可通过马铃薯淀粉加工废水生产丙酸、微藻等产物方式实现废水的增值。Mohamadnia等^[39]创新地利用高温厌氧酸化工艺预处理马铃薯淀粉加工废水,将产生的挥发性脂肪酸作为碳源和营养源,在培养富含蛋白质的微藻生物物质的同时,还实现了废水中COD、总氮和总磷的高效去除,去除率分别为99%、78%和91%。Piwowarek等^[40]利用*Propionibacterium freudenreichii* T82菌株,在含有苹果渣提取物和马铃薯淀粉加工废水的培养基中,成功实现丙酸的高效生产,产量高达12.72 g/L,展示了马铃薯淀粉加工废水资源化转化的创新潜力。

3 结论和展望

马铃薯淀粉加工废水资源化处理技术的研究

和应用已经取得了显著进展。目前,马铃薯淀粉加工废水资源化处理技术主要有如下几种:

① 提取马铃薯蛋白。该技术能够通过膜分离、扩张床吸附、絮凝等方法有效回收废水中的高价值蛋白,并将其应用到食品、制药、饲料等行业,实现资源的循环利用。然而,该技术在实际应用中仍面临一些挑战,包括提取设备初期投资高、处理过程中可能出现膜污染及蛋白变性等问题,需进一步优化改进。

② 发展循环农业。该技术将废水处理与循环农业相结合,在降低废水处理成本的同时可以提高农作物产量,实现水、肥的资源化利用。然而,在大规模应用中,需强化企业管理与农户操作的协同性,并深入分析沼液、肥料和经过预处理的马铃薯废水在农田中的可持续承载力,以确保资源高效、安全地回归农田,实现农业生产的绿色健康发展。

③ 生产新能源。该技术通过将淀粉废水有效转化为沼气、氢能和微生物燃料电池的电能,在一定程度上实现了废水的减量化和能源的回收利用。然而,现阶段这些方法还面临能量转化率低、运行稳定差等挑战。

④ 功能性微生物资源化利用。该技术实现了废水的资源化处理和附加值产品的生产,但面临微生物培养条件复杂、生产效率不稳定等问题。

鉴于马铃薯淀粉生产行业多位于“三北”干旱地区,且马铃薯淀粉加工废水中富含氮、磷、钾等营养元素,推荐先对马铃薯淀粉加工废水进行蛋白提取,然后将蛋白提取后的废水进行还田利用。这一方法不仅能够高效利用资源,还能显著降低废水处理成本,符合循环经济的发展要求。

未来,马铃薯淀粉加工废水的资源化处理将继续朝着高效、经济、环保的方向发展,通过技术集成与优化,将多种资源化处理技术进行集成与优化,如将蛋白提取与循环农业发展相结合,实现资源的多重回收和利用。在有机废弃物资源丰富的地区,将马铃薯淀粉加工废水及其他有机废弃物作为厌氧消化的主要原料,利用厌氧发酵技术生产沼液和沼气,从而实现资源就地循环利用。建议加强产业化应用与推广,注重技术的可操作性和经济可行性,评估不同处理技术的经济潜力,并将其应用到马铃薯淀粉加工企业中。

参考文献:

- [1] 王秀蓓,郭晓琳,白舜文. 马铃薯淀粉废水资源化利用案例的成本收益分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 29-32.
WANG Xiuheng, GUO Xiaolin, BAI Shunwen. Cost-benefit analysis of potato starch processing wastewater reuse and nutrient recovery: a case study of Hanan green food industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 29-32 (in Chinese).
- [2] YAN H H, NIAN Y G, ZHOU Y X, *et al.* A detailed dissolved organic matter characterization of starch processing wastewater treated by a sedimentation and biological hybrid system [J]. Microchemical Journal, 2017, 130: 295-300.
- [3] 王应平,何葆华. 膜集成技术处理马铃薯淀粉废水的实验研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(10): 114-116.
WANG Yingping, HE Baohua. Experimental study on integrating membrane technology of the potato starch wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(10): 114-116(in Chinese).
- [4] BOUCHAREB R, BILICI Z, DIZGE N. Potato processing wastewater treatment using a combined process of chemical coagulation and membrane filtration [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2021, 49(11): 2100017.
- [5] TÉLLEZ-PÉREZ S K, WYFFELS S, KLEINJAN H, *et al.* Advanced nitrogen removal from anaerobically pre-treated potato wastewater via partial nitrification-anammox in a continuous fed SBR [J]. Chemosphere, 2021, 280: 130716.
- [6] 刘贵祥,梅军,史卫强. 强化EGSB-好氧组合工艺处理马铃薯淀粉废水研究[J]. 污染防治技术, 2021, 34(1): 11-14.
LIU Guixiang, MEI Jun, SHI Weiqiang. Study on the enhanced EGSB-aerobic combined process of potato starch wastewater treatment [J]. Pollution Control Technology, 2021, 34(1): 11-14 (in Chinese).
- [7] 吕建国,安兴才. 膜技术回收马铃薯淀粉废水中蛋白质的中试研究[J]. 中国食物与营养, 2008(4): 37-40.
LÜ Jianguo, AN Xingcai. Protein recovery from wastewaters of potato starch by membranes process [J]. Food and Nutrition in China, 2008(4): 37-40(in Chinese).
- [8] ZENG F K, LIU H, MA P J, *et al.* Recovery of native protein from potato root water by expanded bed adsorption with Amberlite XAD7HP [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2013, 18(5): 981-988.

- [9] 潘亮, 李乐卓. 采用加酸—PFS法处理马铃薯淀粉生产废水的实验研究[J]. 绿色科技, 2018(18): 67-68.
PAN Liang, LI Lezhao. Experiment on applying sulfuric acid and PFS to treat potato starch wastewater [J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(18): 67-68(in Chinese).
- [10] 高洁. 马铃薯淀粉废水中蛋白质的回收及性质研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
GAO Jie. Research on Protein Recovery from Potato Juice and Protein Properties [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012(in Chinese).
- [11] 牛雅倩, 李雨桐, 赵娟, 等. 聚谷氨酸去除马铃薯废水蛋白质及絮凝机理初探[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 178-184.
NIU Yaqian, LI Yutong, ZHAO Juan, et al. Removal of protein from potato wastewater by polyglutamic acid and its flocculation mechanism [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(21): 178-184(in Chinese).
- [12] 王雪婷, 赵博超, 罗岷, 等. 酸热絮凝法提取甘薯淀粉分离汁水中的蛋白质[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1874-1882.
WANG Xueting, ZHAO Bochao, LUO Min, et al. Tentative study on protein extraction from sweet potato starch processing water by acid-heat flocculation [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1874-1882(in Chinese).
- [13] JEZOWSKI P, POLCYN K, TOMKOWIAK A, et al. Technological and antioxidant properties of proteins obtained from waste potato juice [J]. Open Life Sciences, 2020, 15(1): 379-388.
- [14] LI H B, ZENG X H, SHI W Y, et al. Recovery and purification of potato proteins from potato starch wastewater by hollow fiber separation membrane integrated process [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 63: 102380.
- [15] JIN C Y, ZENG F K, LIU G. Recovery of protease inhibitors from potato fruit water by expanded bed adsorption chromatography in pilot scale [J]. American Journal of Potato Research, 2018, 95(1): 1-8.
- [16] BARTA J, HEŘMANOVÁ V, DIVIŠ J. Effect of low-molecular additives on precipitation of potato fruit juice proteins under different temperature regimes [J]. Journal of Food Process Engineering, 2008, 31(4): 533-547.
- [17] LIU Z S, WANG J H, LI G, et al. Study on flocculation characteristics of potato starch wastewater [J]. Coatings, 2023, 13(10): 1762.
- [18] 刘雨. 红薯淀粉废水微生物絮凝处理及其资源化利用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
LIU Yu. The Study on Microbial Flocculation Treatment and Resource Utilization of Sweet Potato Starch Wastewater [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020(in Chinese).
- [19] 周添红. 马铃薯淀粉加工废水资源化及尾水可见光催化深度净化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
ZHOU Tianhong. Resourceful Regeneration of Wastewater from Potato Starch Processing and Deep Purification of the Tail Water with Visible-Light-Driven Photocatalytic Degradation Technology [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018(in Chinese).
- [20] LI M, ZHU X Q, YANG H, et al. Treatment of potato starch wastewater by dual natural flocculants of chitosan and poly-glutamic acid [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121641.
- [21] 刘浩, 李瑞, 包丽君, 等. 马铃薯淀粉废水资源化制备 *Paenibacillus polymyxa* 农用菌剂 [J]. 环境工程学报, 2020, 14(9): 2406-2415.
LIU Hao, LI Rui, BAO Lijun, et al. Production of *Paenibacillus polymyxa* biofertilizer using potato starch wastewater for vegetable cultivation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(9): 2406-2415 (in Chinese).
- [22] XU S, BAI Z, JIN B, et al. Bioconversion of wastewater from sweet potato starch production to *Paenibacillus polymyxa* biofertilizer for tea plants [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4131.
- [23] FANG C, BOE K, ANGELIDAKI I. Biogas production from potato-juice, a by-product from potato-starch processing, in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) and expanded granular sludge bed (EGSB) reactors [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(10): 5734-5741.
- [24] 赵博超, 窦广玉, 苑喜男, 等. 马铃薯淀粉废水的蛋白回收与土地利用工程示范 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(22): 126-132.
ZHAO Bochao, DOU Guangyu, YUAN Xinan, et al. Demonstration project of potato starch wastewater protein recovery and land use [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22): 126-132(in Chinese).
- [25] 刘智. 马铃薯淀粉加工汁水还田利用对土壤及辣椒生长的影响 [D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
LIU Zhi. Effects of Potato Starch Processing Juice Water

- on Soil and Pepper Growth [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022(in Chinese).
- [26] ANTWI P, LI J Z, BOADI P O, *et al.* Efficiency of an upflow anaerobic sludge blanket reactor treating potato starch processing wastewater and related process kinetics, functional microbial community and sludge morphology [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 239: 105–116.
- [27] SHANG G Y, XU G Y, REN J, *et al.* A cathodic electro-fermentation system for enhanced methane production from high-concentration potato starch industrial wastewater [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 59: 105006.
- [28] KHONGKLIANG P, KONGJAN P, UTARAPICHAT B, *et al.* Continuous hydrogen production from cassava starch processing wastewater by two-stage thermophilic dark fermentation and microbial electrolysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42 (45): 27584–27592.
- [29] CHAITANYA N, KUMAR B S, HIMABINDU V, *et al.* Strategies for enhancement of bio-hydrogen production using mixed cultures from starch effluent as substrate [J]. *Biofuels*, 2018, 9(3): 341–352.
- [30] NWAOKOCHA C N, GIWA S O, LAYENI A T, *et al.* Microbial fuel cell: bio-energy production from Nigerian corn starch wastewater using iron electrodes [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 5565–5569.
- [31] LU N, ZHOU S G, ZHUANG L, *et al.* Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 43(3): 246–251.
- [32] LIAN T J, ZHANG W Q, CAO Q T, *et al.* Efficient production of lactic acid from anaerobic co-fermentation of starch and nitrogen-rich agro-industrial waste using a batch system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471: 144689.
- [33] TOSUNGNOEN S, CHOOKIETWATTANA K, DARARAT S. Lactic acid production from repeated-batch and simultaneous saccharification and fermentation of cassava starch wastewater by amylolytic *Lactobacillus plantarum* MSUL 702 [J]. *APCBEE Procedia*, 2014, 8: 204–209.
- [34] GUO J Y, LIU J Y, YANG Y J, *et al.* Fermentation and kinetics characteristics of a bioflocculant from potato starch wastewater and its application [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 3631.
- [35] THANGAVELU K, SUNDARARAJU P, SRINIVASAN N, *et al.* Bioconversion of sago processing wastewater into biodiesel: optimization of lipid production by an oleaginous yeast, *Candida tropicalis* ASY2 and its transesterification process using response surface methodology [J]. *Microbial Cell Factories*, 2021, 20 (1): 167.
- [36] MUNIRAJ I K, XIAO L W, HU Z H, *et al.* Microbial lipid production from potato processing wastewater using oleaginous filamentous fungi *Aspergillus oryzae* [J]. *Water Research*, 2013, 47(10): 3477–3483.
- [37] WANI S M, MIR S A, KHANDAY F A, *et al.* Advances in Pullulan production from agro-based wastes by *Aureobasidium pullulans* and its applications [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 74: 102846.
- [38] AN C, MA S J, CHANG F, *et al.* Efficient production of Pullulan by *Aureobasidium pullulans* grown on mixtures of potato starch hydrolysate and sucrose [J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2017, 48 (1) : 180–185.
- [39] MOHAMADNIA S, THYGESEN A, GHOFRANI-ISFAHANI P, *et al.* Valorization of potato starch wastewater using anaerobic acidification coupled with *Chlorella sorokiniana* cultivation [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2023, 35(6): 2645–2658.
- [40] PIWOWAREK K, LIPIŃSKA E, HAĆ-SZYMAŃCZUK E, *et al.* Use of *Propionibacterium freudenreichii* T82 strain for effective biosynthesis of propionic acid and trehalose in a medium with apple pomace extract and potato wastewater [J]. *Molecules*, 2021, 26(13): 3965.

作者简介:石瑞莲(1999—),女,甘肃定西人,硕士,研究方向为废水处理技术及资源化。

E-mail:2796404497@qq.com

收稿日期:2024-07-30

修回日期:2024-09-14

(编辑:丁彩娟)