

杨琦,程述震,杜明. 马铃薯蛋白制备及应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 454–463. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110030

YANG Qi, CHENG Shuzhen, DU Ming. Research Progress of Potato Protein Preparation and Application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 454–463. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110030

· 专题综述 ·

马铃薯蛋白制备及应用研究进展

杨 琦,程述震,杜 明*

(大连工业大学食品学院,国家海洋食品工程技术研究中心,辽宁大连 116034)

摘 要:马铃薯蛋白营养价值很高,与其他谷物蛋白相比,它能弥补水稻、小麦等主粮原料蛋白低的缺陷,市场应用潜力巨大。目前我国马铃薯加工主要集中于淀粉生产,但生产过程产生的废水中富含大量蛋白。高效回收废水中的马铃薯蛋白有助于提高我国食品蛋白资源储量,其具有重要的社会和经济价值。本文系统综述了提取马铃薯蛋白各种方法的优缺点及其应用,化学法实际应用广泛,但蛋白质得率低,使用物理法回收所得的马铃薯蛋白具有很好的品质及纯度,但对设备要求较高。而生物法更简洁高效,但处理效果受温度影响极大。目前我国马铃薯蛋白已广泛应用于食品加工、保鲜材料和动物饲料中。并且本文同时结合现有研究和生产工艺流程,设计了利用酸热沉淀法和超滤法从马铃薯淀粉废水中蛋白质回收生产设备流程,以解决蛋白质得率低及超滤法不能连续生产的问题,提高蛋白回收率,降低生成成本。

关键词:马铃薯,蛋白质,淀粉废水,回收,超滤法

中图分类号:TS201.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2023)16-0454-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110030

本文网刊:



Research Progress of Potato Protein Preparation and Application

YANG Qi, CHENG Shuzhen, DU Ming*

(National Engineering Research Center of Seafood, School of Food Science and Technology,
Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Potato protein has high nutritional value, compared with other cereal proteins, it can make up for the low protein deficiencies of rice, wheat and other staple food raw materials, the market application potential is large. At present, China's potato processing mainly focuses on starch production, but the production process produces a large amount of protein in the wastewater. Efficient recovery of potato protein from wastewater can help increase China's food protein resources reserves, which has important social and economic value. This paper systematically reviews the advantages and disadvantages of various methods of potato protein extraction and their applications. The chemical method is widely used in practice, but the protein yield is low, and the potato protein recovered using the physical method has good quality and purity, but requires high equipment. The biological method is simpler and more efficient, but the treatment effect is greatly affected by temperature. Currently, potato protein is widely used in food processing, preservation materials and animal feed in China. And this paper also combines the existing research and production process, and designs the production equipment process of protein recovery from potato starch wastewater by acid thermal precipitation and ultrafiltration, in order to solve the problem of low protein yield and continuous production by ultrafiltration, improve the protein recovery rate and reduce the generation cost.

Key words: potato; proteins; starch wastewater; recovery; ultrafiltration

马铃薯是一年生的茄科草本植物,它与小麦、玉米和稻子被人们评为全球四大重要的粮食作物。马铃薯含有丰富的热量,是因为淀粉占马铃薯块茎成分

中的绝大部分,并且有研究表明马铃薯营养丰富,尤其是其中的马铃薯蛋白质,因其具有高营养特性和良好的人体消化吸收率而倍受关注^[1]。中国是世界马

收稿日期: 2022-11-07

基金项目: 中华传统与民族特色食品品质形成机理及调控技术研究(2021YFD2100105)。

作者简介: 杨琦(1999-)(ORCID: 0000-0002-7798-869X),女,硕士研究生,研究方向: 蛋白质资源开发与利用,E-mail: yang71122@163.com。

* 通信作者: 杜明(1977-)(ORCID: 0000-0001-5872-8529),男,博士,教授,研究方向: 蛋白质资源开发与利用,E-mail: duming121@163.com。

铃薯总产量最多的国家,“马铃薯主粮化”战略在 2015 年被明确提出,目的是推进马铃薯主食产品开发和促进马铃薯深加工产业发展,当时预计 2020 年全国马铃薯种植面积将突破 1 亿亩,将 30% 以上的马铃薯加工成主食^[2]。就我国马铃薯产量来看,近年来是持续增长的状态,我国 2021 年的马铃薯产量近 1800 万吨,与 2011 年相比,增量近两百万吨,增幅达 12.22%。我国马铃薯产量增长率在 2014 年、2015 年、2019 年有一定程度的下滑,其它年份我国马铃薯产量均保持较为稳定的增长态势。2016~2021 年中国马铃薯播种面积及产量如图 1^[3]。

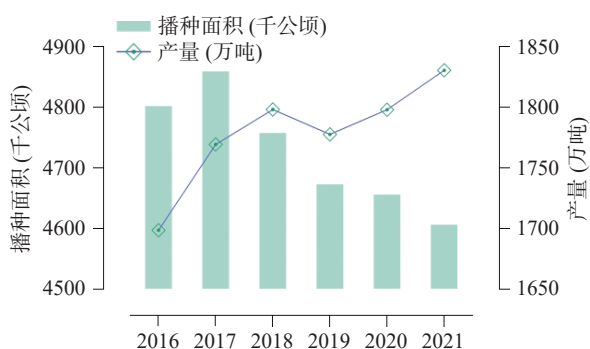


图 1 2016~2021 年中国马铃薯播种面积及产量

Fig.1 Sown area and yield of potato in China from 2016 to 2021

马铃薯淀粉的竞争力要远高于其他淀粉,有很多国家的马铃薯产量很高,所用于淀粉加工的马铃薯大约总产量的 40%,全世界有 25% 的淀粉来自马铃薯^[4]。但是据统计,在马铃薯淀粉生产过程中,平均 6.5 吨的马铃薯可以生产出 1 吨的马铃薯淀粉,还会产生 1 吨的废渣和 9 吨的废水。近几年我国马铃薯淀粉年需求量维持在 70 万吨水平,产量保持在 40~70 万吨,由此可推算出我国马铃薯淀粉工业中每年产生废水和废渣的量。马铃薯淀粉加工过程是以马铃薯为原料,经过锉磨、提取、浓缩、清洗、干燥、筛分和精制等步骤而成。在淀粉生产的粉碎、浓缩和脱水等步骤会产生很多的废水,它是一种浓度很高、成分多样的有机废水。淀粉废水中蛋白质的含量在 2000~8000 mg/L 之间,化学耗氧量(COD)约为 6000~30000 mg/L,还有 8500~10000 mg/L 的固体悬浮物(SS)。马铃薯淀粉加工分离汁水的化学成分见表 1^[5],相较于其他物质来说,加工废水中蛋白含量占比较

表 1 马铃薯淀粉加工废水的化学组成^[5]

Table 1 Chemical composition of potato starch processing wastewater^[5]

组分	含量(%)
水	94
淀粉	<0.5
蛋白质	1.8
氨基酸	1.8
糖/盐/酸	2.5

高,有较好的回收价值。若不对废水进行二次加工处理,不仅浪费水资源和很多有用物质,还会污染环境,所以检测废水中成分并利用合适的方法对其进行回收和利用可以提高副产物利用率,有助于提高我国食品蛋白资源储量,具有重要的社会和经济价值。

目前马铃薯蛋白可应用于营养型乳饮料、风味冰淇淋等食品中,并且其在食品保鲜材料和动物饲料的应用也非常广泛,其天门冬氨酸的含量显著,还可以将其应用于治疗高血压和心脏病,或添加于各种清凉饮料。但马铃薯蛋白在食品中的应用种类较少,开发力度不大。因此应进一步对马铃薯蛋白制备及应用进行研究,扩大马铃薯蛋白的市场。本文对马铃薯蛋白各种提取方法及其应用进行了综述,同时结合现有研究和生产工艺流程,拟设计了从马铃薯淀粉废水中蛋白质回收生产设备流程,以期解决蛋白质得率低及超滤法不能连续生产的问题,提高蛋白回收率,降低生成成本。

1 马铃薯蛋白的组成、结构及特性

1.1 马铃薯蛋白的组成

马铃薯中蛋白质含量为 2.6%~3.8%。马铃薯蛋白质有三个部分分别是:高分子量蛋白质、糖蛋白和蛋白酶抑制剂,其中高分子量蛋白质的分子量最高,蛋白酶抑制剂最低^[6]。很少有学者对高分子量蛋白质进行研究。马铃薯总蛋白大概含有 40% 的糖蛋白,其中含有 32% 的糖和 64% 的蛋白质。研究表明,马铃薯贮藏蛋白也可以分为酸性组分和碱性组分,马铃薯块茎酸性蛋白组分和碱性蛋白组分的得率分别为 0.535% 和 0.741%,纯度分别为 92.5% 和 89.2%;酸性蛋白组分有较好的表面疏水性、吸油能力以及乳化性,而碱性蛋白组分有较高的总巯基含量以及起泡性^[7]。

蛋白酶抑制剂含量很高,马铃薯块茎总可溶性蛋白的 50% 都是蛋白酶抑制剂。近年来发现蛋白酶抑制剂可以抗癌和调节饮食,针对这一功能特性可以进一步开发其在制药和食品工业中的应用。马铃薯蛋白是包含 19 种氨基酸的完全蛋白质,其中含有 20% 左右的必需氨基酸,和鸡蛋蛋白相近,明显高于 FAO/WHO 的标准蛋白(36.0%)。马铃薯蛋白的氨基酸组成如表 2^[8]。

表 2 马铃薯蛋白的氨基酸组成^[8]

Table 2 Amino acid composition of potato protein

氨基酸	含量(%)
天门冬氨酸	24.19
苏氨酸	5.39
谷氨酸	11.65
甘氨酸	4.80
亮氨酸	5.24
酪氨酸	2.26
赖氨酸	7.75
色氨酸	1.12

现在马铃薯蛋白的生产主要是从马铃薯淀粉废

水中进行提取,国外对马铃薯蛋白的废水回收并没有过多的研究,其主要研究在于马铃薯蛋白的应用,例如研究其水解物对心脏的保护作用或将其应用于3D打印、饮料和面包的制作中等。马铃薯块茎当中各种蛋白组分共同组成了马铃薯浓缩蛋白,但是在加工过程中需要加热,这导致马铃薯浓缩蛋白已经变性。马铃薯浓缩蛋白及其水解物的质量标准见表3^[9]。

表3 马铃薯浓缩蛋白及其水解物的质量标准^[9]

Table 3 Quality standards for potato protein concentrate and its hydrolysates^[9]

组分	含量(mg/kg)
干物质	≥800
蛋白质(干基)	≥600
灰分(干基)	<400
糖苷生物碱(总)	<150
赖氨酸丙氨酸(总)	<500
赖氨酸丙氨酸(游离)	<10

1.2 马铃薯蛋白的结构

分离纯化马铃薯粗球蛋白以后就可以得到马铃薯球蛋白,它的相对分子量是22 kDa。通过氨基酸成分等结构分析表明,含硫氨基酸是马铃薯球蛋白的限制性氨基酸,其二级结构主要是无规则卷曲,占85%以上, β -折叠和 α -螺旋含量接近, β -转角含量最低^[10]。

二聚体是自然状态下的马铃薯糖蛋白形态有相似的结构特性和热稳定性,马铃薯糖蛋白最稳定的构象存在于pH 6~8之间。362个氨基酸残基组成了马铃薯糖蛋白非常稳定的一级结构,不会受到外界环境因素影响。而二、三级结构不稳定,易受外界环境因素影响。不同条件下马铃薯蛋白的二级结构也不同,马铃薯糖蛋白是一种高热稳定性蛋白;而尿素、DDT等变性剂会对其二级结构造成巨大破坏,使其结构由有序变成无序^[11]。

1.3 马铃薯蛋白的营养特性

新鲜马铃薯的蛋白资源并不被人们所重视。但其营养丰富,产量大,很好的满足人体对蛋白营养的需求。蛋白质的日推荐摄食量为0.8 g/kg体重/d,成年人蛋白质的可接受宏量营养素分布范围占能量总需求的10%~35%^[12]。马铃薯蛋白的营养价值高是因为它必需氨基酸含量高,例如赖氨酸的含量为6.7%~10.10%;苏氨酸的含量为4.6%~6.5%^[13]。赖氨酸含量高使得马铃薯作为主食非常具有吸引力,谷物蛋白如作为主食的大米和小麦缺乏赖氨酸,因此用马铃薯作为主粮正好能弥补水稻和小麦等的缺陷。

黏体蛋白是一种多糖蛋白的混合物,它在马铃薯蛋白中含量丰富。黏体蛋白含有12种清除自由基的氨基酸,包括半胱氨酸、蛋氨酸、酪氨酸、色氨酸、苯丙氨酸和组氨酸。黏体蛋白中的色氨酸和半胱氨酸可能与测定的抗氧化活性有关。黏体蛋白具

有较高的DPPH自由基清除活性,其清除活性与强抗氧化剂阿魏酸相当。黏体蛋白还是ACE-和肾素抑制肽的良好前体^[14]。并且它的脂肪酶活性可以在巴氏杀菌条件下灭活,而不会产生过量的副产物。因此,将黏体蛋白添加到奶酪或其他发酵产品中,以形成源于短链脂肪酸的风味是很有前景的^[15]。黏体蛋白的另一大特点是对心血管系统脂肪沉积进行预防,防止动脉粥样硬化,并对肝脏、肾脏中结缔组织的萎缩有一定预防作用,这使得它在医学领域应用广泛^[16]。马铃薯蛋白可明显促进动物的生长发育。因此,马铃薯蛋白质的营养价值非常值得开发利用,它可以作为一种天然的优良蛋白质应用于食品和医药等行业。

1.4 马铃薯蛋白的加工功能特性

市场上马铃薯蛋白主要被用于制成动物饲料。蛋白的功能性质主要包括水合性质,如持水力、溶解度;蛋白质分子间的相互作用,如沉淀作用、凝胶作用和表面性质如乳化性、起泡性。环境因素以及成分间的相互作用均会影响蛋白的功能特性。

在pH2.0~10.0、NaCl浓度0~1.0 mol/L、温度4~80℃范围内,马铃薯蛋白的溶解性会随着pH的增加呈先降低后升高的趋势,而随NaCl浓度和温度的升高变化趋势相反。在pH 10.0、NaCl浓度为0.2 mol/L和温度为40℃时,马铃薯蛋白的溶解度最好^[17]。

蛋白的持水能力在等电点处最差。马铃薯蛋白在等电点pH4.0时乳化性和乳化稳定性最差,在远离等电点条件下乳化能力得到提高;在低盐(<0.2 mol/L)环境中,盐浓度的增加其乳化性和稳定性也会升高,溶液中盐浓度继续增大,则乳化能力降低;随着温度的升高,蛋白的乳化性和稳定性均会先上升后下降,分别在60和40℃时达到最大值^[18]。

马铃薯蛋白在等电点pH4.0附近起泡性最差,但泡沫稳定性较好;NaCl浓度的增加,马铃薯蛋白的起泡性和泡沫稳定性均有先增加后降低的趋势^[19]。

2 马铃薯蛋白回收技术

2.1 块茎中马铃薯蛋白的提取

有五种从马铃薯块茎中提取蛋白质的常用方法,分别是丙酮沉淀法、酚提取法、三氯乙酸(TCA)法、磷酸缓冲液法以及直接提取法。丙酮沉淀法、TCA法和酚提取法都是提取蛋白质的常用方法,丙酮会降低介电常数,使相反电荷的吸引力增强,然后利用其亲水特质,使马铃薯蛋白表面的水化层被破坏从而达到提取蛋白的目的。在酸性环境中,TCA可以与马铃薯蛋白结合成不溶性盐,并且TCA还可以使蛋白的疏水性基团大量暴露,进而分离。

有研究人员认为丙酮沉淀法、TCA法、酚法等几种方法提取率均不甚理想^[20]。但李萌萌等^[21]采用不同方法提取马铃薯块茎中的蛋白质,结果显示TCA法和酚法效果较差,采用改良酚法后结果也并

不理想,而直接提取法所得结果较理想。但是得到的蛋白质中纯度很低。另有研究表明 TCA 沉淀法和丙酮沉淀提取法蛋白质损失较少,分离效果好。缺点就是蛋白质纯度不高,杂质偏多^[22]。醇提取法适用于电泳分析技术,但提取的蛋白含量很少。酚提法较其他方法而言,可最大程度降低对环境的污染。盐提取法提取的蛋白质含量虽高,但是操作复杂,条件苛刻。

2.2 淀粉废液中马铃薯蛋白的提取

当前马铃薯蛋白研究的热点是在马铃薯淀粉废水中提取高纯度马铃薯蛋白的各种方法,若能研究出蛋白质得率高,适合于工业生产的方法非常有利于扩大马铃薯蛋白的应用。而马铃薯蛋白无论是在食品行业还是医药领域都有很大的应用价值,所以在实际生产中定要采用恰当的方法处理马铃薯淀粉废水,实现资源利用最大化。马铃薯蛋白质的提取方法小结如表 4。

2.2.1 酸热沉淀法 现在工业上从淀粉废水中提取马铃薯蛋白最常用的方法就是酸热沉淀法。酸热沉淀法主要原理就是利用酸热处理沉淀蛋白质。具体操作是首先将 pH 调节至 3.5~5.5,再将分离汁水加热至 90 ℃ 以上,然后离心分离收集蛋白质沉淀并烘干,得到马铃薯浓缩蛋白。

黄闯等^[23]利用酸热沉淀法处理淀粉废水,得到最佳提取条件为 pH1.0、反应时间 2 h、固液比 1:25、反应温度 55 ℃。此时蛋白质得率为 57.0%。刘婷婷等^[24]优化了酸热沉淀法的工艺,蛋白质得率 62.39%

的条件为碱沉 pH9.2、酸沉 pH3.5、酸沉温度 42 ℃,此条件下实际回收率也可达 61.82%。但张亚军等^[25]得到的结果为碱沉淀 pH 应在 8.0~8.5 之间,酸提取 pH 应在 4.6~5.0 之间,回收效果最佳。酸热沉淀法经优化后的蛋白质得率有一定提升,但是总体得率不高,若要将其应用于工业生产,则可以将其与其他方法共用以提高得率。

2.2.2 超滤法 超滤法原理是物理筛分作用。利用超滤膜的多孔性,来阻止如蛋白质或胶体等物质的通过。张泽俊等^[26]使用切割分子量 1.5 万的醋酸纤维素膜对马铃薯废水进行处理,发现它对蛋白质的截留率为 85%;吕建国等^[27]使用相对切割分子量 2 万的 PE 膜对马铃薯废水进行处理可回收其中约 90% 的蛋白。顾文芬等^[28]研究分析了超滤法在马铃薯蛋白回收当中的应用,准确地得出结论:在实验条件下,浓缩比为 5 的情况下,分子截留量分别为 10000 MWCO 和 30000 MWCO 的超滤膜包的浓缩液蛋白浓度分别增加到原来的 4.35 和 3.90 倍,蛋白质回收率分别为 67.61% 和 62.98%。SDS-PAGE 结果表明两个超滤膜包回收的蛋白组成没有什么差异,但 30000 MWCO 的超滤膜包孔径较大,浓缩效率高,更加适合于回收马铃薯总蛋白。还有研究人员采用自制的中空纤维超滤膜和纳滤分离膜回收马铃薯淀粉废水中的蛋白,截留率分别为 85.62% 和 92.1%^[29]。超滤法对蛋白质的得率较高,但由于其并不能连续生产,且膜极易堵塞,导致这种方法较难应用于实际的工业

表 4 淀粉废液中马铃薯蛋白的提取方法
Table 4 Extraction of potato protein from starch waste liquid

提取方法	方法原理	优缺点	提取率(%)	来源
酸热沉淀法	通过对废液进行酸热处理将蛋白质絮凝沉淀下来。	工艺复杂,蛋白质功能丧失严重,消耗大量能量,并且蛋白质易变性。	57.0	黄闯等 ^[23]
			61.82	刘婷婷等 ^[24]
超滤法	物理筛分作用,利用超滤膜的多孔性,阻挡具有低渗透压的大分子,较小的溶质分子与水一起被搬运通过滤膜。	自动化程度高,稳定可靠,得到的产品质量好,不会造成二次污染,但易发生膜堵塞,设备不能连续使用,且成本高。	85	张泽俊等 ^[26]
			90	吕建国等 ^[27]
酶解法	利用酶降解部分蛋白质,增加其分子内、分子间交联或连接特殊功能基团,改变蛋白质的功能性质。	简洁高效,成本低,作用条件温和,充分保留蛋白质活性,但酶来源单一,且废液温度不适于酶生存,工厂生产技术上不成熟。	67.61	顾文芬等 ^[28]
			20.19	高丹丹等 ^[30]
			28.23	甘雨等 ^[31]
加热絮凝法	加热处理使蛋白质发生絮凝反应。	消耗大量能量,蛋白质易变性,并且最终产品纯度低。	39.9	赵晶等 ^[32]
			43.95	陈钰等 ^[33]
			66.9	金虹 ^[34]
絮凝法	絮凝剂法	利用有机或无机物质使蛋白质集聚变大,或形成絮团,加快粒子的聚沉。	51.27	潘亮等 ^[35]
			82.8	张亚群等 ^[36]
			57.55	高洁 ^[37]
等电点沉淀法	等电点处蛋白质分子净电荷为零,因没有相同电荷的相互排斥,分子间作用力减弱,极易碰撞、凝聚而产生沉淀。	无法彻底分离废水中有害物质,在蛋白质浓度低时分离效果不明显。	55	刘玉峰等 ^[38]
			62.7	裴兆意 ^[39]
			85.38	齐斌等 ^[40]
其他	表面吸附原理,以气泡为载体,分离液相中的蛋白质,又称为泡沫吸附分离。	对环境不会造成二次污染。但在马铃薯蛋白上的应用很少。泡沫分离技术已工业化应用于玉米淀粉生产废水中回收蛋白质。	51.19	高洁等 ^[41]
			79.21	易伟民等 ^[42]
			84.1	Mu等 ^[43]
	依据不同物质在同一吸附剂上的吸附能力的不同来进行分离。	对蛋白的吸附能力有限。	50	马健等 ^[44]
			48	陈侠等 ^[45]

生产中。

2.2.3 酶解法 酶解法应用前景广阔,原理是利用合适的酶降解部分蛋白质,改变蛋白质的功能性质。现在工厂主要是利用单酶或多酶法来处理马铃薯蛋白。

高丹丹等^[30]用木瓜蛋白酶水解马铃薯渣中的蛋白,最佳的水解条件为:酶与底物浓度比为 6000 U/g,温度 64.70 ℃、pH7.41、反应 3.12 h。此时马铃薯蛋白的水解度是 20.19%。甘雨等^[31]优化了木瓜蛋白酶的水解工艺。得到最优条件为:pH6.0、酶解时间 3 h、0.7% 的酶、酶解温度 55 ℃,在这种条件下的水解率为 28.23%。赵晶等^[32]确定了胰蛋白酶水解马铃薯蛋白的最佳水解条件是:pH8.0、水解时间 2 h、水解温度 55 ℃、酶用量为 650 U/g、固液比为 1:5,此条件下的蛋白质水解度为 39.9%。单一酶处理蛋白的水解度很低,并且此法对于废液温度有一定要求,并不适用于工业生产。

2.2.4 絮凝法 絮凝法的原理是指将液体中蛋白质逐渐聚集,然后形成絮团,最终将其从溶液中分离出来。通常把絮凝法分为加热絮凝法和絮凝剂法,根据使用的絮凝剂不同又将絮凝剂法分为有机絮凝剂法和无机絮凝剂法。在上世纪九十年代时国外已经有研究者用絮凝剂法将马铃薯蛋白从淀粉废水中提取出来。对于我国来说,早期人们并没有意识到絮凝剂有提取蛋白的功能,只是用它来降低水中的 COD 含量。但近些年来,人们的环保理念增强,加工企业也逐渐重视加工废物的处理和排放。

加热絮凝法的原理是通过提高温度使蛋白质发生絮凝反应,然后达到回收蛋白质的目的。陈钰等^[33]首先模拟工厂利用加热絮凝法回收废水中蛋白的过程,确定最佳条件为时间 2.5 h、pH5.2,此时可以回收 43.95% 的蛋白质。金虹等^[34]研究了不同因素对加热絮凝法对蛋白质提取率的影响,结果显示对提取率影响最大的是 NaCl 浓度,pH 与温度影响较小,浸提时间几乎无影响。然后确定了加热絮凝法的最优条件为 0.025 mmol/L 的 NaCl、pH4.0、温度 25 ℃、浸提 1.0 h,最终得率为 66.9%。

无机絮凝剂可以分为无机高分子絮凝剂和无机低分子絮凝剂,无机高分子絮凝剂它的效果要更好一些。潘亮等^[35]用聚合硫酸铁(PFS)处理马铃薯淀粉废水,结果表明,当聚合硫酸铁的浓度为 1.4 mL/L 时,可去除废水中 51.27% 的蛋白质。在实际絮凝剂的使用中,通常将无机高分子絮凝剂与其他搭配一起使用,以提高蛋白质的去除率。张亚群等^[36]用将聚合氯化铝(PAC)与聚丙烯酰胺(PAM)搭配一起去除蛋白质,研究了不同因素对蛋白质去除效果的影响。结果表明,pH 为 5,6 g/L PAC,0.4 g/L PAM,可去除废水中 82.8% 的蛋白。

PAM 是效果非常好的合成有机高分子絮凝剂。

高洁^[37]在废水中添加 6 mg/mL 的聚丙烯酰胺、pH4.0、温度 60 ℃、保持 30 min,就可以得到 57.55% 蛋白质,纯度为 72.33%。刘玉峰等^[38]添加了 70 mg/L 的聚丙烯酰胺,pH 为 5,温度 20 ℃,反应 40 min,在这样的条件下,蛋白质的去除率可以达到 45%~55%。但是在实际工业生产中不建议使用合成聚丙烯酰胺,因为它不仅危害人体健康,还会污染环境。

合成有机高分子絮凝剂由于其自身缺陷,不能广泛应用,人们又发掘出了更加安全的天然有机高分子絮凝剂。张亚军等人以海藻酸钠提取马铃薯蛋白质,当海藻酸钠浓度为 0.15%,pH 为 4.2 时蛋白回收率最高。裴兆意^[39]经实验得出最佳絮凝条件为:50 mg/L 的壳聚糖,pH4.5,体系温度 50 ℃,初始搅拌 80 r/min 搅拌 10 s,再 30 r/min 搅拌 60 min,在这种条件下蛋白质回收率可达到 62.7%。张轶等^[40]将絮凝剂法与磁分离技术相结合,并研究了磁性壳聚糖微球微球的吸附效果。结果表明:微球粒径为 20~50 μm;在加入 2 mg/mL 磁性壳聚糖,吸附 30 min,温度 40 ℃,pH7 时,可以吸附 80% 的蛋白质。在絮凝法中,不同絮凝剂对于蛋白质的去除率不同,无机絮凝剂中去除率最好的是 PAC 与 PAM 混合物,而合成有机高分子絮凝剂有毒,不适合于工业生产,天然有机高分子絮凝剂是一种新型的技术,对蛋白质的去除率高且安全环保,有较高的应用价值。

2.2.5 等电点沉淀法 在蛋白质等电点处,其净电荷为零,减少了蛋白质分子之间的作用力,导致他们极易发生碰撞,进而凝聚产生沉淀,所以此时蛋白质的溶解度最小,最易凝聚,然后就可以将其分离。

齐斌等^[41]对实际工业生产淀粉的过程进行了模拟,利用等电点沉淀法从得到的废水中提取马铃薯蛋白,最后得到的蛋白纯度为 85.38%。高洁等^[37]经过一系列实验得出等电点法回收马铃薯蛋白质的最佳工艺为 pH4.5、温度 60 ℃、处理时间 40 min,在此条件下马铃薯蛋白的回收率为 51.19%,纯度为 84.49%。Yi 等^[42]通过实验优化了蛋白质的回收工艺条件,得出最优回收工艺条件为:破碎液料比为 2 mL/g,pH4.5,沉降时间为 40 min 及沉降温度 35 ℃,这种条件下马铃薯淀粉废液蛋白质回收率可达 79.21%。所以等电点沉淀法经优化后蛋白质得率总体较高。

2.2.6 其他 现在我国工业发展速度飞快,人们对环境保护,合理开发及利用资源越来越关注,一些环保且成本低的方法不断被研究出来。泡沫分离技术是利用表面吸附原理,将气泡作为载体,对蛋白质进行分离,被称为泡沫吸附分离。有研究人员^[43]开发了一种倾斜式泡沫分离柱,利用它从马铃薯淀粉废液中提取蛋白,最终蛋白质回收率为 84.1%。

理化法回收蛋白质的方法除了等电点沉淀法、酸热法、超滤法等还有吸附法。马健等^[44]研究了蒙脱土吸附法的最佳条件,在蒙脱土加入量为 0.7 g,温度 40 ℃,震荡 2 h 的条件下,马铃薯蛋白质回收率可

以达到 50%。陈侠等^[45] 利用活性炭吸附法处理低浓度马铃薯淀粉废水,研究了不同指标对淀粉废水处理效果的影响。实验得到最佳处理条件为:活性炭粒径 40 目,用量 5 g,吸附时间为 1 h,废水温度为 27 ℃,pH 为 5.0,此时,活性炭对马铃薯淀粉废水的吸附效率最高达 48%。

2.3 马铃薯淀粉废水中蛋白回收工艺优化

综述各项蛋白提取方法,结合实际生产,本研究自行设计了以下工艺流程(图 2)从马铃薯淀粉废水中提取蛋白质,线路一是目前马铃薯淀粉的加工设备流程,线路二是将淀粉加工废水收集起来后利用酸热沉淀法和超滤法对其中的蛋白进行提取。我国工厂主要采用的是酸热沉淀法,但是这种方法对蛋白的提取率不高,而单独使用超滤法却极易造成膜堵塞,不能连续生产,所以本研究设计将两种方法并用,先用酸热沉淀法对废液中蛋白质进行初提取,然后在此基础上利用超滤设备进一步提取蛋白,这样可以将废液中的蛋白进一步提取,还可以在废水进入超滤设备之前对其进行“预处理”,以解决目前实验生产过程中超滤法不能连续生产和膜寿命短以及酸热沉淀法提取率低的问题,将两种方法结合提高了生产效率,降低了生产成本。马铃薯蛋白质的提取方法不同,蛋白质的得率、纯度和功能特性也有所区别。

3 马铃薯蛋白的应用

3.1 在食品加工中的应用

我国马铃薯蛋白主要来源于淀粉加工的副产物,然而蛋白的乳化性等易遭到破坏,尤其是在提取、纯化等回收工艺中。这极大地限制了其在食品工业中的应用。糖基化是一种绿色的蛋白改性方式,能够改善蛋白乳化特性、持水性等功能特性,改性产物被广泛应用于食品中。

冯元春等^[46] 以马铃薯蛋白为原料,将其加入到

低脂高蛋白营养型乳饮料中。姚佳等^[47] 为生产新型低脂高蛋白营养冰淇淋,以马铃薯浓缩蛋白为原料,代替部分奶粉及乳化剂。添加了马铃薯浓缩蛋白的冰淇淋细腻柔滑,抗融性好且膨胀率理想。赵晶等^[48] 用胰蛋白酶水解马铃薯蛋白,得到的水解物在一定条件下会发生热反应进而衍生特殊风味。杨龙松^[49] 马铃薯蛋白-黄原胶共价复合物(PP-XG)对冻融过程中速冻饺子皮结构的影响。PP-XG 的加入,增强了与蛋白、淀粉的相互作用,从而减少面筋网络的破坏,减缓了冻融过程中蛋白质二级结构、巯基及二硫键的变化,降低了淀粉短链有序化程度。马铃薯蛋白还可以被用于与不同比例的小麦和米粉组成复合面粉,以改善低筋曲奇饼干的质量属性^[50]。

从马铃薯蛋白中氨基酸成分分析可以看到,其中的天门冬氨酸的含量显著,而其在医药、食品和化工等方面用途非常广泛。在医药方面,它可以降低耗氧,对心肌的收缩有一定改善作用,还可以防止和恢复疲劳,所以可以将其应用于治疗高血压和心脏病。它还可以和多种氨基酸一起,制成氨基酸输液,用作氨解毒剂、肝功能促进剂以及疲劳恢复剂。在食品工业方面,天门冬氨酸是一种良好的营养增补剂,可以将其添加于各种清凉饮料;也是甜味素(阿斯巴甜)-天冬酰苯丙氨酸甲酯的主要原料,若将其应用于甜味素的加工,就可以使甜味素加工生产线与马铃薯淀粉生产线相结合,节省成本,避免原料的浪费,还可以保证甜味素原料的安全性。

3.2 在食品保鲜中的应用

食品的包装材料要有一定的抗菌性能。张乾等^[51] 用马铃薯蛋白、纳米氧化锌和壳聚糖制备了一种复合膜,利用单因素实验测定马铃薯蛋白含量、纳米氧化锌含量以及超声时间对复合膜机械性能的影响,再通过 Box-Behnken 响应面设计试验并进行优

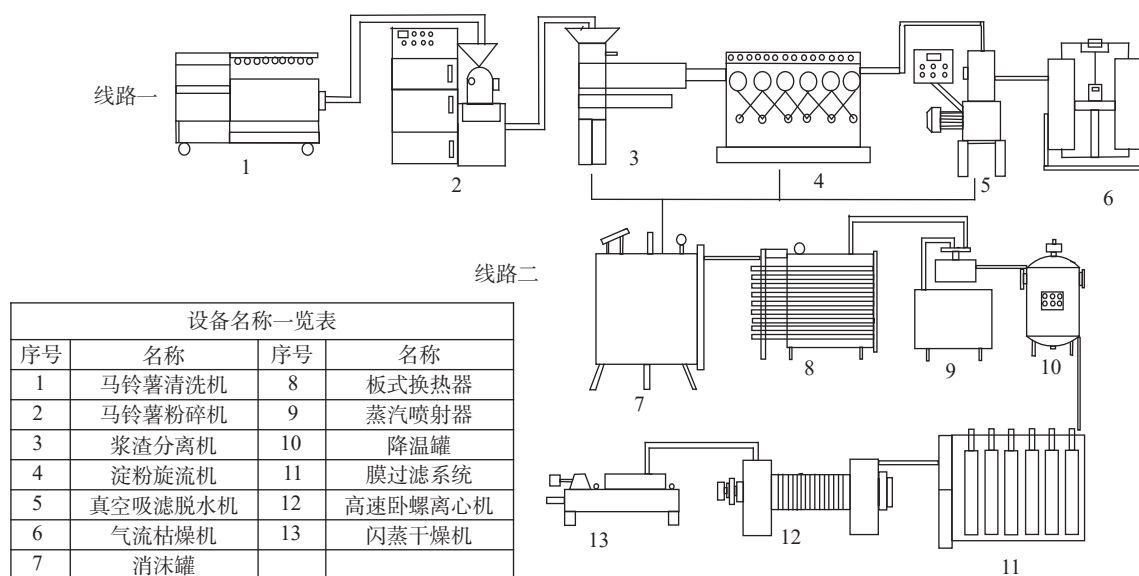


图 2 马铃薯淀粉废水中蛋白质回收生产设备流程图

Fig.2 Flow chart of protein production line equipment

化和验证。结果表明:在马铃薯蛋白添加量为 0.32%、纳米氧化锌添加量为 0.10% 以及超声时间为 19.52 min 的条件下,壳聚糖-马铃薯蛋白-纳米氧化锌复合膜的机械性能最好,并且加入一定量的马铃薯蛋白会提高复合膜韧性,最终使复合膜具有较好的机械性能,在新型食品包装材料的开发利用中具有较高的应用价值。

壳聚糖和蛋白质是常用的微胶囊壁材。张天奇等^[52]以马铃薯蛋白、山茶籽油以及壳聚糖为主要原料,运用复合凝聚法通过乳化、冷冻干燥等制备出性质稳定的微胶囊,通过考察微胶囊制备过程中乳液形成和复凝聚效果获得最佳制备条件。通过结构与性质表征发现,马铃薯蛋白基微胶囊壁材成功包裹芯材山茶籽油。在开发基于壳聚糖-马铃薯蛋白-亚麻籽油-氧化锌纳米粒子的生物聚合物膜来维持原料肉的贮藏品质过程中发现,这种膜可以很好的延缓微生物繁殖和减缓生鲜肉 pH 的上升速度^[53]。Wang 等^[54]将马铃薯蛋白作为保护性纳米载体用于在透明饮料溶液中递送维生素 D。研究者发现马铃薯蛋白在增溶、保护和提高亲脂性生物活性物质(如虾青素)的生物利用度方面的巨大潜力^[55]。

3.3 在动物饲料中的应用

现在越来越多的天然高分子絮凝剂被人们发现,而超滤技术也在人们的研究中不断改进、马铃薯蛋白受到广泛关注,人们发现可以用回收的马铃薯蛋白代替鱼粉加入到饲料中^[56]。已有研究报道,马铃薯蛋白可被制作成水生动物与陆生动物的饲料。

马铃薯蛋白最显著的特点就是必需氨基酸的含量很高,可以替代是鱼饵料。左金龙等^[57]研究发现,添加马铃薯蛋白的饵料喂养鲑鱼,一段时间后鲑鱼重量有明显增长,这种饵料可以代替部分鱼饵料。因鲷鱼是肉食性鱼类所以要保证饲料的高膳食蛋白质水平,但是使用鱼粉会大大增加成本,而马铃薯蛋白相

对便宜且更易获得。研究表明鲷鱼体重、体重增加率和热生长系数会随马铃薯蛋白增加而降低,但马铃薯蛋白替代 20% 鱼粉蛋白饵料不会对鲷鱼的生长性能有影响,所以马铃薯蛋白代替部分鱼粉是可行的。

蛋白饲料的短缺是影响我国畜牧业发展的主要原因,马铃薯蛋白产量大、营养丰富,因此被研究者重视。有研究者以断奶仔猪为研究对象,研究马铃薯浓缩蛋白所制成的饲料其进对其生长性能的影响。马铃薯蛋白可以很好的降低仔猪腹泻的可能性,提高其生长性能^[58]。李玉侠等^[59]采用不同浓度的马铃薯蛋白以及纯鱼粉饲喂仔猪,结果表明,与鱼粉组相比,马铃薯蛋白添加量不同的仔猪日均采食量无显著差异;添加 1% 马铃薯蛋白的仔猪日均增重与料重比显著优于其他组。在肉仔鸡的饮水中加入适量的马铃薯蛋白也可以一定程度上提高其生长性能^[60]。

马铃薯蛋白粉应用具有一定的局限性,因为在马铃薯蛋白粉中有一种成分为配糖生物碱,若在产品中的添加量过大会影响动物的适口性。实际应用中需要格外注意马铃薯蛋白中糖苷生物碱的含量,进而确定添加水平,避免出现影响动物生产性能的情况。

3.4 在细胞培养中的应用

马铃薯蛋白还可以应用与细胞培养。研究证明,马铃薯蛋白水解物添加至低血清培养基,可替代部分血清进行细胞培养,能促犬肾细胞(MDCK)贴壁细胞生长^[61]。研究马铃薯蛋白水解物(PPH)在细胞冻存的效果中,将添加 PPH 培养的第 10 代细胞培养至对数生长期以 2×10^6 cell·mL⁻¹ 的密度冻存一周后复苏发现细胞能正常生长传代并且细胞形态良好;在 PPH 代替血清进行细胞冻存效果评价结果表明,PPH 可以对 MDCK 贴壁细胞在冻存过程中提供保护,且能达到替代 5%~10% 血清。马铃薯蛋白的应用小结如表 5。

表 5 马铃薯蛋白的应用
Table 5 Application of potato protein

应用	产品	优点	来源
食品加工	低脂高蛋白营养型乳饮料	稳定性良好,风味独特,营养丰富	冯元春等 ^[46]
	新型低脂高蛋白营养冰淇淋	添加了马铃薯浓缩蛋白的冰淇淋细腻柔滑,抗融性好且膨胀率理想	姚佳等 ^[47]
	肉味香精	合成的风味物质香味浓郁,所得香气具有烤牛肉特征香味	赵晶等 ^[48]
	马铃薯蛋白-多糖复合物	减少面筋网络的破坏,减缓了冻融过程中蛋白质二级结构、巯基及二硫键的变化。	杨龙松等 ^[49]
	复合面粉	改善了低筋曲奇饼干的质量属性	Amanda等 ^[50]
食品保鲜	壳聚糖-马铃薯蛋白-纳米氧化锌复合膜	提高复合膜韧性,最终使复合膜具有较好的机械性能,在新型食品包装材料的开发利用中具有较高的应用价值	张乾等 ^[51]
	壳聚糖-马铃薯蛋白-亚麻籽油-氧化锌纳米粒子的生物聚合物膜	马铃薯蛋白基微胶囊壁材成功包裹芯材山茶籽油	张天奇等 ^[52]
	保护性纳米载体	延缓微生物繁殖和减缓生鲜肉pH的上升速度	Shlomit等 ^[53]
	鱼饵料	透明饮料溶液中递送维生素D	Wang等 ^[54]
动物饲料	仔猪饲料	可以保证饲料的高膳食蛋白质水平	左金龙等 ^[57]
	仔猪饲料	可以很好的降低仔猪腹泻的可能性,提高其生长性能	Tércia等 ^[58]
	仔猪饲料	添加1%马铃薯蛋白的仔猪日均增重与料重比显著优于其他	李玉侠等 ^[59]
细胞培养	肉仔鸡饲料	提高其生长性能	Lertpimonpan等 ^[60]
	马铃薯蛋白水解物添加至低血清培养基	能促犬肾细胞(MDCK)贴壁细胞生长	摆倩文 ^[61]

4 展望

我国提出马铃薯主粮化战略,马铃薯淀粉的加工量逐渐增加,所产生的废水量急剧增多,对其合理处理成为了急需解决的问题,但现如今我国对废水中的资源再利用技术水平仍需提高,有待于进一步研发适合于工业生产的方法。未来的研究发展方向主要是:对于工厂来说要兼顾经济效益和节约资源。大部分工厂都是通过简易手段去除马铃薯淀粉废水中的污染物,造成大量成分的浪费以及严重的环境污染。所以未来应将重点放在如何能够在高效处理废水的同时做到最大程度地回收有效资源或者是如何将马铃薯淀粉和蛋白一步式分离。并且现如今还没有能够根本解决马铃薯淀粉废水污染问题,采用单一方法提取高浓度马铃薯淀粉废水中的蛋白质效率也较低,效果不理想,未来研究者们应将重心放在研发污水处理的同时实现有效成分提取的方法,并且将两种或多种适用于工业生产的方法进行联用和优化,让其优势互补,最大程度提高马铃薯蛋白的率。并将最优方法广泛应用于实际生产中。所以多种方法联用的集成方法开发将是未来的发展趋势。虽然目前我国马铃薯蛋白已应用于食品加工、保鲜材料和动物饲料中,在一些化工材料、医药和化妆品等方面也有应用,但是还应加大对马铃薯蛋白在食品方面应用的研究力度,例如,是否可将其作为主要原料添加入营养补充剂类食品,是否可将其添加入健身人群所需蛋白粉中。这样可以扩大马铃薯蛋白的市场,进一步刺激研究者对马铃薯蛋白提取方法的优化。

综上所述,对马铃薯淀粉废水中的蛋白质进行回收利用不仅践行了绿色发展理念,解决马铃薯淀粉生产中的废液污染问题,还提高了马铃薯副产物的利用率,避免了资源浪费。设计高得率、适于工业生产的马铃薯蛋白提取方法以及探索马铃薯蛋白的应用是马铃薯蛋白未来研究的重中之重。

参考文献

[1] 岳新丽, 湛润生, 弓越, 等. 不同品种马铃薯营养成分分析及利用价值评价[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(7): 18-21. [YUE Xinli, ZHAN Runsheng, GONG Yue, et al. Analysis of nutritional quality and evaluation of utilization value of different potato varieties[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2021, 67(7): 18-21.]

[2] BING Gao, WEI Huang, XUE Xiaobo, et al. Comprehensive environmental assessment of potato as staple food policy in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(15): 270.

[3] 李扬, 王靖, 唐建昭, 等. 中国马铃薯主产区生产特点、限制因子和对策分析[J]. 中国马铃薯, 2020, 34(6): 374-382. [LI Yang, WANG Jing, TANG Jianzhao, et al. Analysis on production characteristics, limiting factors and countermeasures of potato in main producing areas of China[J]. Chinese Potato, 2020, 34(6): 374-382.]

[4] 孙永立. 马铃薯淀粉产量大幅增长高端需求增长空间大[J]. 中国食品工业, 2021(15): 104-107. [SUN Yongli. The output of potato starch increased substantially, and there was ample room for

high-end demand to grow[J]. China Food Industry, 2021(15): 104-107.]

[5] KOT A M, POBIEGA K, PIWOWAREK K, et al. Biotechnological methods of management and utilization of potato industry waste: A review[J]. Potato Research, 2020, 30(6): 431-447.

[6] GUMUL D, ARECZUK A, BERSKI W, et al. Selected physicochemical properties of starch isolated from colored potatoes (*Solanum tuberosum* L.) as compared to starch from yellow flesh potatoes[J]. Starch-Stärke, 2021, 74(3-4).

[7] MOUZO D, RODRÍGUEZVÁZQUEZ R, BARRIO C, et al. Comparative proteomics of potato cultivars with a variable dormancy period[J]. Molecules, 2022, 27(19): 66-71.

[8] WICHROWSKA D, SZCZEPANEK MAŁGORZATA. Possibility of limiting mineral fertilization in potato cultivation by using bio-fertilizer and its influence on protein content in potato tubers[J]. Agriculture, 2020, 10(10): 87-90.

[9] 唐亚武. 马铃薯 22-KD 球蛋白的分离纯化及其结构测定的研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2011. [TANG Yawu. Study on separation, purification and structure determination of 22-KD globulin from potato[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2011.]

[10] 胡耀辉, 齐斌. 马铃薯中球蛋白的提取及纯化研究[J]. 食品科技, 2011, 36(10): 200-202, 207. [HU Yaohui, QI Bin. Extraction and purification of globulin from potatoes[J]. Food Technology, 2011, 36(10): 200-202, 207.]

[11] 刘彦彤, 孙伟, 董墨思, 等. 马铃薯糖蛋白 Patatin 的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 331-337. [LIU Yaotong, SUN Wei, DONG Mosi, et al. Recent progress in research on Patatin, the major potato tuber protein[J]. Food Science, 2019, 40(11): 331-337.]

[12] KATHERINE A. Beals, potatoes, nutrition and health[J]. American Journal of Potato Research, 2019, 96(2): 153-157.

[13] MEHTAP Ç, METİN Y, ZELİHA Y. Potato proteins[J]. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2016(2): 41-44.

[14] FU Y, LIU W N, OLUGBENGA P S. Towards potato protein utilisation: Insights into separation, functionality and bioactivity of patatin[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(6): 2314-2322.

[15] BÁRTA J, BÁRTOVÁ V PATATIN. The major protein of potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers, and its occurrence as genotype effect: Processing versus table potatoes[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2008, 36(5): 347-359.

[16] HUSSAIN M, QAYUM A, XIUXIU ZHANG, et al. Potato protein: An emerging source of high quality and allergy free protein and its possible future based products[J]. Food Research International, 2021, 148.

[17] 潘牧, 彭慧元, 邓宽平, 等. 马铃薯蛋白的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(10): 22-26. [PAN Mu, PENG Huiyuan, DENG Kuanping, et al. Research progress of potato protein[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(10): 22-26.]

[18] 苏现波, 尚会霞. 马铃薯淀粉废水蛋白的功能特性[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 115-120. [SU Xianbo, SHANG Huixia. Functional properties of proteins in potato starch wastewater[J]. Food Science, 2016, 37(17): 115-120.]

[19] DACHMANN E, NOBIS V, KULOZIK U, et al. Surface and foaming properties of potato proteins: Impact of protein concentration, pH value and ionic strength[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107.

[20] 范吉星, 邓用川, 黄惜, 等. 红海榄根总蛋白质提取方法的改进和双向电泳体系的建立[J]. 湖南农业大学学报(自然科学

- 版), 2008(5): 549-553. [FAN Jixing, DENG Yongchuan, HUANG Xi, et al. Improvement of extraction method and establishment of two dimensional electrophoresis system of total protein from root of Red olive[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2008(5): 549-553.]
- [21] 李萌萌, 蒋继志, 王会仙. 几种提取马铃薯块茎蛋白质方法的比较研究[J]. 安徽农学通报(上半月刊), 2009, 15(23): 37-38. [LI Mengmeng, JIANG Jizhi, WANG Huixian. Comparative study on several methods of extracting protein from potato tuber[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin (First semi-monthly), 2009, 15(23): 37-38.]
- [22] 唐世明, 曹君迈, 陈彦云, 等. 马铃薯块茎蛋白质提取方法的筛选[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 326-329. [TANG Shiming, CAO Junmai, CHEN Yanyun, et al. Screening of protein extraction methods from potato tuber[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(9): 326-329.]
- [23] 黄闯, 张泽生, 王玉本, 等. 马铃薯蛋白酸水解工艺及氨基酸组分检测[J]. 食品科技, 2010, 35(8): 317-321. [HUANG Chuang, ZHANG Zesheng, WANG Yuben, et al. Acid hydrolysis process of potato protein and the detection of amino acid's composition[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(8): 317-321.]
- [24] 刘婷婷, 姚佳, 张飞俊, 等. 回收马铃薯淀粉废水中蛋白质的工艺优化[J]. 食品科技, 2013, 38(10): 202-208. [LIU Tingting, YAO Jia, ZHANG Feijun, et al. Optimization of protein extraction process from potato starch wastewater[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(10): 202-208.]
- [25] 张亚军, 王玉杰, 张龙, 等. 马铃薯蛋白高效提取分离技术优化[J]. 青海农林科技, 2021(2): 1-5, 8. [ZHANG Yajun, WANG Yujie, ZHANG Long, et al. Optimization of high efficient extraction and separation technology of potato protein[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2021(2): 1-5, 8.]
- [26] 张泽俊, 苏春元, 刘期成. 马铃薯淀粉厂工艺废水的综合处理及利用研究[J]. 食品科学, 2004(S1): 136-139. [ZHANG Zhejun, SU Chunyuan, LIU Qicheng. Study on comprehensive treatment and utilization of process wastewater from potato amylator Plant[J]. Food Science, 2004(S1): 136-139.]
- [27] 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. Pilot study on protein recovery from potato starch wastewater by membrane technology[J]. Food and Nutrition in China, 2008(4): 37-40.]
- [28] 顾文芬, 曾凡远, 程锦春. 超滤法从马铃薯淀粉加工分离汁水中回收蛋白质的研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(3): 131-136. [GU Wenfen, ZENG Fankui, CHENG Jinchun. Study on the protein recovery from potato starch processing water by ultrafiltration[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(3): 131-136.]
- [29] LI Hongbin, ZENG Xianhua, SHI Wenying, et al. Recovery and purification of potato proteins from potato starch wastewater by hollow fiber separation membrane integrated process[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020, 63(prepublish).
- [30] 高丹丹, 徐纪平, 李贞子. 木瓜蛋白酶水解马铃薯蛋白水解条件的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 267-271. [GAO Dandan, XU Jiping, LI Zhenzi. Study on the optimum conditions of the hydrolyzation of potato protein by papain[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(8): 267-271.]
- [31] 甘雨, 李富贵, 马海锐, 等. 木瓜蛋白酶水解马铃薯蛋白工艺优化研究[J]. 广东蚕业, 2020, 54(10): 18-21. [GAN Yu, LI Fugui, MA Hairui, et al. Study on process optimization of papain hydrolysis of potato protein[J]. Guangdong Sericulture, 2020, 54(10): 18-21.]
- [32] 赵晶, 王雪飞, 白杨. 酶法水解马铃薯蛋白技术的研究[J]. 食品科技, 2008(8): 48-50. [ZHAO Jing, WANG Xuefei, BAI Yang. Study on the technique of hydrolyzed potato protein by proteinase[J]. Food Science and Technology, 2008(8): 48-50.]
- [33] 马丞鸿, 张树林, 丛方地, 等. 絮凝法回收马铃薯淀粉废水中蛋白质的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(23): 113-117. [MA Chenghong, ZHANG Shulin, CONG Fangdi, et al. Study progress on the recovery of proteins from potato starch wastewater by flocculation[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(23): 113-117.]
- [34] 金虹. 马铃薯淀粉生产废液中蛋白质提取工艺的优化[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(12): 2516-2518. [JIN Hong. Optimization of extraction process of protein from wastewater of potato starch production[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(12): 2516-2518.]
- [35] 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.]
- [36] 张亚群, 陶伟, 王成元. 混凝沉淀试验对马铃薯淀粉废水处理的研究[J]. 甘肃科技, 2011, 27(5): 41-42. [ZHANG Yaquin, TAO Wei, WANG Chengyuan. Study on the treatment of potato starch wastewater by coagulation and precipitation test[J]. Gansu Science and Technology, 2011, 27(5): 41-42.]
- [37] 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. Recovery and properties of proteins from potato starch wastewater[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.]
- [38] 刘玉峰, 唐胡钰. 絮凝沉淀去除马铃薯淀粉加工废水中蛋白质的试验研究[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(10): 10-13. [LIU Yufeng, TANG Huyu. Tentative study on removing protein from potato starch wastewater by flocculent precipitation[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013, 31(10): 10-13.]
- [39] 裴兆意. 壳聚糖絮凝剂的制备及其在食品工业上的应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007. [PEI Zhaoyi. Preparation of chitosan flocculant and its application in food industry[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.]
- [40] 张轶, 杨大林, 韩杰, 等. 磁性壳聚糖微球吸附马铃薯淀粉废水中蛋白质的应用研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(9): 251-253. [ZHANG Yi, YANG Dalin, HAN Jie, et al. Study on application of absorbing protein in potato starch waste water by magnetic chitosan microspheres[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(9): 251-253.]
- [41] 齐斌, 郑丽雪, 朴金苗. 马铃薯分离蛋白的提取工艺[J]. 食品科学, 2010, 31(22): 297-300. [QI Bin, ZHANG Lixue, PIAO Jinhui. Extraction processing of potato protein isolate[J]. Food Science, 2010, 31(22): 297-300.]
- [42] 易伟民, 徐炳政, 鹿保鑫. 马铃薯淀粉废液中蛋白质回收工艺研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014(10): 34-38. [YI Weimin, XU Bingzheng, LU Baoxin. Research on the technology of recovering protein from potato starch wastewater[J]. Cereal & Feed Industry, 2014(10): 34-38.]
- [43] MU, LIU, ZHANG, et al. Protein recovery from sweet potato starch wastewater by foam separation[J]. Separation Science and Technology, 2014, 49(14).
- [44] 马健, 刘万毅, 董梅. 马铃薯淀粉废水中蛋白质的回收[J]. 宁夏工程技术, 2018, 317(3): 231-234. [MA Jian, LIU Wanyi,

- DONG Mei. Recovery of protein from potato starch wastewater[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2018, 317(3): 231–234.]
- [45] 陈侠, 张翠菊, 栗少燕. 活性炭吸附法处理淀粉废水的试验研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(12): 5524–5525. [CHEN Xia, ZHANG Cuiju, LUAN Shaoyan. Study on treatment of potato starch wastewater through activated carbon adsorption[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(12): 5524–5525.]
- [46] 冯元春, 姚佳, 刘婷婷, 等. 马铃薯蛋白乳饮料的研制[J]. *食品工业*, 2013, 34(12): 27–30. [FENG Yuanchun, YAO Jia, LIU Tingting, et al. Development of a milk beverage of potato protein[J]. *The Food Industry*, 2013, 34(12): 27–30.]
- [47] 姚佳, 徐旭, 魏春光, 等. 马铃薯蛋白在冰淇淋生产中的应用[J]. *乳业科学与技术*, 2012, 35(3): 25–29. [YAO Jia, XU Xu, WEI Chunguang, et al. Application of potato protein in ice cream[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2012, 35(3): 25–29.]
- [48] 赵晶, 陈玲玲. 利用马铃薯蛋白的酶水解物制备肉味香精的研究[J]. *中国调味品*, 2008(9): 77–79, 83. [ZHAO Jing, CHEN Lingling. Study on the preparation of meat flavor using enzymatic hydrolyzate of potato protein[J]. *China Condiment*, 2008(9): 77–79, 83.]
- [49] 杨龙松. 马铃薯蛋白-多糖复合物的制备及其对饺子皮品质的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2021. [YANG Longsong. Preparation of potato protein-polysaccharide complex and its effect on the quality of dumpling skin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2021.]
- [50] AMANDA W, SALWA K. Predictive consumer acceptance models and quality attributes for cookies enriched with potato protein isolate and concentrate[J]. *Food and Bioprocess Technology: An International Journal*, 2020, 13(9): 1645–1660.]
- [51] 张乾, 王亚迪, 成德伟, 等. 壳聚糖/马铃薯蛋白/纳米氧化锌复合膜的研制[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 34(5): 64–68. [ZHANG Qian, WANG Yadi, CHENG Dewei, et al. Preparation of chitosan/potato protein/nano-ZnO composite membrane[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 34(5): 64–68.]
- [52] 张天奇, 陈彦廷, 崔延如, 等. 壳聚糖/马铃薯蛋白/山茶籽油微胶囊的研制[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(2): 53–57. [ZHANG Tianqi, CHEN Yanyan, CUI Yanru, et al. Development of chitosan-potato protein-camellia oil microcapsules[J]. *Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition*, 2022, 36(2): 53–57.]
- [53] SHLOMIT D, YOAV D L. Potato protein based nanovehicles for health promoting hydrophobic bioactives in clear beverages[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 57(3): 229–235.]
- [54] WANG Chenjie, CHANG Tong, DONG Shuang, et al. Biopolymer films based on chitosan/potato protein/linseed oil/ZnO NPs to maintain the storage quality of raw meat[J]. *Food Chemistry*, 2020, 332(1): 127–135.]
- [55] RAVIT EDELMAN, SHIRA ENGELBERG, LULU FAHOUM, et al. Potato protein- based carriers for enhancing bioavailability of astaxanthin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96.]
- [56] FUMIAKI T, KEINOSUKE S, TAKAO H, et al. Availability of potato protein concentrate as an alternative protein source to fish meal in greater amberjack (*Seriola dumerili*) diets[J]. *Aquaculture Research*, 2020, 51(3): 1293–1302.]
- [57] 左金龙, 杨少冬, 夏至, 等. 马铃薯蛋白废水综合利用及在动物生产中的应用[J]. *饲料研究*, 2022, 45(5): 154–157. [ZUO Jinlong, YANG Shaodong, XIA Zhi, et al. Comprehensive utilization of potato protein wastewater and its application in animal production[J]. *Feed Research*, 2022, 45(5): 154–157.]
- [58] TÊRCIA C R D S, ARACELI A B, SARA RUBIO R, et al. Growth performance, diarrhoea incidence, and nutrient digestibility in weaned piglets fed an antibiotic-free diet with dehydrated porcine plasma or potato protein concentrate[J]. *Annals of Animal Science*, 2019, 19(1): 159–172.]
- [59] 李玉侠, 刘化伟, 卢志勇, 等. 马铃薯蛋白粉替代鱼粉对仔猪生长性能的影响[J]. *饲料博览*, 2021(2): 1–5. [LI Yuxia, LIU Huawei, LU Zhiyong, et al. Effect of potato protein meal replacing fish meal on growth performance of piglets[J]. *Feed Review*, 2021(2): 1–5.]
- [60] LERTPIMONPAN S, RAKANGTHONG C, BUNCHASAK C S, et al. Effects of fermented potato protein supplementation in drinking water on growth performance, carcass characteristics, small intestinal morphology and expression of IGF-1 and GHR genes in the liver of broiler chickens[J]. *Indian Journal of Animal Research*, 2019, 53(5): 622–627.]
- [61] 摆倩文. 马铃薯蛋白水解物制备及促 MDCK 细胞生长研究[D]. 兰州: 西北民族大学, 2021. [BAI Qianwen. Study on preparation of potato protein hydrolysate and promotion of MDCK cell growth[D]. Lanzhou: Northwest Minzu University, 2021.]