

玉米湿法工艺提取淀粉的研究进展

刘泽亿, 白锦林, 张铁华*, 闫晓侠*

(吉林大学 食品科学与工程学院, 吉林 长春 130062)

摘要: 湿法加工是一种常见的农产品加工工艺, 可以分离出农产品中的不同组分, 该文主要从玉米的自身性质及贮藏条件介绍湿法提取玉米淀粉的影响因素, 论述传统湿法提取的弊端及局限性, 介绍近年来诸如酶法、超声法、挤压法等一些新型高效、绿色的玉米淀粉提取方法, 以期加工中降低能源消耗和二氧化碳排放量提供参考。

关键词: 玉米; 玉米淀粉; 农产品; 加工工艺; 湿法提取

Research Progress in Extraction of Corn Starch by Wet Milling

LIU Zeyi, BAI Jinlin, ZHANG Tiehua*, YAN Xiaoxia*

(College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, Jilin, China)

Abstract: Wet milling is a common processing technology for agricultural products, allowing the separation of different components. The factors affecting the extraction of corn starch by wet milling were introduced from the corn quality and storage conditions, and then the drawbacks and limitations of conventional wet milling methods were summarized. Furthermore, new efficient and green methods for the extraction of corn starch, such as enzyme, ultrasound, and extrusion methods developed in recent years, were introduced, with a view to providing theoretical references for reducing energy consumption and carbon dioxide emissions.

Key words: corn; corn starch; agricultural products; processing technology; extraction by wet milling

引文格式:

刘泽亿, 白锦林, 张铁华, 等. 玉米湿法工艺提取淀粉的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(5): 205-210.

LIU Zeyi, BAI Jinlin, ZHANG Tiehua, et al. Research Progress in Extraction of Corn Starch by Wet Milling[J]. Food Research and Development, 2024, 45(5): 205-210.

玉米是禾本科玉蜀黍族一年生植物, 也是全球生产最广泛的农作物之一^[1]。其籽粒主要由四部分组成: 胚乳 83%、胚芽 11%、果皮 5%、根冠 1%^[2], 其中胚乳是决定谷物质量的核心成分, 胚乳中超过 90% 的成分和大部分细胞内空间被蛋白质网包裹的淀粉颗粒占据^[3]。玉米胚乳可分为粉质胚乳和角质胚乳, 粉质胚乳细胞较大且结构疏松, 细胞、蛋白质基质对淀粉的束缚能力较弱, 淀粉团粒之间间隙大, 加工回收更为容易; 而角质胚乳细胞较小且结构致密, 淀粉粒紧密排列并镶嵌在蛋白质基质中, 使得淀粉的回收需要更长时间的浸泡^[4]。胚乳中淀粉的生物合成需要正确地执行一系列协调的酶促反应, 包括腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶 (adenosine diphosphate-glucose pyrophosphory-

lase, AGPase)、可溶性淀粉合酶 (soluble starch synthase, SSS)、颗粒结合淀粉合酶 (granule bound starch synthase, GBSS)、淀粉分支酶 (starch branching enzyme, SBE)。在细胞内淀粉合成的过程中, AGPase 催化葡萄糖-1-磷酸与三磷酸腺苷 (adenosine triphosphate, ATP) 反应生成腺苷二磷酸葡萄糖 (adenosine diphosphate-glucose, ADP-Glu), SSS 和 GBSS 以 ADP-Glu 为底物, 将 ADP-Glu 的葡萄糖基转移至 (1,4)-葡聚糖链的非还原末端, 形成 α -1,4 糖苷键, SBE 包括 SBEI 和 SBEII, 能水解催化 α -1,4 糖苷键断裂, 并将释放出的寡聚糖链以其还原端连接到葡聚糖链残基的 C6 羟基上, 形成 α -1,6 糖苷键, 产生淀粉的分支链^[5]。

通常来说, 从玉米中提取淀粉主要有两种方法, 即

基金项目: “十四五”国家重点研发计划子课题 (2021YFD2101004)

作者简介: 刘泽亿 (1999—), 男 (汉), 在读硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程。

*通信作者: 张铁华 (1970—), 男 (汉), 教授, 博士, 研究方向: 农产品精深加工与安全控制; 闫晓侠 (1986—), 女 (汉), 讲师, 博士, 研究方向: 农产品精深加工。

干法和湿法,干法工艺是将玉米粉碎后筛分,分离出胚芽、纤维,得到玉米粉,与湿法工艺相比其最明显的缺点是淀粉纯度低。目前在工业上普遍使用的是湿法,此法具有淀粉纯度较高、能提取可溶性物质、原料损失少、抑制杂菌(霉菌毒素)繁殖^[6]、淀粉颗粒的机械损伤小等优点,因而被广泛应用。湿法研磨过程中,为了获得最佳的淀粉回收率,通常是将玉米籽粒浸泡在 50~52℃的水中,并加入亚硫酸浸泡 48~72 h,其中 SO₂ 含量为 0.2%~0.3%^[7]。一般来说,浸泡分为 3 个阶段,分别是乳酸作用阶段、二氧化硫扩散阶段以及二氧化硫反应阶段。乳酸有助于软化玉米粒,削弱胚乳细胞壁结构并加快 SO₂ 进入胚乳的速率,而 SO₂ 一方面作用于胚芽使其钝化,改变表皮的通透性,另一方面削弱或破坏蛋白质基质之间连接的二硫键使其解聚,从而释放包裹的淀粉颗粒。浸泡后,首先分离玉米胚芽,从胚芽中可提取玉米油,最后进一步分离剩余组分得到淀粉、麸质和纤维成分。

虽然亚硫酸在玉米淀粉的提取中效果较好,但亚硫酸的使用会对设备造成腐蚀并增加废水的处理难度,容易造成环境污染。为改善玉米淀粉生产工艺,目前已经探索出了许多较为绿色的替代手段,如采用乳酸杆菌、酶制剂、还原剂、物理手段等新型生物方法和物理方法。实践证明这些方法能在不影响淀粉产率和纯度的同时可减少对环境的影响,并能在一定程度上缩短加工时间,降低生产成本。本文主要总结湿法提取玉米淀粉的影响因素旨在介绍影响湿法提取及近年来的一些新型高效、绿色的玉米淀粉提取方法,以期对玉米淀粉提取过程中的降本增效提供理论基础。

1 玉米籽粒自身性质及外部条件对玉米淀粉提取率的影响

玉米籽粒的生长、成熟、收获、贮存等一系列过程都会影响其中淀粉的产量。下面将从籽粒的自身性质和外部条件两方面探讨影响玉米淀粉提取率的因素。

1.1 籽粒自身性质的影响

玉米籽粒的自身性质包括含水量、容重、纯粮率、淀粉含量、直链淀粉含量、破碎强度等^[8]。Somavat 等^[9]比较了蓝色、紫色、黄色马齿型 3 种类型玉米中淀粉的提取率,研究发现相较于紫色马齿型(63.36%)和蓝色马齿型(61.43%)两个品种,黄色马齿型的淀粉产率显著提高(70.13%),原因可能与不同玉米的蛋白含量有关,其中紫色玉米和蓝色玉米的蛋白提取率分别为 13.77% 和 14.23%,两个品种玉米的蛋白提取率显著低于黄色玉米的 10.54%($p<0.05$),蛋白质基质对淀粉颗粒的结合较强,淀粉分离困难从而导致其产率较低。Da Silva Timm 等^[10]研究了玉米籽粒品种对玉米淀粉提取率的影响,发现淀粉提取率均遵循 b(白色粉质玉

米)>a(黄色粉质玉米)>c(黄色硬粒玉米)这一规律,a、b 品种的淀粉颗粒结构倾向于球形而 c 品种的淀粉颗粒结构倾向于多面体形,这种由基因型引起结构差异导致了胚乳中蛋白质与淀粉结合力的不同从而影响淀粉的提取率。Xu 等^[11]对粉状、角质胚乳的研究佐证了 Da Silva Timm 等^[10]的观点,角质胚乳中受损淀粉的含量和蛋白质含量都显著高于粉状胚乳,粉状胚乳中淀粉比角质胚乳中的淀粉更耐酶水解,不易与蛋白基质分离。这些研究证明了籽粒的自身性质会直接或间接地影响玉米淀粉的提取率。

1.2 籽粒外部条件的影响

玉米籽粒在收获、贮藏过程中的外部条件包括干燥处理时间、干燥温度、贮存时间、贮存温度等。Haros 等^[12]将两个品种的玉米在 110℃下干燥后提取,与未干燥处理的玉米对比,发现干燥后两种玉米淀粉的提取率从 96.5% 和 97.5%(未干燥)分别下降到 82% 和 90%(110℃干燥)。Malumba 等^[13]研究了干燥温度与玉米淀粉产量的关系,随着温度增加(54~130℃),淀粉提取率从 64.4% 下降到 44.1%,可能是高温使胚乳蛋白变性,导致提取过程中淀粉不完全释放。为了更准确地描述干燥温度对湿法提取玉米淀粉的影响,建立了籽粒理化性质与玉米粒干燥温度之间的关系,表明高干燥温度致使盐溶性蛋白质不易溶解,从而导致加工过程中蛋白质和淀粉颗粒分离困难,因此,总盐溶性蛋白质的溶解度指数可以作为一个参数来评估玉米湿法提取淀粉的提取率,然而,上述研究均未研究贮存条件对提取率的影响。Paraginski 等^[14]将玉米籽粒在不同的温度下贮藏 12 个月后提取淀粉,发现过高的贮藏温度会影响淀粉产量和纯度,贮藏温度为 35℃时的提取率(45.99%)明显低于 5、15、25℃的提取率(62.88%~66.94%)。随着贮藏温度的增加,玉米淀粉的 *L** 值逐渐降低,颜色变黄,可能与淀粉中残留的蛋白质含量增加有关。此项研究结果表明,需要选择合适的玉米贮藏温度来保证提取出玉米淀粉的产率及理化性质。

Uriarte-Aceves 等^[15]研究了 16 个黄玉米品种的蛋白质含量、容重、籽粒密度、吸水性、与淀粉产量之间的关系,构建了产量与籽粒理化性质的数学模型来模拟淀粉产量,结果表明,淀粉产量与蛋白质含量、容重、核密度呈负相关,与吸水性呈正相关。综上所述,适合的籽粒的自身性质与外部条件可有效节约成本,提高玉米淀粉的提取率。

2 新型玉米淀粉的湿法提取工艺

谷物湿法加工是谷物经浸泡、研磨、分离得到淀粉等组分的过程^[16]。湿法提取的特点是生产成本较低,工艺流程较为简单,但存在生产时间长、效率低、污染

严重和设备损耗大等诸多问题^[17],因此,近年来逐渐开发传统湿法工艺的替代分离方法。新型提取工艺的目的在于保证生产效率的前提下,降低环境污染、减少能耗,这些替代传统工艺的方法大致可以分为两类:一是使用化学物质促进淀粉和蛋白质的分离,二是利用物理方法促进淀粉和蛋白质的分离。这些新型技术优化了玉米淀粉的生产工艺,旨在用绿色、低碳的方法提高玉米淀粉的提取率和品质。

2.1 酶解法在玉米淀粉湿法提取中的应用

湿法提取淀粉一般以乳酸、酶、食品还原剂、发酵液^[18]等物质替代二氧化硫,在不改变淀粉的理化性质的同时起到软化籽粒、破坏蛋白结构的作用。玉米胚乳中淀粉与蛋白质的结合方式会影响玉米淀粉提取率,酶解法使用的蛋白酶可以使玉米籽粒中的蛋白软化、膨胀、减弱或破坏淀粉和蛋白质之间的结合力。主要使用的蛋白酶有酸性蛋白酶、中性蛋白酶、菠萝蛋白酶和木瓜蛋白酶等。此外酶解法还会使用破壁酶,如纤维素酶、果胶酶和木聚糖酶等以破除细胞壁,增加细胞壁的通透性,使得浸泡液更容易进入细胞内部发生作用,并提高籽粒吸水率^[19]。两种酶都可以促进淀粉和蛋白质的分离,酶的添加旨在缩短浸泡时间、提高生产效率和收益。

Edna 等^[20]根据工厂的湿法研磨生产过程得到了成本估算模型,结合模型可知,与传统生产线相比,该工厂的酶法生产线将成本降低了 5.5%,对于每天可加工 254 万 kg 玉米的工厂而言,每年减少二氧化硫的用量为 461 926 kg。Singh 等^[21]使用酸性真菌蛋白酶代替了二氧化硫的使用,随着蛋白酶用量的增加,淀粉得率从 58.7% 提高到 70.9%,将这一方法应用到工业化生产中,发现与传统二氧化硫工艺相比,淀粉得率提高了 2.1%~4.6%,但该研究仅对比了二氧化硫工艺与酶工艺对淀粉提取率的影响。Liu 等^[22]不仅研究了不同方法下的提取率,还进一步研究了淀粉的理化性质,酶法提取的淀粉产量(82.77%)显著高于干法(75.04%),干法玉米淀粉和酶法玉米淀粉平均颗粒尺寸分别为 43.67 μm 和 16.74 μm ,酶法提取的淀粉平均粒径和结晶度分别降低了 61.68% 和 19.32%,说明中性蛋白酶能通过水解胚乳中的蛋白质来削弱淀粉和蛋白质的结合力。Somavat 等^[23]则采用 3 种工艺即酶法、间歇湿法和动态浸泡以及传统湿法对高直链淀粉品种玉米淀粉产率进行了分析,发现酶法的平均淀粉产量(60.15%)高于间歇湿法和动态浸泡(50.75%)以及传统湿法(46.25%),在提高产量的同时将浸泡时间减少了 33%。Ozturk 等^[24]则对玉米纤维中保留的淀粉进行了研究,发现玉米纤维内含有约 13% 的淀粉没有被分离出来,通过对元素组成进行分析计算,发现保留的淀粉中与蛋白质基质有关的量占保留淀粉总量的 54%,通

过去除淀粉颗粒周围的蛋白质基质可以释放残留的淀粉颗粒,在此基础上,Ozturk 等^[25]应用多种酶制剂对湿法过程中玉米纤维进行处理,发现纤维素酶、木聚糖酶和蛋白酶协同作用使提取率提高了 4.6%。以上研究表明,使用酶制剂代替二氧化硫是一种非常具有发展前景的生产工艺。

酶法的优点在于减少设备腐蚀、减少二氧化硫排放、简化工艺流程、缩短工艺周期、提高生产效率、消除蛋白质与淀粉分离不彻底等问题。但目前酶制剂的价格普遍高于传统方法使用的二氧化硫,并且酶的作用需要精确的 pH 值,使用酶制剂全面替代二氧化硫不符合目前实际生产情况,因此,如何选取合适的酶制剂以平衡效益与污染的问题是玉米淀粉生产企业需要解决的问题。

2.2 物理方法在玉米淀粉湿法提取中的应用

物理加工诸如超声、挤压、超高压等在食品工业中变得越来越重要^[26]。近年来,将功率和高频超声用于各种基础食品研究和商业应用具有很大的应用前景,超声波逐渐成为食品科学技术中广泛使用的一种非热技术^[27]。超声波技术已广泛应用在各种食品的生产过程中,用于产品的加工、保存和改性,例如乳化、食用膜、降解、均质等。超声波在食品加工中具有以下优点:产品产量高、加工时间短、运营和维护成本低,同时可以改善产品质量属性及减少病原体等^[28]。此外,挤压技术是食品工业中一种灵活高效的绿色食品加工方法,作为食品工业中酸、碱和生物聚合物的反应器,挤压机的发展经历了从单螺杆挤压机到双螺杆/三螺杆挤压机的历程,其具有高效、低成本、易控制产品性状的优势,所适用的范围也从食品加工领域延伸到其他加工行业中^[29]。

2.2.1 超声

超声是指超声波在溶剂介质中的传播导致基质内空化气泡核的激活产生、膨胀振荡、收缩溃灭的一系列过程,这一过程被称为超声波的空化效应^[30]。在使用超声波提取的过程中,电能转化为震动能,一部分能量转化为热量而损失,其余的能量带来的温度和压力的变化将在液体中形成强大的冲击波,其带来的高速射流产生一种强大的流体剪切应力,破坏细胞壁、细胞膜等保护结构,从而释放出待提取的组分^[31]。超声在淀粉提取中的应用主要是针对粗淀粉在水中的悬浮液体系,超声波的空化效应破坏了谷物胚乳中蛋白质基质的高级结构,减弱了淀粉与蛋白质的联结力,促进了淀粉和蛋白质的分离。影响超声辅助提取的因素包括:超声波的频率和功率、超声波强度^[32]。超声波按频率和强度可分为 3 类:高强度低频、中强度中频、低强度高频率。低频率使超声波对媒介作用时间更长,气泡核膨胀程度更大,收缩溃灭产生更多的能量。相比于低

频超声,高频超声需要消耗更多的能量才能达到同等效果^[33],因此,目前在食品超声加工中更多地选用低频处理。

Cameron 等^[34]在酶法过程中应用了超声处理,与单独使用蛋白酶相比,玉米淀粉得率从 45.8%~63.9% 提高到 61.2%~76.1%,随着超声振幅和持续时间的增加,残留蛋白质含量大大降低。Benmoussa 等^[35]将制得的淀粉悬浮液进行超声处理,并与传统干法、湿法进行了比较,发现超声处理将整个工艺时间缩短为 2 h,大大提高了分离效率及产量,减少了加工过程中淀粉的破损率,但是此研究中的因素较少,研究结果也仅关于产量和加工时间,没有涉及到反应机制的研究。Miano 等^[36]在此基础上研究了超声处理对玉米粒吸水率及淀粉特性的影响,超声波将水化速度提升了 35%,增加了吸水率,而不会改变淀粉的性质,表明玉米粒可用超声处理快速水合。Liu 等^[37]采用恒定的频率(20 kHz)研究了功率、料液比、时间 3 个因素对玉米淀粉得率和理化特性的影响,得出最佳工艺为功率 200 W、料液比 1:1 (g/mL)、时间 15 min,此时淀粉得率为 56.68%,相比传统法淀粉得率提高了 11%,且超声没有改变淀粉颗粒的表面结构和糊化特性。在此基础上,研究了超声对淀粉和蛋白质理化性质、结构特征的影响,发现淀粉理化性质并没有明显改变,而超声引起了二硫键和氢键的破坏以及疏水基团的暴露,淀粉颗粒的释放机制可能是蛋白质分子展开,淀粉-蛋白质团块破裂导致的^[38]。

超声处理并不适用于一切植物来源的淀粉,当植物的胚乳中淀粉与蛋白质结合紧密时,超声辅助这一方法可表现出良好的提取效果,如超声辅助提取高直链玉米淀粉时破损淀粉含量(8.01%)与传统方法(8.09%)无明显差异($p>0.05$),反之则效果不佳,如超声辅助提取普通玉米淀粉时破损淀粉含量(5.65%)与传统方法(5.02%)有明显差异($p<0.05$)^[16]。Zuo 等^[39]发现超声会对马铃薯淀粉颗粒表面造成损伤,空化诱导的微射流和剪切力是造成淀粉颗粒损坏的原因。Karaman 等^[40]通过对多种豆类的研究发现,随着超声波频率和强度的增加,豆类淀粉的得率均显著降低,糊化温度小幅度增加,且表面也出现了不同程度的损伤。因此,在使用超声辅助提取时需要注意被提取对象的种类和超声工艺条件的选择。

2.2.2 挤压

挤压技术包括混合、输送、搅拌、加热、蒸煮、物理剪切和挤压成型等多个物理过程^[41]。热压室是挤压技术的核心,在挤出机的热压室中,原料被旋转螺杆推进、混合、研磨和压缩,在热能和剪切力的共同作用下实现对原料的加工。挤压过程中主要影响因素取决于原材料的类型和挤出蒸煮变量,如喂料速率、进料水

分、螺杆速度和配置、模具几何形状、温度和时间^[42]。挤压处理在淀粉提取中主要应用在原料的处理阶段,作用是在一定的进料水分和螺杆转速的条件下,通过螺杆施加的机械能破坏玉米胚乳中蛋白质网状结构,物理剪切作用可以减弱蛋白质分子内的二硫键、淀粉和蛋白质分子间的相互作用力,在后续的加工过程中淀粉更容易与蛋白质分离^[43]。由于挤压过程中涉及高热量、压力和剪切力,导致产物结构、理化和功能特性的变化。Espinosa-Ramírez 等^[44]将多种谷物(燕麦、高粱、苋菜、藜麦、鹰嘴豆、扁豆、黑豆和斑豆)进行挤压处理,发现挤压处理提高了淀粉的表观黏度、水化性能和水溶性指数。因此在淀粉的提取过程中,应该控制挤压温度和螺杆转速,以免其破坏淀粉颗粒完整性。

付昱东^[45]通过对玉米进行挤压预处理,结合湿法工艺提取玉米淀粉,得出最优参数:挤压水分、温度、螺杆转速分别为 45%、40 °C、180 r/min,与传统工艺相比,淀粉提取率提高了 3.79%。此外,分析了两种工艺制得淀粉的结构特性,发现挤压法并没有改变淀粉的颗粒形状、官能团、热稳定性。何东等^[46]在传统湿法的基础上进行挤压预处理,研究了各挤压参数对玉米淀粉提取率和淀粉纯度的影响,得到了最优条件为挤压温度 40 °C、挤压水分 53%、螺杆转速 194 r/min,淀粉提取率相比传统湿法工艺提高了 1.79%,生产时间缩短了 34 h,从电镜图观察到,尽管挤压使淀粉颗粒表面出现微小凹坑及轻微褶皱,但淀粉颗粒整体状态依旧完好。上述研究是在传统工艺上进行的创新,能为玉米淀粉的绿色生产提供参考,但没有涉及到挤压法与其他处理手段的联合使用。Yu 等^[47]研究了常规湿法(conventional wet-milling, CS)、挤压辅助 H₂SO₃ 湿法(extrusion-assisted H₂SO₃ wet-milling, EHS)和挤压辅助 L-半胱氨酸湿法(extrusion-assisted L-cysteine wet-milling, ELS)下玉米淀粉的产量和理化性质和消化率,得到最佳条件为进料速度 30 kg/h、挤压温度 45 °C、挤压水分 50%、螺杆转速 220 r/min, EHS 的产量相较于 CS 和 ELS 分别提高了 1.9% 和 0.37%, EHS 法的提取率与 CS 法和 ELS 法有显著差异($p<0.05$),而 CS 法和 ELS 法的提取率之间没有显著差异($p>0.05$),两种挤压处理使淀粉提取时间分别从 42 h 缩短到 14 h 和 12 h。挤压虽然诱导了淀粉的形貌、表面、晶型、有序结构和热性质的变化,但效果并不显著,且挤压处理提高了淀粉的冻融稳定性和消化率。挤压技术是一种绿色的提取淀粉的方法,具有成本低廉、利用率高、能耗效率高、无毒、无污染等优势,但同时也不能忽略其缺点,挤压是一种高温、高压、高剪切力综合作用的过程,容易造成淀粉颗粒间的氢键断裂以及分子内的糖苷键部分断裂,使其失去原有的结构^[48]。挤压时过大的机械能不仅会导致淀粉出现糊化、降解、产生麦芽糊精等小分子

物质,同时也会降低淀粉双螺旋结构含量,使淀粉短程结晶结构遭到破坏,引发淀粉颗粒内部的双螺旋结构发生断裂,引起淀粉颗粒的降解。挤压时过高的温度致使淀粉分子链的运动性更加活跃,淀粉晶体结构排布变得松散,加速了淀粉微晶体颗粒发生熔融,出现颗粒损坏、有序态消失、分子降解等现象^[49]。

3 展望

本文阐述了在玉米淀粉制备过程中影响产率的因素,包括玉米籽粒的自身性质、加工前的贮藏以及处理条件、加工时不同的处理方法。无论是酶法、超声法、挤压法或其他方法,都不能只注重提取淀粉的优点而忽视其弊端或不可行性,在实际中需要结合原料种类和生产条件选取高效益、高效率的加工手段。未来,科研工作者应立足于开发适合高效淀粉提取的玉米品种、高纯度低成本的酶制剂,探索适合某品种的物理加工工艺条件。将超声波、挤压等物理技术与酶法、发酵法等生物方法结合使用从而替代单一手段的使用,使玉米淀粉生产工艺向着更加绿色高效、节能环保的方向发展。

参考文献:

- [1] MABASSO G A, SIQUEIRA V C, RESENDE O, et al. The effect of intermittent drying with variable resting times on quality parameters of corn obtained after storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182: 114855.
- [2] GWIRTZ J A, GARCIA-CASAL M N. Processing maize flour and corn meal food products[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2014, 1312(1): 66-75.
- [3] ZHANG R Y, MA S, LI L, et al. Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2021, 4(3): 89-107.
- [4] 张海艳, 高荣岐. 不同类型玉米胚乳细胞淀粉体的发育[J]. 植物生理学报, 2013, 49(10): 1105-1111.
ZHANG Haiyan, GAO Rongqi. Amyloplast development of endosperm cell in different types of corn(*Zea mays* L.)[J]. Plant Physiology Journal, 2013, 49(10): 1105-1111.
- [5] YU G W, GAOYANG Y Z, LIU L, et al. The structure, function, and regulation of starch synthesis enzymes SSIII with emphasis on maize[J]. Agronomy, 2022, 12(6): 1359.
- [6] MASSAROLO K C, RODRIGUES P, FERREIRA C F J, et al. Simultaneous distribution of aflatoxins B1 and B2, and fumonisin B1 in corn fractions during dry and wet-milling[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(8): 3192-3200.
- [7] 郭爱良, 田博宇, 张会彦, 等. 玉米淀粉新型浸泡工艺的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 34-36.
GUO Ailiang, TIAN Boyu, ZHANG Huiyan, et al. Research progress of corn starch soaking technology[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(3): 34-36.
- [8] ZOU J, XU M J, TIAN J, et al. Impact of continuous and repeated dry heating treatments on the physicochemical and structural properties of waxy corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 135: 379-385.
- [9] SOMAVAT P, LI Q, DE MEJIA E G, et al. Coproduct yield comparisons of purple, blue and yellow dent corn for various milling processes[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 87: 266-272.
- [10] DA SILVA TIMM N, RAMOS A H, FERREIRA C D, et al. Effects of drying temperature and genotype on morphology and technological, thermal, and pasting properties of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 354-364.
- [11] XU A H, LIN L S, GUO K, et al. Physicochemical properties of starches from vitreous and floury endosperms from the same maize kernels[J]. Food Chemistry, 2019, 291: 149-156.
- [12] HAROS M, TOLABA M P, SUÁREZ C. Influence of corn drying on its quality for the wet-milling process[J]. Journal of Food Engineering, 2003, 60(2): 177-184.
- [13] MALUMBA P, MASSAUX C, DEROANNE C, et al. Influence of drying temperature on functional properties of wet-milled starch granules[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(2): 299-306.
- [14] PARAGINSKI R T, VANIER N L, MOOMAND K, et al. Characteristics of starch isolated from maize as a function of grain storage temperature[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 102: 88-94.
- [15] URIARTE-ACEVES P M, SOPADE P A, RANGEL-PERAZA J G. Evaluation of wet-milling performance of commercial yellow maize hybrids grown in México and relations with grain physicochemical properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019: 1-16.
- [16] 王亚丹. 超声波改进玉米淀粉提取工艺的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
WANG Yadan. Study on improving the conventional corn wet milling by ultrasonic-assisted extraction[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018.
- [17] 闫荣. 玉米淀粉与蛋白质组合结构及分离机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
YAN Rong. Research on the combined structure and separation mechanism of starch and protein in corn[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [18] 孔茂竹, 孔露, 余佳熹, 等. 响应面法优化两步浸泡提取玉米淀粉工艺[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 269-275.
KONG Maozhu, KONG Lu, YU Jiaxi, et al. Optimization of two-step steeping process for corn starch by response surface methodology[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(10): 269-275.
- [19] 李义, 俞峰, 刘国栋, 等. 新型复合酶制剂在玉米淀粉加工中的应用[J]. 当代化工, 2019, 48(8): 1791-1796.
LI Yi, YU Feng, LIU Guodong, et al. Application of new compound enzyme preparation in corn starch processing[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(8): 1791-1796.
- [20] EDNA R, DAVID J, ANDREW M, et al. Enzymatic corn wet milling: Engineering process and cost model[J]. Biotechnology for Biofuels, 2009, 2(1): 1-9.
- [21] SINGH V, JOHNSTON D B, NEOH S L. ORIGINAL RESEARCH: Enzymatic corn wet milling process: Enzyme optimization & commercial trial[J]. Industrial Biotechnology, 2010, 6(1): 34-40.
- [22] LIU J, YUAN T T, WANG R J, et al. The properties and tortilla making of corn flour from enzymatic wet-milling[J]. Molecules, 2019, 24(11): 2137.
- [23] SOMAVAT P, LIU W, SINGH V. Wet milling characteristics of corn mutants using modified processes and improving starch yields from high amylose corn[J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 126: 104-112.
- [24] OZTURK O K, KAASGAARD S G, PALMÉN L G, et al. Protein matrix retains most starch granules within corn fiber from corn wet-milling process[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 165: 113429.
- [25] OZTURK O K, KAASGAARD S G, PALMÉN L G, et al. Enzyme

- treatments on corn fiber from wet-milling process for increased starch and protein extraction[J]. *Industrial Crops and Products*, 2021, 168: 113622.
- [26] CARMONA-GARCÍA R, BELLO-PÉREZ L A, AGUIRRE-CRUZ A, et al. Effect of ultrasonic treatment on the morphological, physicochemical, functional, and rheological properties of starches with different granule size[J]. *Starch-Stärke*, 2016, 68(9-10): 972-979.
- [27] BONTO A P, TIOZON R N, SREENIVASULU N, et al. Impact of ultrasonic treatment on rice starch and grain functional properties: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 71: 105383.
- [28] 陈薪乡. 慈姑抗性淀粉的超声波协同酶法制备技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- CHEN Xinxiang. Study on the preparation technology of arrowhead resistant starch by synergistic effect of ultrasonic and enzyme[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [29] GIMMLER N, LAWN F, MEUSER F. Influence of extrusion cooking conditions on the efficiency of the cationization and carboxymethylation of potato starch granules[J]. *Starch - Stärke*, 1995, 47(7): 268-276.
- [30] KUMAR M, DAHUJA A, TIWARI S, et al. Recent trends in extraction of plant bioactives using green technologies: A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 353: 129431.
- [31] ALARCON-ROJO A D, CARRILLO-LOPEZ L M, REYES-VILL-AGRANA R, et al. Ultrasound and meat quality: A review[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 55: 369-382.
- [32] TIWARI B K. Ultrasound: A clean, green extraction technology[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2015, 71: 100-109.
- [33] ZHU F. Impact of ultrasound on structure, physicochemical properties, modifications, and applications of starch[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(1): 1-17.
- [34] CAMERON D K, WANG Y J. Application of protease and high-intensity ultrasound in corn starch isolation from degermed corn flour[J]. *Cereal Chemistry*, 2006, 83(5): 505-509.
- [35] BENMOUSSA M, HAMAKER B R. Rapid small-scale starch isolation using a combination of ultrasonic sonication and sucrose density separation[J]. *Starch-Stärke*, 2011, 63(6): 333-339.
- [36] MIANO A C, IBARZ A, AUGUSTO P E D. Ultrasound technology enhances the hydration of corn kernels without affecting their starch properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 197: 34-43.
- [37] LIU J, WANG Y D, FANG G H, et al. Effect of ultrasound-assisted isolation on yield and properties of high-amylose starch from amylo-maize[J]. *Starch - Stärke*, 2019, 71(9/10): 1800292.
- [38] LIU J, YU X S, LIU Y W. Effect of ultrasound on mill starch and protein in ultrasound-assisted laboratory-scale corn wet-milling[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 100: 103264.
- [39] ZUO Y Y J, HÉBRAUD P, HEMAR Y, et al. Quantification of high-power ultrasound induced damage on potato starch granules using light microscopy[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19(3): 421-426.
- [40] KARAMAN M, TUNCEL N B, YILMAZ TUNCEL N. The effect of ultrasound - assisted extraction on yield and properties of some pulse starches[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(9/10): 1600307.
- [41] LI M, HASJIM J, XIE F W, et al. Shear degradation of molecular, crystalline, and granular structures of starch during extrusion[J]. *Starch - Stärke*, 2014, 66(7-8): 595-605.
- [42] SINGH S, GAMLATH S, WAKELING L. Nutritional aspects of food extrusion: A review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2007, 42(8): 916-929.
- [43] VON BORRIES-MEDRANO E, JAIME-FONSECA M R, AGUILAR-MÉNDEZ M A, et al. Addition of galactomannans and citric acid in corn starch processed by extrusion: Retrogradation and resistant starch studies[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 83: 485-496.
- [44] ESPINOSA-RAMÍREZ J, RODRÍGUEZ A, DE LA ROSA-MILLÁN J, et al. Shear-induced enhancement of technofunctional properties of whole grain flours through extrusion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 111: 106400.
- [45] 付昱东. 玉米淀粉的挤压制备及理化性质研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- FU Yudong. Study on extrusion preparation and physicochemical properties of corn starch[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.
- [46] 何东, 付昱东, 段庆松, 等. 玉米淀粉制备中挤压联用亚硫酸浸泡预处理工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 196-203.
- HE Dong, FU Yudong, DUAN Qingsong, et al. Pretreatment of corn starch by extrusion combined with soaking in sulfite acid[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 196-203.
- [47] YU X S, QI N, HE D, et al. Effects of extrusion-assisted wet-milling isolation on physicochemical properties of corn starch[J]. *Starch - Stärke*, 2022, 74(5/6): 2100249.
- [48] LI B, ZHANG Y T, XU F, et al. Supramolecular structure of *Arto-carpus heterophyllus* Lam seed starch prepared by improved extrusion cooking technology and its relationship with *in vitro* digestibility[J]. *Food Chemistry*, 2021, 336: 127716.
- [49] ROMAN L, GOMEZ M, HAMAKER B R, et al. Shear scission through extrusion diminishes inter-molecular interactions of starch molecules during storage[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 238: 134-140.

责任编辑:王艳
收稿日期:2023-07-24