

唐杰, 李明娟, 张雅媛, 等. 食用木薯的加工现状及发展前景 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 469–476. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010395

TANG Jie, LI Mingjuan, ZHANG Yayuan, et al. Processing Utilization and Development Prospect of Edible Cassava[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 469–476. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010395

· 专题综述 ·

食用木薯的加工现状及发展前景

唐 杰^{1,2}, 李明娟^{1,2,*}, 张雅媛^{1,2,*}, 洪 雁³, 张彦军^{4,*}, 王 颖^{1,2}, 游向荣^{1,2}, 周 葵^{1,2}, 卫 萍^{1,2}

(1. 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所, 广西南宁 530007;

2. 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西南宁 530007;

3. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

4. 中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533)

摘 要: 木薯是一种极耐贫瘠、抗逆性强、富含淀粉的作物。在我国, 木薯长期以来主要作为一种非粮能源作物, 用于生产淀粉、酒精以及饲料等。近几年, 食用木薯品种的选育、推广以及深加工技术的研究开发, 极大地拓展了木薯在食品行业中的发展空间。本文首先介绍了我国主要食用木薯品种及其营养价值, 然后从鲜薯、食用木薯全粉、淀粉和变性淀粉 3 个方面综述了食用木薯在食品加工领域中的研究应用现状。在此基础上, 分析了食用木薯产业发展优势及存在的问题, 并从品种选育、贮藏保鲜技术、加工技术及产品开发等方面对推动食用木薯在食品工业中的发展前景进行了展望, 以期为我国食用木薯未来产业化发展提供借鉴。

关键词: 食用木薯, 加工利用, 现状, 发展前景

中图分类号: TS215

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)02-0469-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022010395

本文网刊:



Processing Utilization and Development Prospect of Edible Cassava

TANG Jie^{1,2}, LI Mingjuan^{1,2,*}, ZHANG Yayuan^{1,2,*}, HONG Yan³, ZHANG Yanjun^{4,*}, WANG Ying^{1,2},
YOU Xiangrong^{1,2}, ZHOU Kui^{1,2}, WEI Ping^{1,2}

(1. Agro-food Science and Technology Research Institute, Guangxi Academy of
Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-processing Technology, Nanning 530007, China;

3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

4. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning 571533, China)

Abstract: Cassava is a kind of crop with extreme barren tolerance, strong stress resistance and rich starch. In our country, cassava has long been used as a non-food energy crop to produce starch, alcohol and feed. In recent years, the development of breeding, popularization and deep-processing technology of the edible cassava have greatly expanded the development space of cassava in the food industry. Firstly, the varieties and nutritional value of the edible cassava are introduced in this article, and then the present research and application situation of the edible cassava in food industry field are summarized, from three aspects: Fresh edible cassava, edible cassava whole flour and starch, and modified starch. On this basis, the developmental advantage and the problems of the edible cassava are analyzed, the development prospect of the edible cassava in food industry are forecasted, such as variety breeding, storage and preservation technologies, processing technologies and product development, in order to offer some references for our country's edible cassava industrial in the future.

收稿日期: 2022-03-17 +并列第一作者

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2019GXNSFBA245029); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB21196067); 国家自然科学基金项目 (31960456, 32060517); 国家重点研发计划项目子课题 (2020YFD1001204); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2021JM105, 桂农科 2021YT115, 桂农科 2021YT114)。

作者简介: 唐杰 (1978-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 农产品加工与综合利用; E-mail: 826729164@qq.com。

李明娟 (1986-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与综合利用; E-mail: limingjuan230@163.com。

* **通信作者:** 张雅媛 (1981-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 淀粉资源的开发与利用; E-mail: yayuanzhang325@hotmail.com。

张彦军 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 热带作物加工; E-mail: zhangyanjun0505@163.com。

Key words: edible cassava; processing and utilization; current situation; development prospect

木薯(*Manihot esculenta* Crantz)又名树薯、木番薯,是世界三大薯类(甘薯、马铃薯、木薯)和六大粮食作物(小麦、水稻、玉米、马铃薯、大麦、木薯)之一,属大戟科(Euphorbiaceae)、木薯属(*Manihot*)植物。木薯起源于亚马孙河流域南部地区,现广泛种植于非洲、美洲和亚洲 100 多个国家的热带和亚热带地区,因其块根中含有丰富于淀粉,被誉为“淀粉之王”^[1]。为缓解粮食危机,木薯于 1820 年从南洋(马来西亚)传入我国,目前主要分布在广西、广东、海南、云南、福建、贵州、湖南和江西等省^[2]。2019 年,我国木薯收获面积为 29.92 万公顷,居世界第 16 位;总产量 498 万吨,居世界第 15 位^[3]。木薯依据块根中氰含量的多少,可划分为低氰品种和高氰品种,低氰品种一般指鲜薯块根中氢氰酸含量小于 100 mg/kg(鲜重),高氰品种则指鲜块根中氢氰酸含量大于 100 mg/kg^[4]。依据 Bolhuis^[5]划分标准,木薯块根中氢氰酸含量小于 50 mg/kg(鲜重)的品种界定为可食用无害品种,高于 50 mg/kg 的被界定为不可食用有毒品种,这也是目前广为接受的食用木薯品种的界定标准。联合国粮食与农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)1991 年对木薯可食用的推荐值为氢氰酸含量小于 10 mg/kg(干重)。依据感官判定,人们往往习惯用苦味木薯和甜味木薯来划分木薯品种。到目前为止,国际上对食用木薯的界定还没有明确统一的标准,需要进一步确定研究更加科学的划分方法。

长期以来,木薯被我国政府定义为非粮能源作物,主要用于生产淀粉、变性淀粉、酒精、饲料等,较少食用。然而,在困难时期,食用型木薯曾是高效救灾食物,是解决热区农民温饱的主粮,曾拯救了广东、广西等省区许多人的生命,可作为粮食的有效补

充。在许多国家,食用木薯是除水稻和玉米以外的第三大食物来源,是世界热带地区 8 亿多人的基本主食。在世界最大的木薯生产国尼日利亚,90% 以上的木薯用于充当粮食^[6]。此外,木薯还是碳水化合物、维生素和矿物质元素的重要来源,可作为食品级和化工业原料应用于食品、医药、纺织、饲料、生物质能源等多种行业。随着我国木薯产业和食品行业的快速发展,对木薯淀粉和干片的需求量日益增大,但国内木薯产量无法满足市场需求,我国木薯需求进口依存度较高。2020 年,我国木薯淀粉和干片进口量分别为 276 万吨和 330 万吨,同比分别增长 16.05% 和 20.63%^[3]。近年来,随着我国优良食用木薯品种的选育和推广,有关食用木薯的加工利用受到越来越多研究人员的关注,并不断开发出了丰富多样的木薯食品。本文就食用木薯的品种、加工利用现状及产业发展前景等方面进行综述分析,同时对加快食用木薯产业发展提出建议,以期为食用木薯加工、应用提供参考。

1 食用木薯主要品种

我国目前推广的可食用木薯品种主要有华南 6068 号、华南 101(面包木薯)、华南 102(糯米木薯)、华南 124、华南 9 号、华南 12 号、GR891、南植 199 等,品种主要性状简介见表 1。由表 1 可知,我国食用木薯品种主要由中国热带农业科学院、广西亚热带作物研究所、中国科学院华南植物研究所等单位选育,亩产在 1.0~3.0 t 之间,薯肉松粉细嫩,块根干物质含量为 35%~48%,鲜薯淀粉含量高于 30%,氢氰酸含量均小于 50 mg/kg。

2 木薯中营养成分研究现状

2.1 木薯中蛋白质、淀粉、粗纤维的研究

木薯是一种含有高水平碳水化合物的能量密集

表 1 我国主要可食用木薯品种介绍
Table 1 The introduction of edible cassava varieties in China

序号	品种	选育单位	性状简介
1	华南6068	中国热带农业科学院	早熟品种,产量中等,抗风能力较差,一般亩产1.0~1.5 t;薯外皮呈褐色,内皮白色带紫红色,薯肉雪白松软;块根干物质含量40%~45%,鲜薯淀粉含量30%~35%,氢氰酸含量4~5 mg/100 g ^[7] 。
2	华南101 (面包木薯)	中国热带农业科学院	早中熟品种,我国栽培最早的食用品种,产量较低,一般亩产1.0 t左右;薯外皮深褐色,内皮紫红色,食味好,松软可口,块根干物质含量40%~45%,氢氰酸含量5 mg/100 g以下 ^[8] 。
3	华南102 (糯米木薯)	中国热带农业科学院	早熟,平均亩产1.0 t左右;外皮褐色,粗糙,内皮浅红色;清香可口,鲜薯干物质含量约40%,氢氰酸含量4~5 mg/100 g ^[8-9] 。
4	华南124	中国热带农业科学院	中迟熟品种,抗风能力稍差,一般亩产2.0~3.0 t,薯皮薄,呈浅黄色,内皮和肉质为白色,肉质细嫩,块根干物质含量35%~40%,氢氰酸含量4~5 mg/100 g ^[8,10] 。
5	华南9号	中国热带农业科学院	中早熟品种,高产,亩产2.0~2.5 t;耐寒耐旱、抗病抗逆性强,富含胡萝卜素;薯外皮褐色,内皮乳黄色,薯肉淡黄色,煮熟后黄色,清香、松粉,被誉为“蛋黄木薯”;块根干物质含量40%左右,氢氰酸含量3~4 mg/100 g ^[8,11] 。
6	华南12号	中国热带农业科学院	高产,平均亩产2.6 t;薯外皮褐色,内皮和薯肉均呈现白色,薯肉细嫩松粉,食味佳;鲜薯干物质含量40%左右 ^[12] 。
7	GR891	广西亚热带作物研究所	早熟品种,平均亩产1.5 t;薯外皮浅黄色,内皮和薯肉均为白色;淀粉含量30%~33%,氢氰酸含量4.4 mg/100 g ^[13] 。
8	南植199	中国科学院华南植物研究所	中迟熟品种,亩产1.5~3.0 t;薯肉雪白松粉,块根干物质含量40%~48%,淀粉含量33%~37%,氢氰酸含量5 mg/100 g以下 ^[8,14] 。

型食物,鲜薯中碳水化合物含量可达 32%~35%,其中 80% 的碳水化合物为淀粉,木薯去皮块根中的淀粉含量为甘薯的 1.0~2.3 倍、马铃薯的 1.0~1.5 倍^[15]。木薯块根中的抗性淀粉含量为 40.91%(干重),粗纤维含量与木薯的品种和年份有关,一般不超过 1.5%(鲜重),还含有 1.7% 的蔗糖及少量葡萄糖和果糖^[6,16];脂肪含量低,含量在 0.1%~0.3% 之间,略高于马铃薯,主要脂肪酸为棕榈酸和油酸^[17];蛋白质的含量在 0.4%~1.5% 之间,木薯蛋白的质量较低,块根中虽然富含精氨酸、天冬氨酸和谷氨酸,但缺乏部分必需氨基酸,如蛋氨酸、色氨酸、赖氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸^[18],其较低的蛋白质水平制约了木薯在食品加工工业中的应用。目前,国内外许多研究者在提高木薯蛋白质水平上做了大量的研究工作,采用的途径主要有三种:一是引入外源蛋白质基因来提高木薯蛋白质水平^[19];二是通过杂交育种手段,采用种间杂交育种途径得到木薯,其脱皮块根中蛋白质含量可达 8.06%,赖氨酸含量可提高 10 倍^[20];除了以上两种途径,采后加工也是提高木薯蛋白水平的一个重要手段,采用固态发酵技术除可提高木薯产品中蛋白含量以外,还可去除木薯中 95% 的氢氰酸^[21]。

2.2 木薯中矿物质、维生素的研究

木薯中含有丰富的矿物质元素,其钙、铁、锌、钾、镁、锰含量可与除大豆以外的许多豆类媲美,其中,钙含量为 19~176 mg/100 g,钾含量为 271 mg/100 g,显著高于其它谷物及根茎类作物^[16],钾是细胞和体液的重要组成部分,有助于调节心律、降低血压、控制炎症和水肿等。此外,木薯块根中还含有丰富的维生素 C,含量为 15~45 mg/100 g,是马铃薯的 2.1~14.3 倍^[15]。木薯块根中脂溶性维生素的含量较低,缺乏维生素 A、B₁、B₂ 和 B₃ 等^[16],但含有胡萝卜素和类胡萝卜素,鲜块根中胡萝卜素含量为 0.454~1.069 mg/100 g。研究表明,胡萝卜素的含量与块根的颜色呈正相关性,以巴西红肉品种木薯含量最高,其次为黄色薯肉品种,最低为白色品种^[22]。胡萝卜素进入人体后可转化为维生素 A,是目前最安全的维生素 A 补充来源。因此,通过品种筛选、选育以及杂交育种的手段选育高胡萝卜素木薯品种对以木薯为主食地区居民维生素 A 的补充具有重要意义。

木薯的营养成分受年份、品种、产地、收获时间等多种因素的影响,研究表明木薯在冬收时的干物质、淀粉以及维生素 C、钙、钾、锌、铜含量均高于春收,而粗蛋白、可溶性糖、粗纤维以及镁、铁的含量均低于春收。薯肉中的维生素 C、 β -胡萝卜素、可溶性糖、钾和镁的含量显著高于薯皮,而铁、锌和铜的含量则显著低于薯皮^[23]。此外,木薯块根全薯、薯肉、薯皮的干物质、粗蛋白以及粗纤维含量存在着自上而下逐段降低的分布规律,即头段>中段>尾段,这可能与块根中相关酶活性、运输蛋白基因表达、跨膜运输能力等因素有关^[24]。

2.3 木薯中氰化物、抗营养物质等不利成分的研究

木薯中含有氰化物是限制其在食品中发展应用的重要因素。木薯产生两种氰苷,分别是亚麻苦苷(Linamarin)和百脉根苷(Lotaustralin),两者比例约为 10:1^[25]。氰化物在木薯块根中的分布规律研究表明,木薯中的氢氰酸主要分布在薯皮中,薯皮中的氢氰酸含量为薯肉中的 2~3 倍,靠近薯内皮的 2~3 mm 范围氰化物的含量较高。木薯主产区主要通过去皮、浸泡、日晒、发酵、高温加热等处理除去木薯中的氰化物,可达到食用安全性。此外,块根中氰化物的含量自近端向远端逐渐降低,靠近薯柄的近端会含有更多的氰化物^[4]。食用低氰品种的木薯不会引起人体的急性中毒,但有研究表明从木薯中长期摄入微量的氰化物会加重缺碘人群的甲状腺肿大和克汀病。因此,在以木薯为主食的缺碘地区,当加工方法未能有效降低木薯中氰化物的含量时,木薯对人体具有潜在的致甲状腺肿的风险^[16]。此外,木薯块根中还含有少量植酸和草酸等抗营养物质,这些物质能与镁、钙、铁、锌等阳离子结合,从而影响人体对矿物质的吸收与利用^[26],但这取决于摄入的量。

3 食用木薯在食品中的加工利用

3.1 鲜薯的加工食用

在非洲、南美洲等许多以木薯为主食地区,木薯多以鲜薯形式消费,将木薯去皮切块后直接蒸或煮,配以香料和盐,或捣碎与其它蔬菜一起食用,是日常中不可缺少的主食。因各地饮食习惯和文化的不同,鲜木薯的食用方法有很多种。在西非,特别是加纳,人们将木薯去皮后蒸煮,捣碎成粘的面团,与鱼或蔬菜做成的汤一起食用^[27]。在巴西,鲜木薯通常被用来制作成木薯糖水或与蔬菜一起做成汤^[28]。在印度尼西亚,人们喜欢将鲜木薯捣碎后与椰子和香蕉做成布丁,或将鲜木薯切片后用油炸成薯片。发酵是一种传统的木薯加工方法,“fufu”和“Gari”是木薯主产区两种非常有名的木薯发酵食品。人们将木薯去皮后浸泡在水中发酵,块根经发酵软化后装入布袋中脱水、蒸煮、捣碎,称之为“fufu”,“fufu”口感细腻,具有发酵的酸香味,经进一步干燥后可制成“fufu”粉^[29]。“Gari”的加工是将木薯去皮捣碎后放入布袋,经发酵 3~10 d 后晒干,筛除较粗的纤维,然后用锅加热烤干而制成^[30],当地人喜欢在加热过程中添加棕榈油,以进一步提高“Gari”的蛋白含量,降低氢氰酸。“Gari”的保质期较长,是西非国家最重要的主食之一。

我国木薯受种植区域的限制,主要为两广、海南等地区的人们所熟识。张雅媛等^[31]以食用木薯为主料研发了数种具有中国特色的木薯烹饪食品,并出版了《美味木薯》一书,赋予了木薯更多的现代食用方法。鲜木薯食用品质的高低主要受其块根中淀粉与糖含量及其分布的影响,食味好的木薯具有淀粉含量高、糖含量低的特点,同时,淀粉在木薯块根的外部、中部和芯部分布越均匀,木薯越“松粉”,食用品质越

高,反之,淀粉分布不均匀,尤其是芯部淀粉含量较低的品种,食味品质越差^[4]。魏艳^[32]对31份供试木薯品种围绕香度、甜度、苦度、粉度、黏度和纤维感6项指标进行了食味评价。结果表明,由中国热带农业科学院选育的华南9号食用木薯的食味品质综合得分最高。

鲜木薯极不耐贮藏,通常采后2~3 d内就会发生变质,木质素合成速率不断降低,次生代谢产物升高,调节活性氧的过氧化氢酶和过氧化物酶活性升高,在块根周边部位表现出褐变,出现蓝色条纹筋状,称为木薯特有的“采后生理性变质”(Post-harvest physiological deterioration, PPD)^[33]。木薯的采后生理性变质会导致木薯褐化及腐烂,进而影响木薯的食用和加工品质。木薯的采后贮藏保鲜技术主要有低温贮藏、沙藏、涂膜保鲜和留地贮藏保鲜等,其中,留地贮藏保鲜是非洲地区民间常用的一种木薯保鲜方法,通过适当延长木薯生长期,延期收获的方法,不仅可有效保存木薯,还可提高鲜薯的产量,对延长木薯加工时间和保证企业全年加工具有重要意义。木薯的不耐贮性对其市场消费是极不利的。因此,食用木薯除少部分用于鲜食外,应以走初、深加工发展路线为主。

3.2 食用木薯全粉的加工及应用

3.2.1 食用木薯全粉加工技术研究 在非洲、南美洲等以木薯为主食地区,人们将收获的木薯去皮、洗净、切片、晒干,磨成细粉后密封保存,食用时添加少量水和糖揉成面团,煮熟,代替米饭作为主食食用。木薯全粉具有应用范围广、耐贮藏等特点,是木薯加工产品非常重要的基础原料,可部分或全部替代面粉用于制作面包、饼干、糕点等焙烤食品,以及作为添加剂添加到各类食品中,木薯全粉的加工对木薯在食品中的推广和应用具有重要的意义。国外木薯全粉的大批量工业化生产主要有切片干燥和锉磨粉碎干燥两种工艺。切片干燥生产木薯全粉是将木薯经滚筒式清洗机去皮清洗后,切分成片状,干燥后采用锤式粉碎机粉碎,经粗筛后通过旋风分离器进一步精制^[34]。切片干燥加工过程的设备简单,流程较短。锉磨粉碎干燥加工步骤主要包括木薯的去皮清洗、锉磨粉碎、螺旋压榨机脱水,脱水后的木薯饼块经粗粉碎后干燥至水分含量12%以下,进一步粉碎、筛分、包装,该工艺生产周期较短,通常24 h内即可完成,生产的木薯全粉品质较高^[35]。在木薯全粉的加工过程中,不同品种和工艺生产的全粉品质特性存在较大差异。Sakyidawson等^[36]对比了切片干燥和锉磨粉碎干燥两种工艺对木薯全粉理化和加工特性的影响。结果表明,锉磨粉碎干燥生产的木薯全粉氰化物含量低,糊化黏度高,更适宜作为烘烤原料应用。蒋小静^[37]参照马铃薯全粉生产工艺制备木薯全粉。结果表明,该工艺制备的木薯全粉具有更低的黏度和更高的吸水性,消化率较高。除此以外,不同的干燥方式对木薯全粉营养成分和品质也有较大的影响。

Onyenwoke等^[38]研究了不同干燥方式及工艺对食用木薯中类胡萝卜素保留率的影响。结果表明,盘式干燥法制备的木薯全粉类胡萝卜素保留率最高为80%,最低为自然晒干法,仅为20%。同时,采用高温短时的干燥方法比低温长时间的干燥方法更有利于木薯中类胡萝卜素的保留。

3.2.2 食用木薯全粉饼干产品的加工与应用 国内外针对木薯全粉开发的研究,主要集中在替代小麦粉应用于饼干、面包、蛋糕等焙烤产品。相比于小麦粉,木薯全粉的吸水性高,缺乏小麦面团独特的黏弹性,导致木薯面团的可塑性和延伸性降低,加工性能下降^[39]。Gyedu-Akoto等^[40]研究了添加不同比例木薯全粉代替小麦面粉制作可可饼干。结果表明,随着木薯全粉添加量的增加,饼干的硬度升高,感官品质有所降低,添加20%木薯全粉的饼干综合品质较好,而采用100%木薯全粉则难以形成面团制作饼干。由于木薯全粉中蛋白含量和脂肪较低,木薯全粉替代量的增加将导致饼干中蛋白质和脂肪含量降低。Oluwamukomi等^[41]研究表明添加40%木薯全粉的饼干蛋白含量会由原来的13.04%降至8.4%。因此,很多研究都采用了与高蛋白豆类复配的方法来提高木薯产品蛋白和脂肪含量,改善品质。Akubor^[42]等采用木薯全粉与大豆粉复配制作无麸质饼干。感官评价结果表明,木薯全粉添加量在50%及以下的饼干均具有较好的品质。Olapade等^[43]采用添加豇豆粉来提高木薯饼干的蛋白含量,改善饼干品质。

3.2.3 食用木薯全粉面包产品的加工与应用 在面包加工方面,许多研究表明:当木薯全粉的替代比例在5%~10%之间时,不会对面包的品质产生显著的影响;当替代比例超过10%时,增加木薯全粉的比例会引起面包比容降低,硬度和咀嚼性增加,弹性下降,影响感官品质^[44-45]。不同品种和加工工艺制备的木薯全粉对面包的品质具有显著的影响^[34,46]。Jensen等^[47]比较了5种不同类型木薯全粉对面包感官和质构品质的影响。结果表明,采用FdM木薯全粉制作面包,替代比例在30%及以下时对面包的感官品质没有产生显著的影响。在面包加工过程中添加乳化剂、酶制剂、亲水性胶体和蛋白等改良剂,可进一步改进木薯面包的营养和感官品质,提高木薯全粉的添加比例。Eriksson等^[48]通过添加3%的果胶制备出了木薯全粉比例为40%的面包。Shittu等^[49]考察了黄原胶对木薯/小麦面团及面包品质的影响。结果表明,添加1%黄原胶即可显著改善复合面团的韧性和延展性,提高面包的比容和弹性,同时还可延缓面包在贮藏过程中的老化。Pasqualone等^[50]以蛋白和橄榄油制备出了100%木薯全粉的无麸质面包。

3.2.4 食用木薯全粉蛋糕产品的加工与应用 与制作饼干、面包的面团相比,蛋糕面糊不需要形成很强的面筋网络结构,木薯全粉的替代比例可达到100%。Bakare等^[51]研究了不同木薯全粉替代比例

(30%~100%)对蛋糕品质的影响。结果表明,在 40% 置换水平内,可得到与小麦品质相当的蛋糕,60% 置换水平内蛋糕是可接受的。木薯全粉替代比例的增加会引起蛋糕硬度和回缩率升高,比容降低,吸水性增强^[52]。在木薯蛋糕加工中,添加大豆粉不仅可增加产品的蛋白含量,还可改善蛋糕的品质。Ugwuona 等^[53]将木薯全粉/大豆粉/小麦粉以 30:20:50 的比例混合在一起制作蛋糕,最终的蛋糕无论是在色泽、香气还是柔软的质地上都与 100% 小麦粉蛋糕相当。此外,木薯全粉在面条^[54]、馒头^[55]、艾糍粑^[56]等方面也有应用。

3.3 食用木薯淀粉及变性淀粉的加工及应用

木薯淀粉提取工艺简单,价格较低,且具有黏度高、成膜性好、透明度高、抗老化性好等特性,在食品中的应用具有独特优势,几乎可以用于木薯全粉所能应用的全部食品中。此外,还可用于生产食用酒精、淀粉糖、糖醇、变性淀粉和各种用途的淀粉衍生物,应用于食品、保健品、医药、化工等领域^[57]。王家胜等^[58]研究发现,添加 10% 木薯淀粉制作的发酵挂面蒸煮损失率和最佳蒸煮时间分别下降 31.18% 和 18.73%,感官评分及质地(硬度、咀嚼性和回复性)明显提升。然而,木薯淀粉存在溶解性、稳定性和可塑性较差,淀粉糊耐高温、剪切、酸碱性能较差等缺点^[59],使其直接应用于食品、工业产品存在一定的局限性。因此,根据木薯淀粉结构和理化性质,须开发具有新功能或改进原有功能的变性淀粉,以适应现代化工业新技术、新工艺要求,从而拓宽木薯淀粉应用范围成为必然。

木薯变性淀粉是指采用物理、化学、生物等改性技术,通过酯化、羟丙基化、氧化和交联等改性方式,在原淀粉分子上引入新的官能团或改变分子大小,使其性质发生改变而被赋予更多的应用特性,并符合相关食用变性淀粉标准的二次加工产物。目前,我国木薯变性淀粉产量已占变性淀粉总产量的 40%,与原淀粉相比,其透明度、保水性、稳定性、糊化性、成膜性、黏度以及耐高温、酸碱、剪切能力均得到明显提升,已作为增稠剂、稳定剂、乳化剂、胶凝剂、保水剂、粘结剂等食品添加剂被广泛应用于肉制品、面制品、调味品、休闲食品、烘焙食品、冲剂、酸奶、饮料、果酱等食品加工行业中^[60]。已有研究发现,木薯变性淀粉可作为稳定剂生产发酵乳饮料,起到改善产品食用品质特性的作用^[61];用于低脂蛋黄酱中,既可保持产品的稠度和质地,还有助于产品稳定效果,能延长食品的保质期^[62]。此外,还有木薯变性淀粉用于火腿^[63]、鱼糜^[64]、鲜湿面条^[65]、芋圆^[66]等加工产品中,使产品具有令人满意的感官品质,且贮藏过程中不易老化、冷藏稳定性好。随着现代食品生产工业化、自动化的不断发展和完善,对淀粉基添加剂的性能要求越来越高,木薯变性淀粉作为质优价廉的食品添加剂,具有广阔的市场发展前景。

4 食用木薯产业发展前景分析

4.1 食用木薯产业发展优势

4.1.1 食用木薯种植优势明显 木薯具有优越的生物学种植优势,首先,木薯光合作用效率高,在同等条件下,单位面积食物能量超过水稻、小麦、玉米和高粱等作物^[67];木薯的生长适应性很强,耐旱、耐贫瘠,具有很强的土壤水分和养分利用率,能在其他作物难以生长的贫瘠土壤上生长。同时,木薯可以间作套种,不与粮食作物争地。与其它作物相比,木薯的种植投入少,抗病虫害,易管理,一般不需农药,易达到绿色食品生产标准。因此,随着耕地不断减少、水资源日益短缺、气候环境异常及城镇化发展加快等问题,利用食用木薯等非传统粮食作物资源,能分化对粮食的消费需求,可在一定程度上改变粮食供求形势,对解决粮食安全问题是不错的选择。

4.1.2 食用木薯食用价值较高 食用木薯清甜可口,细嫩松粉,具有特别的风味,富含淀粉、纤维素、维生素及钙、磷、钾、锌、铁、镁等矿物质,且含量毫不逊于人们日常食用的粮食^[15]。木薯低脂、低糖、低盐、饱腹感强,利于抑制体重增长,预防肥胖,有助于改善肠胃微环境、清理肠道、预防消化系统疾病,具有调节心律、降低心血管通透性、控制炎症和水肿、维持酸碱平衡等功效^[6,27],具有一定的保健功能。

4.1.3 食用木薯加工能力较强 从加工方面考虑,食用木薯的加工能力很强,从鲜薯到全粉再到淀粉,都是非常好的食品加工原辅料。鲜薯可加工成主食、菜肴或休闲食物直接食用。木薯全粉几乎可保留鲜薯所含的各种营养成分,口感可接近鲜薯原有的风味^[68],且加工性能好,可部分或全部替代小麦粉制成蛋糕、面包、饼干、馒头、面条等产品。同时,木薯全粉不含麸质,可用于无麸质食品的加工,为麸质过敏人群提供优质食用原料,扩大消费群体。木薯淀粉有原淀粉和各种变性淀粉两大类,可作为食品加工制品的增量剂、增稠剂、乳化稳定剂、胶黏剂、膨化剂和甜味剂等广泛应用于食品配方中,可控制和改进食品的感官(色泽、风味、口感及形态)、内部结构、流变性、稳定性,延长产品货架期,提高产品质量,还可满足某些特殊功能性质食品的加工要求。此外,木薯变性淀粉可广泛用于造纸、纺织、医药、化妆品和包装材料等制品中,具有广阔的市场发展前景和空间,对提高木薯经济效益具有积极意义。

4.2 食用木薯产业发展存在的问题

目前,限制食用木薯产业发展的原因主要有以下几个方面:第一,鲜木薯不耐贮藏运输,木薯采后极易发生生理性变质,常温下放置 2~3 d 开始变色、变味,出现腐烂迹象,严重制约了食用木薯的加工利用;第二,目前,食用木薯还未形成规模化种植,多以农户分散种植、小农经营处理方式为主,种植面积小,无法应对大规模的加工生产需求;第三,食用木薯加工

技术相对滞后,与其它薯类作物相比较,我国食用木薯加工技术的研究及配套设备的研发相对落后,对于木薯全粉加工利用的研究还不够深入,市场上几乎没有食用木薯的深加工产品;第四,人们对木薯加工产业的认知不足,消费者长久以来存在一个误区,认为木薯中含有氢氰酸,食用后会中毒,从而对食用木薯及其产品产生质疑,而加工种植者普遍认为木薯是低效、低值作物,附加值较低,种植积极性不高。

5 结论与展望

食用木薯具有较强的生态适应性和加工性能,在我国热区发展食用木薯的种植和加工有着良好的市场前景。我国木薯产区多分布于土壤贫瘠的贫困地区,木薯种植的经济效益较低,食用木薯初、深加工产品的发展,对提高木薯经济效益、增加贫困地区农民收入、丰富消费需求、保障粮食安全均有积极的意义。在将来的研究中,应进一步加强食用木薯品种选育,广泛收集和利用食用木薯种质资源材料,通过远缘杂交育种、分子育种和环境胁迫育种等手段选育出高淀粉、高蛋白、高 β -胡萝卜素、低氰等优良品种;同时加快配套完善的栽培技术标准和规范,积极引导优良品种的培育、示范和推广。

加强食用木薯采后贮藏保鲜技术研究,从生理学、病理学、化学与生物化学、酶代谢、淀粉代谢及蛋白质组学等方面研究木薯特有的采后生理性变质机理,探索行之有效的鲜薯贮藏保鲜方法。在食用木薯加工技术研究与产品开发方面,应重点加强对食用木薯全粉生产工艺和设备的研究开发,以现代营养学原理和居民科学膳食为导向,研究营养性、健康性和多元化的特色木薯全粉加工新产品;结合利用现代食品加工技术,改装或开发适合木薯自身特色的收获、存储、去皮、脱氰、皮渣及废水处理等相关设备,开发适合不同规模木薯加工企业使用的现代化、机械化、自动化设备,降低加工成本,提高经济效益;此外,通过制备木薯抗性淀粉或对木薯全粉的营养强化,进一步研发食用木薯功能产品,拓展木薯的应用领域和消费群体,延长木薯加工产业链,以此来带动食用木薯种植业的发展,提高木薯产业经济效益。

参考文献

- [1] 曹升,尚小红,陈会鲜,等.广西地方面包木薯种质资源调查及表型性状分析和品质评价[J].西南农业学报,2021,34(11):2318-2325. [CAO S, SHANG X H, CHEN H X, et al. Investigation and collection of local bread-cassava germplasm resources in Guangxi and their phenotypic trait analysis and quality evaluation [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(11): 2318-2325.]
- [2] 孙倩.巴西木薯种质资源农艺性状的 GWAS 分析[D].南宁:广西大学,2020. [SUN Q. GWAS analysis of agronomic traits of cassava germplasm in Brazil[D]. Nanning: Guangxi University, 2020.]
- [3] 羊兴爱,李开绵,陈松笔.30份木薯种质资源农艺性状和品质特性的表型综合评价[J].分子植物育种,2022,20(18):6136-

6144. [YANG X A, LI K M, CHEN S B. Phenotypic comprehensive evaluation of agronomic and quality characteristics of 30 cassava germplasm resources[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, 20(18): 6136-6144.]
- [4] KOLAWOLE O F, JOHN A. Utilization of cassava for food [J]. *Food Reviews International*, 2011, 27(1): 51-83.
- [5] BOLHUIS G G. The toxicity of cassava roots[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1954, 2(3): 176-185.
- [6] MONTAGNAC J A, DAVIS C R, TANUMIHARDJO S A. Nutritional value of cassava for use as a staple food and recent advances for improvement[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2009, 8(3): 181-194.
- [7] 王书媛.木薯优良品种 6068 简介[J].农业科技通讯,1979(8):13. [WANG S Y. Introduction of cassava good cultivar 6068 [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 1979(8): 13.]
- [8] 张振文,李开绵.木薯及其加工利用 100 问[M].北京:中国农业出版社,2017:1-122. [ZHANG Z W, LI K M. Cassava and its processing and utilization 100 questions[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017: 1-122.]
- [9] 沈光.食用木薯新品种简介(三)[J].木薯精细化加工,2002(1):48. [SHEN G. Introduction of new edible cassava varieties[J]. *Cassava Fine Processing*, 2002(1): 48.]
- [10] 李开绵.木薯新品种华南 124 的主要特点及其繁殖推广的方法和途径[J].热带农业科学,1991(4):56-61. [LI K M. The main characteristics of new cassava cultivar Huanan 124 and the methods and ways of breeding promotion[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 1991(4): 56-61.]
- [11] 黄洁,单荣芝,李开绵,等.优质鲜食木薯新品种华南 9 号[J].中国热带农业,2006(5):47-48. [HUANG J, SHAN R Z, LI K M, et al. New high quality fresh cassava cultivar SC9[J]. *China Tropical Agriculture*, 2006(5): 47-48.]
- [12] 叶剑秋,黄洁,陈松笔,等.木薯新品种华南 12 号的选育[J].热带作物学报,2014,35(11):2121-2128. [YE J Q, HUANG J, CHEN S B, et al. Breeding of a new cassava cultivar SC12[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2014, 35(11): 2121-2128.]
- [13] 田益农,李军,盘欢.木薯新品种 GR891 的选育[J].广西农业科学,1998(3):124-125. [TIAN Y N, LI J, PAN H. Breeding of a new cassava cultivar GR891[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 1998(3): 124-125.]
- [14] 吴代胜,李韶华.南植 199 木薯栽培技术[J].农友之家,2000(4):16. [WU D S, LI S H. Cassava cultivation technique of SP 199[J]. *The Home of NongYou*, 2000(4): 16.]
- [15] 魏艳,黄洁,许瑞丽,等.木薯肉与木薯皮营养成分的研究初报[J].热带作物学报,2015,36(3):536-540. [WEI Y, HUANG J, XU R L, et al. Primary study of the nutrient contents in the flesh and cortex of cassava root[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(3): 536-540.]
- [16] CHARLES A L, SRIROTH K, HUANG T C. Proximate composition, mineral contents, hydrogen cyanide and phytic acid of 5 cassava genotypes[J]. *Food Chemistry*, 2005, 92(4): 615-620.
- [17] HUDSON J F, OGUNSUA A O. Lipids of cassava tubers (*Manihot esculenta* Crantz)[J]. *Journal of the Science of Food and*

Agriculture, 1974, 25(12): 1503–1508.

[18] MORGAN N K, CHOCT M. Cassava: nutrient composition and nutritive value in poultry diets[J]. *Animal Nutrition*, 2016, 2(4): 253–261.

[19] ZHANG P, JAYNES J M, POTRYKUS I, et al. Transfer and expression of an artificial storage protein (ASP1) gene in cassava (*Manihot esculenta* Crantz)[J]. *Transgenic Research*, 2003, 12(2): 243–250.

[20] NASSAR N M A, SOUSA M V. Amino acid profile in cassava and its interspecific hybrid[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2008, 6(2): 192–197.

[21] IYAYI E A, LOSEL D M. Protein enrichment of cassava by-products through solid-state fermentation by fungi[J]. *Journal of Food Technology in Africa*, 2001, 6(4): 116–118.

[22] NASSAR N M A, VIZZOTTO C S, SILVA H L D, et al. Potentiality of cassava cultivars as a source of carotenoids[J]. *Gene Conserve*, 2005(15): 33–35.

[23] 魏艳, 黄洁, 林立铭, 等. 木薯块根不同部位的营养成分研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2016, 44(6): 53–61. [WEI Y, HUANG J, LIN L M, et al. Nutrients in different parts of cassava root[J]. *Journal of Northwest A & F University*, 2016, 44(6): 53–61.]

[24] 韩和悦. 11个食用木薯品种的品质研究与评价[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2017. [HAN H Y. Research and evaluation of 11 edible cassava breed' quality[D]. Guangzhou: Zhongkai College of Agriculture and Engineering, 2017.]

[25] PAULA C A, ESTEVAO M, MARIO E, et al. Processing of cassava roots to remove cyanogens[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2005, 18(5): 451–460.

[26] FERRARO V, PICCIRILLO C, TOMLINS K, et al. Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and yam (*Dioscorea* spp.) crops and their derived foodstuffs: safety, security and nutritional value[J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2016, 56(16): 2714–2727.

[27] ADEMOLA A A, OGUGUA C A, RICHARD A, et al. Developing GM super cassava for improved health and food security: Future challenges in Africa[J]. *Agriculture & Food Security*, 2012, 1(1): 1–15.

[28] CHAVEZ A L, BEDOYA J M, SANCHEZ T, et al. Iron, carotene, and ascorbic acid in cassava roots and leaves[J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2000, 21(4): 410–413.

[29] 单荣芝, 黄洁. 中国木薯食谱[M]. 海口: 海南三环出版社, 2011: 2–88. [SHAN R Z, HUANG J. Chinese cassava recipe[M]. Haikou: Hainan Third Ring Press, 2011: 2–88.]

[30] RICKARD J E. Physiological deterioration in cassava roots[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1985, 36(3): 167–176.

[31] 张雅媛, 严华兵. 美味木薯[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2016: 3–44. [ZHANG Y Y, YAN H B. Delicious cassava[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2016: 3–44.]

[32] 魏艳. 31份木薯种质营养、矿质成分及食味的评价[D]. 海口: 海南大学, 2014. [WEI Y. Evaluation of nutrients, mineral contents and taste of 31 accessions cassava germplasm[D]. Haikou:

Hainan University, 2014.]

[33] AKINGBALA J O, OYEWOLE O B, UZO-PETERS P I, et al. Evaluating stored cassava quality in gari production[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2005, 3(1): 75–80.

[34] ARISTIZABAL J, GARCIA J A, OSPINA B. Refined cassava flour in bread making: A review[J]. *Ingeniería e Investigación*, 2017, 37(1): 25–33.

[35] ADENIJI T A. Review of Cassava and wheat flour composite in bread making: Prospects for industrial application[J]. *The African Journal of Plant Science and Biotechnology*, 2013, 7(1): 1–8.

[36] SAKYIDAWSON E, LAMPTEY J, JOHNSON P N T, et al. Effect of processing method on the chemical composition and rheological properties of flour from four new cassava varieties[C]// Iufofst, Word Congress of Food Science and Technology, 2006.

[37] 蒋小静. 木薯全粉加工及其特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2010. [JIANG X J. Study on the processing technology and characteristics of cassava flour[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2010.]

[38] ONYENWOKE C A, OJO C C, OMODAMIRO R M, et al. Effect of drying methods on total carotenoids content retention in pro-vitamin A a high quality cassava flour[J]. *Umudike Journal of Engineering and Technology*, 2015, 1(2): 1–9.

[39] 李明娟, 王颖, 张雅媛, 等. 食用木薯全粉添加量对饼干品质、质构特性及消化性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 55–59. [LI M J, WANG Y, ZHANG Y Y, et al. Effects of the edible cassava whole flour on the quality, texture characteristics and digestive performance of biscuits and digestive performance of biscuits[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(9): 55–59.]

[40] GYEDU-AKOTO E, LARYEA D. Evaluation of cassava flour in the production of cocoa powder-based biscuits[J]. *Nutrition and Food Science*, 2013, 43(1): 55–59.

[41] OLUWAMUKOMI M O, OLUWALANA I B, AKINBOWALE O F. Physicochemical and sensory properties of wheat-cassava composite biscuit enriched with soy flour[J]. *African Journal of Food Science*, 2011, 5(2): 50–56.

[42] AKUBOR P I, UKWURU M U. Functional properties and biscuit making potential of soybean and cassava flour blends[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2003, 58(3): 1–12.

[43] OLAPADE A A, ADEYEMO A M. Evaluation of cookies produced from blends of wheat, cassava and cowpea flours[J]. *International Journal of Food Studies*, 2014, 3(2): 175–185.

[44] MASAMBA K, JINAZALI H. Effect of cassava flour processing methods and substitution level on proximate composition, sensory characteristics and overall acceptability of bread made from wheat-cassava flour blends[J]. *African Journal of Food Agriculture Nutrition and Development*, 2014, 14(6): 2190–2203.

[45] SHITTU T A, FADEYI F B, LADIPO M A. Impact of cassava flour properties on the sensory quality of composite white bread[J]. *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods*, 2015, 7(5): 769–777.

[46] EDUARDO M, SVANBERG U, OLIVEIRA J, et al. Effect of cassava flour characteristics on properties of cassava-wheat-maize

- composite bread types[J]. *International Journal of Food Science*, 2013(5): 305–307.
- [47] JENSEN S, SKIBSTED L H, KIDMOSE U, et al. Addition of cassava flours in bread-making: Sensory and textural evaluation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(1): 292–299.
- [48] ERIKSSON E, KOCH K, TORTOE C, et al. Evaluation of the physical and sensory characteristics of bread produced from three varieties of cassava and wheat composite flours[J]. *Food and Public Health*, 2014, 4(5): 214–222.
- [49] SHITTU T A, AMINU R A, ABULUDE E O. Functional effects of xanthan gum on composite cassava-wheat dough and bread[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(8): 2254–2260.
- [50] PASQUALONE A, CAPONIO F, SUMMO C, et al. Gluten-free bread making trials from cassava (*Manihot esculenta* Crantz) flour and sensory evaluation of the final product[J]. *International Journal of Food Properties*, 2010, 13(3): 562–573.
- [51] BAKARE H A, OSUNDAHUNSI O F, ADEGUNWA M O, et al. Pasting characteristics, baking and sensory qualities of cakes from blends of cassava and wheat flours[J]. *Journal of Culinary Science and Technology*, 2014, 12(2): 109–127.
- [52] 王颖, 李明娟, 张雅媛, 等. 木薯全粉对蛋糕品质及其质构特性的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(10): 179–183, 189. [WANG Y, LI M J, ZHANG Y Y, et al. Effect of the cassava flour on the qualities and texture characteristics of cake[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(10): 179–183, 189.]
- [53] UGWONA F U, OGARA J I, AWOGBENJA M D. Chemical and sensory quality of cakes formulated with wheat, soybean and cassava flours[J]. *Indian Journal of Science*, 2012, 1(2): 1–6.
- [54] 李佩, 谢彩锋, 丁慧敏, 等. 木薯全粉面条配方的优化[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(3): 187–193. [LI P, XIE C F, DING H M, et al. Optimization of formula of cassava whole flour noodle[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(3): 187–193.]
- [55] 张丽超, 谢彩锋, 古碧, 等. 木薯全粉馒头的研制[J]. *食品科技*, 2016, 41(10): 127–132. [ZHANG L C, XIE C F, GU B, et al. Preparation of cassava flour steamed bread[J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41(10): 127–132.]
- [56] 苏艳兰, 韦茂新, 刘功德, 等. 食用木薯艾糍加工工艺的研制[J]. *食品科技*, 2014, 39(11): 122–125. [SU Y L, WEI M X, LIU G D, et al. Development for processing technology of edible cassava Mugwort glutinous rice cake[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 39(11): 122–125.]
- [57] 易拓, 黄娟, 雷雅杰, 等. 木薯食品研究进展[J]. *美食研究*, 2019, 36(2): 23–27. [YI T, HUANG J, LEI Y J, et al. Research advances on cassava food[J]. *Journal of Researches on Dietetic Science and Culture*, 2019, 36(2): 23–27.]
- [58] 王家胜, 刘翀, 王婷, 等. 天然马铃薯、木薯和玉米淀粉添加对发酵挂面品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 40–47. [WANG J S, LIU C, WANG T, et al. Effect of native potato, cassava and corn starches supplement on the quality of dried fermented noodles[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 40–47.]
- [59] SANTAYANON R, WOOTHIKANOKKHAN J. Modification of cassava starch by using propionic anhydride and properties of the starch-blended polyester polyurethane[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2003, 51(1): 17–24.
- [60] 梁露锋, 玉琼广, 冯琳, 等. 食用木薯变性淀粉的发展与应用[J]. *轻工科技*, 2014(12): 1–3, 21. [LIANG L F, YU Q G, FENG L, et al. Development and application of edible cassava modified starch[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2014(12): 1–3, 21.]
- [61] PAOLA C I, JOSÉ U S, EDUARDO R. Effect of modified cassava starch on the rheological and quality properties of a dairy beverage prepared with sweet whey[J]. *Food Science and Technology*, 2019(1): 134–142.
- [62] PARREO R P, CARANDANG M B. Effect of modified cassava starch in reduced-fat mayonnaise by correlating emulsion stability with antioxidation reaction using gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS)[J]. *Philippine Journal of Science*, 2021, 150(4): 753–763.
- [63] 王小军, 曹余, 高大伟, 等. 几种木薯变性淀粉对火腿肠品质的影响研究[J]. *农产品加工*, 2019(22): 11–14. [WANG X J, CAO Y, GAO D W, et al. Study on the effect of several cassava modified starches on the quality of ham sausage[J]. *Farm Products Processing*, 2019(22): 11–14.]
- [64] 李丹辰, 陈丽娇, 梁鹏, 等. 木薯淀粉与木薯变性淀粉鱼糜加工性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(8): 60–64. [LI D C, CHEN L J, LIANG P, et al. The effect of tapioca starch and modified tapioca starch on surimi processing properties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(8): 60–64.]
- [65] 胡艳灵, 胡荣柳, 高丹阳, 等. 不同木薯变性淀粉在保鲜湿面条中的应用研究[J]. *农产品加工*, 2020(9): 17–19, 23. [HU Y L, HU R L, GAO D Y, et al. Study on application of different tapioca modified starch in fresh-keeping wet noodles[J]. *Farm Products Processing*, 2020(9): 17–19, 23.]
- [66] 徐慧敏, 胡荣柳, 张淑芬, 等. 木薯变性淀粉在芋圆制作中的应用研究[J]. *江苏调味副食品*, 2020(4): 11–14. [XU H M, HU R L, ZHANG S F, et al. Study on the application of different tapioca modified starch in taro[J]. *Jiangsu Condiment and Subsidiary Food*, 2020(4): 11–14.]
- [67] 罗兴录. 广西木薯产业化发展对策[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(6): 376–379. [LUO X L. Strategies for developing cassava industry of Guangxi[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(6): 376–379.]
- [68] AHMED M, AKTER M S, LEE J C, et al. Encapsulation by spray drying of bioactive components, physicochemical and morphological properties from purple sweet potato[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2010, 43(9): 1307–1312.