

无明矾薯类营养鲜湿粉条研究进展

郭昊^{1,2,3}, 孙红男^{1*}, 马梦梅^{1*}, 木泰华¹, 李杨²

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193;
2. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109; 3. 青岛特种食品研究院, 青岛 266109)

摘要: 粉条是深受亚洲人民喜爱的传统淀粉类凝胶制品。根据水分含量的不同, 粉条可以分为干粉条和鲜湿粉条。其中, 薯类鲜湿粉条加工能耗低、口感细腻爽滑、食用方便快捷, 日益受到消费者的青睐。然而, 鲜湿粉条结构稳定性差、不耐煮、食用品质差, 相关企业常通过添加明矾来解决上述问题。随着经济的快速发展和人民生活水平的提高, 消费者对绿色、安全、营养食品的要求日益增长, 因此对传统鲜湿粉条产业提出了更高的要求。本文从加工工艺、配方优化、营养功能提升等方面综述了无明矾薯类鲜湿粉条的研究进展, 分析了限制我国薯类鲜湿粉条产业发展的主要问题, 并提出相关建议, 旨在为无明矾薯类营养鲜湿粉条品质提升及产业技术升级提供参考。

关键词: 薯类鲜湿粉条; 无明矾; 加工工艺; 营养强化; 低血糖生成指数

Research progress on alum-free nutritional fresh wet vermicelli from potato

GUO Hao^{1,2,3}, SUN Hong-Nan^{1*}, MA Meng-Mei^{1*}, MU Tai-Hua¹, LI Yang²

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 2. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 3. Qingdao Institute of Special Food, Qingdao 266109, China)

ABSTRACT: Vermicelli is a traditional starchy gelatinous product loved by Asian people. Depending on the moisture content, vermicelli can be divided into dry vermicelli and fresh wet vermicelli, among which, fresh wet vermicelli obtained from potato and sweet potato are increasingly favored by consumers due to low processing energy consumption, delicate and smooth taste, and convenience. However, there are some problems with fresh wet vermicelli, such as poor structural stability, poor cooking resistance and poor eating quality, so companies often solve these problems by adding alum. With the rapid economic development and the improvement of people's living standards, the requirements for green, safe and nutritious vermicelli are growing, thus putting forward higher requirements for the traditional wet vermicelli industry. This paper reviewed the research progress of alum-free and nutritional fresh wet vermicelli made of potato and sweet potato from the aspects of processing technology, formula optimization and nutritional-functional enhancement, analyzed the main problems limiting the development of wet vermicelli industry in China, and put forward to the relevant suggestions, aiming to provide reference for the quality

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172250)、国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32172250), and the Earmarked Fund for CARS-10-Sweetpotato (CARS-10)

***通信作者:** 孙红男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。E-mail: sunhongnan@caas.cn

马梦梅, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。E-mail: meimei881020@163.com

***Corresponding author:** SUN Hong-Nan, Ph.D, Associate Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2, Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: sunhongnan@caas.cn

MA Meng-Mei, Ph.D, Assistant Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2, Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: meimei881020@163.com

improvement of alum-free nutritional fresh wet vermicelli and industrial technology upgrading.

KEY WORDS: potato fresh wet vermicelli; alum-free; processing technology; nutritional enhancement; low glycemic index

0 引言

薯类粉条是我国传统淀粉凝胶食品,按照水分含量的不同,可分为干粉条(水分 $\leq 15\%$)和鲜湿粉条(水分 $>50\%$)^[1-2]。与干粉条相比,鲜湿粉条具有口感细腻爽滑、蒸煮时间短、食用方便快捷等优点,且加工过程节省了干燥工序,能耗更低,发展前景更加广阔^[3]。

与干粉条相比,鲜湿粉条未经过干燥处理,和面和成型过程中淀粉浓度较低,淀粉分子相互交联缠绕和聚合有序的机会减少,进而抑制了其结晶重排,影响粉条的品质^[4]。目前,生产企业通常需要加入明矾 $[\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}]$ 来提高鲜湿粉条的耐煮性和食用品质,且添加量远高于干粉条。这是因为在淀粉糊化过程中,明矾中的 Al^{3+} 与水结合生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体,此胶体与淀粉分子产生不可逆的吸附,从而增加体系中深层结合水比例,使体系中的各种粒子聚集,形成致密的网络结构,从而改善粉条品质^[5]。但是,长期食用含铝食品,会影响儿童骨骼发育,诱导骨质疏松,并且有研究表明摄入过量的铝元素会诱发阿尔兹海默症等疾病^[6-8]。世界卫生组织已于 1989 年正式把铝确定为食品污染物并要求加以控制。GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》与 GB 2762—2012《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定淀粉制品的铝含量不超过 200 mg/kg(干重)。

随着我国经济的快速发展和人民生活水平的逐步提高,健康、高品质、高营养、方便快捷及适合特殊人群食用的多样化无明矾粉条产品的需求量日益增加。因此,本文在综述我国薯类鲜湿粉条加工工艺、配方优化、营养提升等研究进展的基础上,提出薯类鲜湿粉条产业健康、可持续发展的相关建议,以期对薯类鲜湿粉条品质提升与产业技术升级提供理论依据。

1 薯类鲜湿粉条加工工艺

随着科技发展,粉条的加工设备不断改进,加工工艺不断优化,传统粉条的手工操作环节逐渐被机器替代。鲜湿粉条加工环节主要包括:打芡(淀粉糊化)、和浆、定型(熟化)、冷却(冷藏、冷冻)等。在粉条加工过程中,需要经过一次或者两次热处理(淀粉糊化或蒸煮定型),根据熟化方式不同,可分为挤压成型熟化(挤压式)、涂布成型熟化(涂布铺浆式)和热水浴成型熟化(传统漏瓢式)^[9]。

1.1 挤压式加工工艺

挤压式加工工艺主要采用螺旋式挤压设备将淀粉粉

团挤压,通过不同孔径、形状的筛子制作不同粗细的粉条,经熟化、定型、冷藏或冷冻后得到产品^[10]。挤压式工艺是生产鲜湿粉条最常用的工艺,操作简单,目前市售鲜湿粉条主要通过此方式进行加工。

1.2 涂布铺浆式加工工艺

涂布铺浆式加工工艺是指通过恒温浆和、上料涂布、连续熟化、低温老化、切割来生产粉条,可通过更换切割刀片来生产不同宽度的粉条,具有自动化、连续化等优点,在国内多家大型企业实现了广泛应用。此工艺在加工过程中通过真空挤压形成面片,经过一次热处理使淀粉糊化并定型,其淀粉分子与水分结合紧密,且不需挂杆冷却,因此对明矾的需求不大,目前已实现了涂布铺浆式传统蒸煮粉条、水晶粉条、即食粉条的产业化生产。

1.3 漏瓢式加工工艺

漏瓢式加工工艺是我国粉条生产的传统工艺,有着悠久的历史,在我国四川、贵州、河北等地及非洲、东南亚地区的一些国家应用广泛^[11]。此工艺主要在打芡、和浆的基础上,利用重力在特定孔径的漏瓢中漏出粉浆,进而通过沸水定型来生产粉条^[12]。早期,此工艺主要是手工漏粉,被广泛应用于家庭作坊,粉条质量取决于漏粉师傅的经验。近年来,漏瓢式加工工艺在手工工艺的基础上进行了仿生设备配套和系统优化,具有生产成本低、设备投资小等优点。

采用挤压式与漏瓢式加工工艺时,由于需要将粉条进行切断上挂,对粉条的弹性及拉伸强度等有更高的要求。目前,企业往往通过添加过量明矾来改善粉条的品质。因此,寻找绿色、安全、健康的明矾替代物也成为了我国薯类鲜湿粉条产业发展的必然趋势。

2 无明矾薯类鲜湿粉条研究进展

淀粉打芡糊化、熟化定型及冷藏(或冷冻)老化是薯类鲜湿粉条加工过程中的共性环节。加热使淀粉颗粒溶胀破裂,直链淀粉析出,淀粉分子结晶有序结构被破坏;老化过程中析出的直链淀粉和支链淀粉结晶重排,形成凝胶,进而制作为粉条^[13](图 1)。因此,通过改变淀粉的结构和糊化回生特性,进而改善鲜湿粉条的品质,可能是寻找明矾替代物的有效途径。国内外学者也研究了原料淀粉复配及外源添加改性淀粉、多糖、蛋白质等对无明矾薯类鲜湿粉条的影响。

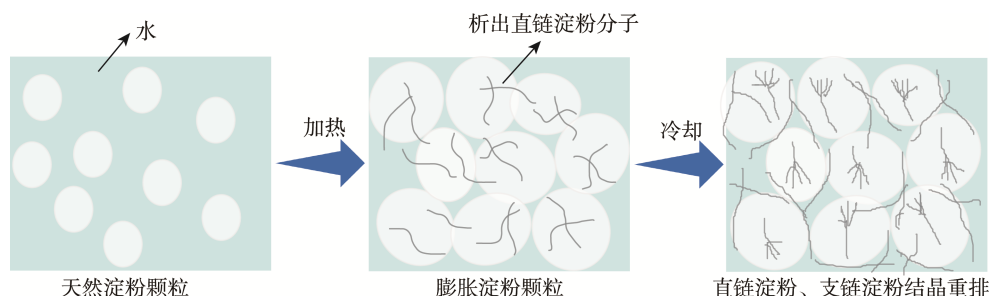


图 1 淀粉糊化回生示意图

Fig.1 Schematic diagram of starch pasting and regeneration

2.1 原料淀粉对无明矾薯类鲜湿粉条品质的影响

不同原料淀粉的结构及糊化回生特性对粉条品质具有不同的影响。已有相关学者通过对原料淀粉结构及物化特性进行研究,明确了原料淀粉对粉条拉伸及蒸煮性能影响的内在机制,为无明矾粉条生产提供理论依据。

侯夫云等^[14]研究了济薯 25、济薯 26 和商薯 19 3 种不同甘薯淀粉的结构、组成成分、老化、糊化特性及其与粉条品质特性的关系。结果表明,淀粉的直支比与粉条的剪切、拉伸特性和硬度呈正相关性,直链淀粉通过影响淀粉的糊化来影响粉条的性质。此外,该研究发现淀粉中的脂质会与淀粉颗粒形成复合物,从而影响淀粉糊化的崩解值和最大黏度。邹金浩等^[15]研究了木薯淀粉(SC9、SC205、LMC)、淮山淀粉(GY2、SFY、MPY)和甘薯淀粉(XSSP)的微观形貌、粒径、分子结构、结晶结构等性质与粉条质构特性的关系。结果显示,淀粉的旋转半径与粉条的断条率及膨胀系数呈正相关;淀粉的多分散系数与粉条的硬度呈负相关,与粉条的拉伸强度呈正相关。淀粉的内聚性越小,糊化时所形成的结构越稳定,所制作粉条的品质越好。

在对单一淀粉结构和物化特性研究基础上,部分学者对不同淀粉混合后的结构和物化特性进行分析,阐述混合淀粉结构、物化特性对粉条品质的影响,为无明矾粉条生产提供理论依据。

孙震曦等^[16]以不同混合比例的商薯 19 和广薯 87 甘薯淀粉为研究对象,分析混合淀粉的结构、物化特性及所制粉条的质构特性。结果表明,混合淀粉的基本成分、粒径及官能团表现为加合效应,而糊化回生特性则与两种淀粉比例协同作用有关;其中,直链淀粉含量高的淀粉比例增加会提高混合淀粉的糊化稳定性,进而改善粉条的质构特性。LI 等^[17]将甘薯淀粉与木薯淀粉以不同比例混合,研究其凝胶流变学特性与质构特性。结果表明,由于甘薯淀粉具有抗剪切性,糊化过程中未完全溶胀,导致混合淀粉的峰值黏度低于单一淀粉的峰值黏度;随着混合淀粉中甘薯淀粉比例增加,混合淀粉具有与纯直链淀粉相似的流变学性质;通过对损耗正切角比较,混合淀粉凝胶的结构稳定性更优,并证实了混合淀粉的热稳定性和凝胶的剪切特性

具有加和效应,且取决于混合淀粉中木薯淀粉的比例。

YANG 等^[18]采用甘薯、木薯、马铃薯、糯玉米、豌豆、绿豆、小麦、大米及玉米淀粉进行打芡,进而与甘薯淀粉混合,采用漏瓢式工艺制备鲜湿粉条。结果显示,直链淀粉含量高的淀粉在打芡过程中不易糊化,更接近于固体,不利于漏瓢成型。

2.2 改性淀粉对无明矾薯类鲜湿粉条品质的影响

改性淀粉是指对原淀粉采用化学、物理、生物酶等方法进行处理,通过赋予淀粉分子辛烯基琥珀酸酐、羟丙基和乙酰基等新官能团,或者改变淀粉分子大小和颗粒特性,使淀粉糊化特性改变,进而影响鲜湿粉条的品质^[19]。

邢福^[20]使用 100~600 W 的超声波对甘薯淀粉进行改性,并研究其对淀粉物化特性及所制粉条品质特性的影响。结果表明,在 100 W 超声功率下,由于甘薯淀粉非结晶区被部分破坏,结晶度和热稳定性降低;使所制作的甘薯粉条的断条率降低,透光率升高,口感最佳。LIAO 等^[21]将甘薯淀粉置于 105℃下湿热处理 1 h,研究该湿热处理对甘薯淀粉结构与其制作粉条品质特性的影响。结果显示,经过 105℃湿热处理甘薯淀粉 1 h 后,甘薯淀粉直链淀粉析出量增加,无定形区域中的淀粉链结构重排和结晶有序,淀粉链之间缔结增强,膨胀势降低,淀粉的回生速率增加,峰值黏度、糊化崩解值降低,所制备甘薯粉条的硬度、弹性和咀嚼性提高。INDRIANTI 等^[22]将甘薯淀粉于 110℃下湿热处理 1~3 h,并研究其对甘薯淀粉理化性质和改性淀粉在食品中应用的影响。结果表明,甘薯淀粉在 110℃下湿热处理 1~3 h 后,淀粉链之间相互作用增强,结晶度和糊化温度升高,膨胀势、溶解度、糊化峰值黏度、崩解值降低,淀粉凝胶黏度降低,说明改性后的甘薯淀粉更适合生产粉条。LIAO 等^[23]利用植物乳杆菌发酵甘薯淀粉,并研究其物化特性及所制粉条的品质。结果显示,发酵 1~3 d 后,甘薯淀粉的糊化峰值温度、糊化回生值和膨胀势升高,结晶度略微增加,所制作粉条的弹性及硬度增加。

综上所述,原料淀粉的性质对粉条的质构特性有显著影响,使用混合原料淀粉或改性淀粉替代明矾是一种有效途径,但目前未见化学改性薯类淀粉在粉条生产中的应

用。同时,我国薯类粉条市场存在着虚假宣传、标签标注不规范等问题,使用混合原料淀粉替代明矾,需要规范食品包装^[24]。此外,也可以根据淀粉结构特性进行经济效益分析,根据原料淀粉性质对粉条品质的影响,找到适宜的淀粉改性方法。

2.3 多糖与蛋白质对无明矾薯类鲜湿粉条品质的影响

多糖、蛋白质等大分子可以与淀粉分子竞争吸水或者相互作用,改变淀粉凝胶结构或者影响淀粉回生,从而改善鲜湿粉条的品质^[25-26]。此外,多糖及蛋白质对无明矾鲜湿粉条的影响在很大程度上取决于其类型和浓度^[27-28]。已有相关学者研究了多糖、蛋白质及二者复合使用替代明矾对鲜湿粉条品质特性的影响。

石彬等^[29]研究了阿拉伯胶、海藻酸钠、黄原胶、果胶四种多糖代替明矾改善甘薯粉条的品质。结果显示,海藻酸钠、黄原胶、果胶呈剂量依赖型地提高了甘薯淀粉的流变应力,且多糖添加量在 0.1%~0.3%浓度内,粉条的断条率随添加量的增加而降低,当添加量高于 0.3%后,粉条断条率提高;进一步地,将阿拉伯胶、海藻酸钠、黄原胶、果胶进行复配,淀粉糊化黏度随复配添加剂总量的增大而增大,且海藻酸钠对淀粉糊化黏度增加贡献度较大。FENG 等^[30-31]研究了壳聚糖、黄原胶、海藻酸钠和谷胱蛋白、蛋清蛋白复配对甘薯鲜湿粉条质构与蒸煮特性的影响。结果表明,多糖和蛋白质的加入可提高甘薯淀粉粉团的剪切应力,降低剪切形变,有助于甘薯鲜湿粉条形成均匀多孔的结构;进一步地,将上述多糖与蛋白质进行复配,结果表明,在淀粉糊化和老化过程中,组合物发生相分离或者交联行为,粉条形成了更加稳定的网络结构,具有更小和分布均匀的气孔,粉条的抗变形性、拉伸强度与煮断时间得到改善。

由此可见,多糖与蛋白质可用于改善鲜湿粉条的质构和口感。然而,目前大多数研究仅仅局限于不同种类及添加量的多糖、蛋白质对淀粉凝胶食品品质、蒸煮损失等宏观性质的变化上,缺乏对其拉伸力学特性的深层次探讨。更好地理解 and 更精确地控制多糖与蛋白质间的相互作用,将有助于推动具有改进的营养与功能特性的鲜湿粉条结构的设计^[32]。因此,深入研究多糖与蛋白质对鲜湿粉条高拉伸强度结构形成的分子机制,不仅有助于完善鲜湿粉条结构设计 with 加工理论体系,也会极大地提高鲜湿粉条的品质和营养功能特性。

2.4 环境因子对无明矾薯类鲜湿粉条品质的影响

与多糖和蛋白质不同,环境因子,如盐离子、pH、温度和加热速率等,可以通过与淀粉分子争夺水分、降低淀粉体系的水分活度、缩小淀粉分子之间的距离等途径,使淀粉分子更容易取向而重新排列,加速淀粉的回生,从而改善淀粉凝胶的硬度及弹性^[33]。目前,相关研究主要集中在环境因子对薯类淀粉凝胶特性的影响方面,研究结果间

接证实了环境因子对无明矾薯类鲜湿粉条的品质具有改良作用。

LI^[34]向甘薯淀粉中添加 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Zn^{2+} , 研究其对甘薯淀粉凝胶性质的影响,为其在食品中应用提供依据。结果表明,低浓度(0~0.45 mol/L)的 K^+ 可以中和多糖分子所带电荷,降低分子间作用力,使凝胶迅速老化,进而使甘薯淀粉凝胶硬度增强;低浓度 Mg^{2+} 可以促进氢键和离子键生成,进而促进网络结构形成,从而提高凝胶硬度和弹性;低浓度的 Ca^{2+} 可提高淀粉的吸水能力和持水性,使淀粉三维网络结构致密,从而提高淀粉凝胶的咀嚼性和拉伸强度;低浓度的 Zn^{2+} 通过提高淀粉分子之间的相互作用,使淀粉凝胶的硬度和弹性增加。

LI^[34]系统研究了不同 pH (2~12)对甘薯淀粉凝胶性质的影响。结果显示,强酸强碱条件下,甘薯淀粉分子之间氢键断裂,凝胶硬度和弹性下降;pH 为 8 时,淀粉分子附着紧密,凝胶的硬度和弹性增加。FANG 等^[35]研究了不同 pH (4~10)范围内糯马铃薯淀粉的凝胶特性。结果表明,糯马铃薯淀粉的凝胶强度与 pH 呈显著的负相关,当 pH 从 10 降低至 4 时,淀粉凝胶强度逐渐升高,可能是由于分子间静电排斥降低;在中性和碱性环境下,淀粉分子受到大量离子化的磷酸单酯的电荷排斥阻碍,凝胶强度降低。

JIANG 等^[36]研究了低温(0~-18℃)对马铃薯淀粉老化特性及其凝胶质构特性的影响。结果表明,在-6~-9℃时,由于水在冷冻过程中形成的冰晶尺寸较大,破坏了马铃薯淀粉凝胶的三维网络结构,淀粉凝胶的硬度、粘附性和咀嚼性增加,弹性略有下降;在-18℃时,形成很多小而密集的冰晶,对淀粉凝胶结构造成的破坏较小,凝胶的硬度和咀嚼性降低,弹性增大。MALUMBA 等^[37]研究了加热速率对马铃薯淀粉糊化特性及其凝胶质构特性影响。结果显示,随着加热速率增大,马铃薯淀粉的溶胀度升高、崩解值降低,促进淀粉分子结构重排,所形成的凝胶硬度、黏性增加。

综上所述,一价盐离子对凝胶硬度和弹性影响较小,且随浓度增加而降低;二价盐离子对凝胶硬度和弹性影响显著,但随浓度的增加,其对凝胶硬度和弹性影响减弱。不同 pH 对薯类淀粉凝胶性质影响较大,并且温度和加热速率对薯类淀粉凝胶性质影响显著,且影响程度与淀粉种类相关。因此,在生产薯类鲜湿粉条时,根据薯类淀粉的种类调整 pH、温度及加热速率或添加一定浓度的盐离子,有助于改善无明矾薯类鲜湿粉条的品质。

3 薯类营养鲜湿粉条研究进展

薯类鲜湿粉条作为一种淀粉凝胶制品,成分单一,无法满足消费者对营养、健康食品的需求。因此,部分学者在研究明矾替代物的同时,也对营养鲜湿粉条进行了探索。目前,主要通过在薯类淀粉的基础上复合其他营养原料或者在淀粉凝胶制作过程中添加营养素来制作营养粉条。

3.1 营养强化薯类鲜湿粉条

周睿等^[38]添加 30%预糊化芸豆全粉、0.5%复合磷酸盐和 0.8%瓜尔豆胶制作无明矾马铃薯营养粉条,测定其蒸煮品质及感官特性。结果显示,无明矾马铃薯营养粉条断条率低、色泽光亮、有弹性、口感爽滑,且具有特殊豆香味。邢丽君等^[39]研究了紫薯全粉添加量(0%~15%)对甘薯淀粉物化特性及粉条品质的影响。结果表明,随着紫薯全粉添加量不断增加,甘薯淀粉膨胀势、溶解度、回生值不断提高,且在紫薯全粉添加量为 12%的条件下,无明矾紫薯粉条质构特性、蒸煮特性及感官特性等品质最佳。万照东^[40]将葛根淀粉、玉米淀粉、马铃薯淀粉按照质量比 3:1:1 混合,进而添加 6%小球藻、15%变性淀粉、0.6%羧甲基纤维素钠、1%盐代替明矾制作无明矾小球藻粉条,研究其蒸煮特性及免疫调节作用。结果表明,该工艺制作的粉条蒸煮特性良好,且高剂量粉条(20 g/kg 小鼠体重)能降低环磷酰胺对小鼠溶菌酶、乳酸脱氢酶、酸性磷酸酶的影响,预防环磷酰胺对小鼠脾细胞及巨噬细胞的破坏,提升实验小鼠的免疫能力。陈兵^[41]添加 25%的菠菜汁制作菠菜粉条,以抗坏血酸、碳酸钠、亚硫酸氢钠、氯化钙作为护色剂,研究其品质特性。结果表明,营养甘薯粉条膨润度、弹性和粘结性降低,硬度增加,且色泽墨绿。柏绿山等^[42]将 30%~40%食叶草粉加入到薯类淀粉(马铃薯淀粉、甘薯淀粉)中制作薯类粉条,研究其品质特性。结果表明,薯类粉条具有良好的质构特性,且蛋白质、氨基酸、膳食纤维等营养成分的含量显著提高。

宋春春^[43]使用微波破壁技术提取马铃薯淀粉,向该淀粉中添加钙铁锌口服液,进而采用高压挤出技术制作粉条,测定其质构特性、蒸煮特性及基本成分。结果表明,此粉条富含矿物元素,质构特性优良,软硬适宜,断条率低。郭卫芸等^[44]向甘薯淀粉中添加 0.15%茶多酚,制作甘薯粉条,测定粉条的品质特性及贮藏 60 d 后粉条中茶多酚的保留率及自由基清除率。结果表明,茶多酚甘薯粉条具有良好的硬度、弹性和咀嚼性,且在常温储存 60 d 后,粉条中茶多酚保留率为 60.73%,自由基清除率下降 16.29%;-18℃贮藏条件下粉条中茶多酚保留率为 71.54%,自由基清除率下降 10.38%。

目前,相关研究主要集中在不同原料或营养强化成分(如钙铁锌)对粉条质构特性和蒸煮特性的影响方面,缺少对营养强化粉条在消化过程中营养成分的变化规律,以及添加成分与薯类淀粉相互作用的机制研究。

3.2 低血糖生成指数薯类鲜湿粉条

除了添加营养原料或者营养素增加粉条的营养功能特性,还有部分学者添加抗性淀粉或者淀粉水解抑制剂等降低淀粉凝胶的血糖生成指数,可为研究低血糖生成指数薯类鲜湿粉条提供理论依据。

MENON 等^[45]研究了添加不同比例的抗性淀粉(10%、15%、20%)对甘薯粉条体外消化特性和血糖生成指数的影响。结果表明,添加 15%抗性淀粉的粉条具有最低的血糖生成指数,并具有良好的感官特性;然而,抗性淀粉增加了甘薯粉条的蒸煮损失。MA 等^[46]对不同直链淀粉含量(0.9%、33.2%)的马铃薯淀粉和大米淀粉(5%~33%)混合物凝胶特性进行研究。结果表明,混合淀粉凝胶的体外消化率取决于高直链淀粉添加量,直链淀粉含量越高,形成的堆砌结构越紧密,淀粉酶结合位点越少,从而增加慢速消化淀粉和抗性淀粉含量,降低体外淀粉消化率,并且消化率与淀粉堆积密度呈反比。

HUANG 等^[47]向马铃薯淀粉中添加 10%的蒲公英黄酮,对其凝胶特性及体外消化特性进行研究。结果表明,马铃薯淀粉凝胶的颜色更加鲜亮,由于黄酮抑制了淀粉凝胶回生,凝胶的硬度和咀嚼性降低。同时,黄酮与淀粉形成复合物,此复合物是酶的不良底物,并且黄酮还会以非竞争性方式抑制 α -淀粉酶活性,从而降低淀粉凝胶的预估血糖指数。WALIULLAH^[48]将马铃薯渣超微粉碎,以 5%添加量加入到甘薯淀粉中制作粉条,并研究其质构特性及体外消化特性。结果显示,甘薯鲜湿粉条中膳食纤维、抗性淀粉含量增加,质构特性显著改善,且粉条具有良好的 α -淀粉酶活性抑制能力。YIN 等^[49]研究了添加 0.5%~10%鼠李糖半乳糖醛酸聚糖-I (RG-1)果胶对马铃薯淀粉物化特性及其凝胶体外消化特性的影响。结果表明, RG-1 果胶与马铃薯淀粉相互作用,抑制了淀粉溶胀,淀粉的糊化温度增加,淀粉酶与淀粉结合位点变少,从而降低了马铃薯淀粉的水解百分比。并且, RG-1 果胶与淀粉结合吸附在淀粉表面,抑制淀粉膨胀和直链淀粉的析出,增加了慢速消化淀粉和抗性淀粉含量。随着果胶添加量改变,抗性淀粉含量先增加再减少,慢速消化淀粉先减少再增加,快速消化淀粉先增加后减少,在添加量为 1%时,抗性淀粉、快速消化淀粉含量最高,快速消化淀粉含量增加可能是因为 1%添加量的 RG-1 果胶使凝胶结构凹凸不平,增加了与淀粉酶接触面积。ZHANG 等^[50]使用 1%~5%葡萄籽原花青素与马铃薯淀粉复合,研究其凝胶消化特性。结果表明,由于葡萄籽原花青素对淀粉酶具有抑制作用,且糊化后无定型复合物随机构型增加了淀粉酶的结合位阻,因此淀粉凝胶的速消化淀粉含量降低,慢速消化淀粉和抗性淀粉含量增加;同时,随葡萄籽原花青素添加量的增加,凝胶的硬度、黏度降低。

由此可见,国内外学者主要探讨了抗性淀粉、淀粉水解抑制剂等对薯类淀粉凝胶消化特性与预估血糖指数的影响,缺少在鲜湿粉条等真实食品体系应用方面的研究。综合考虑营养原料与淀粉水解抑制剂的影响,在保证鲜湿粉条质构及蒸煮品质的基础上,探究其对鲜湿粉条消化特性、营养成分释放及降血糖、降血脂等生理活性的影响是

营养功能粉条的发展趋势。

4 存在问题

目前已有学者对无明矾鲜湿粉条及营养粉条开展了研究,但仍存在以下几个方面的问题:

(1)虽然有许多学者对无明矾薯类鲜湿粉条的配方进行优化,但只有少数配方应用于企业生产,且主要集中在涂布铺浆工艺。在采用漏瓢式和挤压式工艺生产粉条的企业以及家庭作坊生产中仍使用明矾,一是因为明矾价格低廉,抗性淀粉、多糖及蛋白等替代物价格较高;二是在企业生产过程中使用的机器设备及工艺(例如需要挂杆控水)与实验室小试有差别,导致企业无法生产出与实验室品质相当的鲜湿粉条。另外,相较于挤压式与涂布式加工工艺,传统漏瓢式加工工艺相关研究较少。

(2)薯类鲜湿粉条以淀粉多糖为主,营养水平相对较低,产品同质化现象较为严重。随着时代进步及经济发展,消费者对健康、绿色、营养的食品需求量日益增加。目前已开展南瓜粉条、紫薯粉条、菠菜粉条等产品的研发,但多处于实验室小试阶段,商品化产品相对较少,更未见能满足儿童、老年人、孕妇、野外工作者等个性化营养需求的鲜湿粉条产品。

(3)随着高糖高脂等不良饮食的摄入,我国高血糖、高血脂等患者数量日益增加。我国正全面推进健康中国建设,健康中国行动(2019—2030)明确指出,聚焦重点人群,实施糖尿病、心血管疾病防治等重大行动。目前,未见具有调节血糖、血脂等用途的薯类鲜湿粉条的相关研究。

5 结论与展望

鲜湿粉条作为粉条加工产业的重要组成部分,是发展特色经济和推动乡村振兴的重要手段。在今后的研究中,可从以下几个方面着手解决鲜湿粉条产业存在的问题,进而推动产品品质提升及产业转型升级。

(1)对无明矾薯类鲜湿粉条研究过程中,需要充分考虑企业机械生产设备与实验室研究设备加工条件和加工工艺差异,通过小试、中试试验等确定产业化配方及工艺参数;同时,研究无明矾薯类鲜湿粉条配方要进行经济效益分析,研发配方可以在中小企业及家庭作坊中普及;增加对传统漏瓢式加工工艺研究,优化传统漏瓢式生产配方,通过“一带一路”将我国无明矾薯类鲜湿营养粉条传向世界,弘扬中华民族传统文化。

(2)应以营养、健康、功能等为中心制定研究与产品开发计划。开展多源性薯类鲜湿粉条营养数据收集及配方研究,在明确薯类淀粉和膳食纤维、高活性多糖、多酚类物质等功能因子对薯类鲜湿粉条影响机制的基础上,通过多源性成分复配及精准设计,优化鲜湿粉条产品组

成结构,实现多元化、个性化、营养化、健康化薯类鲜湿粉条的研发。

参考文献

- [1] TAN HZ, LI ZG, TAN B. Starch noodles: History, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving [J]. Food Res Int, 2009, 42(5-6): 551-576.
- [2] 张灿, 曾雪丹, 蒋阳光, 等. 鲜湿马铃薯粉条中明矾替代物的筛选[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(10): 95-102.
ZHANG C, ZENG XD, JIANG GY, *et al.* Screening of alum substitutes in fresh and wet potato vermicelli [J]. Chin J Cereals Oils, 2019, 34(10): 95-102.
- [3] LI Z, ZHANG Y, AI Z, *et al.* Effect of potassium alum addition on the quality of potato starch noodles [J]. J Food Sci Technol, 2019, 56(6): 2932-2939.
- [4] DONMEZ D, PINHO L, PATEL B, *et al.* Characterization of starch-water interactions and their effects on two key functional properties: Starch gelatinization and retrogradation [J]. Curr Opin Food Sci, 2021, 39: 103-109.
- [5] 蒋荣霞, 杨璐, 连喜军, 等. 7种不同品牌粉条明矾含量与耐水煮性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6780-6787.
JIANG RX, YANG L, LIAN XJ, *et al.* Analysis of alum content and cooking resistance of seven different brands of vermicelli [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(20): 6780-6787.
- [6] 惠香, 封雪, 吕晓超. 食品中铝残留问题现状及分析[J]. 食品安全导刊, 2022, (10): 178-180.
HUI X, FENG X, LV XC. Current situation and analysis of aluminum residues in food [J]. China Food Saf Magaz, 2022, (10): 178-180.
- [7] 李青, 刘思洁, 方赤光. 食品中铝含量及其危害研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(1): 14-19.
LI Q, LIU SJ, FANG CG. Advances in the study of aluminum content and its hazards in food [J]. J Food Saf Qual, 2016, 7(1): 14-19.
- [8] 杨蒲晨, 郭素萍, 张兰, 等. 马铃薯粉条生产过程铝残留量影响因素[J]. 食品与机械, 2019, (3): 72-75.
YANG PC, GUO SP, ZHANG L, *et al.* Factors influencing aluminum residues in potato vermicelli production [J]. Food Mach, 2019, (3): 72-75.
- [9] 谢江, 朱永清. 薯类贮藏加工与农产品全产业链开发初探[J]. 四川农业科技, 2020, (12): 45-49.
- [10] XIE J, ZHU YQ. A preliminary study on potato storage and processing and the development of the whole industrial chain of agricultural products [J]. Sichuan Agric Sci Technol, 2020, (12): 45-49.
- [11] XIANG ZY, YE FY, ZHOU Y, *et al.* Performance and mechanism of an innovative humidity-controlled hot-air drying method for concentrated starch gels: A case of sweet potato starch noodles [J]. Food Chem, 2018, 269(dec15): 193-201.
- [12] 木泰华, 孙红男, 张苗, 等. 甘薯深加工技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [13] MU TH, SUN HN, ZHANG M, *et al.* Deep processing technology of sweet potato [M]. Beijing: Science Press, 2014.

- [12] 曾洁, 姜继凯, 高海燕, 等. 无添加马铃薯粉条老化工艺及贮藏品质[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 283–289.
ZENG J, JIANG JK, GAO HY, *et al.* Aging process and storage quality of additive-free potato vermicelli [J]. Food Sci, 2019, 40(12): 283–289.
- [13] XIANG Z, YE F, ZHOU Y, *et al.* Performance and mechanism of an innovative humidity-controlled hot-air drying method for concentrated starch gels: A case of sweet potato starch noodles [J]. Food Chem, 2018, 269: 193–201.
- [14] 侯夫云, 陈桂玲, 董顺旭, 等. 不同品种甘薯淀粉组分、物化及粉条品质的比较研究[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 10.
HOU FY, CHEN GL, DONG SX, *et al.* Comparative study on the starch fraction, physical and chemical properties and vermicelli quality of different varieties of sweet potatoes [J]. J Nucl Agric, 2022, 36(2): 10.
- [15] 邹金浩, 李燕, 欧阳华峰, 等. 不同薯类淀粉结构性质与粉条品质的关系[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 77–82.
ZOU JH, LI Y, OUYANG HF, *et al.* Relationship between structural properties of different potato starches and vermicelli quality [J]. Food Sci, 2020, 41(23): 77–82.
- [16] 孙震曦, 木泰华, 马梦梅, 等. 不同种类甘薯淀粉混合对其物化特性及粉条品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 9.
SUN ZX, MU TH, MA MM, *et al.* Effects of mixing different types of sweet potato starch on their physical and chemical properties and vermicelli quality [J]. Food Ind Sci Technol, 2020, 41(22): 9.
- [17] LI SH, YE FY, ZHOU Y, *et al.* Rheological and textural insights into the blending of sweet potato and cassava starches: In hot and cooled pastes as well as in fresh and dried gels [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 89: 901–911.
- [18] YANG W, YE F, JIA L, *et al.* Rheological nature and dropping performance of sweet potato starch dough as influenced by the binder pastes [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 85: 39–50.
- [19] MOHAMMED O, XU B. Review on the physicochemical properties, modifications, and applications of starches and its common modified forms used in noodle products [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 112: 106286.
- [20] 邢福. 超声对粉条品质的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
XING F. Research on the effect of ultrasound on the quality of vermicelli [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [21] LIAO L, LIU H, GAN Z, *et al.* Structural properties of sweet potato starch and its vermicelli quality as affected by heat-moisture treatment [J]. Int J Food Propert, 2019, 22(1): 1122–1133.
- [22] INDRIANTI N, PRANOTO Y. Physicochemical properties of modified sweet potato starch through heat moisture treatment [C]. SolarPACES 2017: International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, 2018, 2024, (1): 020053.
- [23] LIAO L, WU W. Fermentation effect on the properties of sweet potato starch and its noodle's quality by *Lactobacillus plantarum* [J]. J Food Process Eng, 2017, 40(3): e12460.
- [24] 陈井旺, 孙红男, 木泰华. 我国粉条粉丝加工行业发展现状及政策建议[J]. 粮食加工, 2021, 46(6): 59–68.
CHEN JW, SUN HN, MU TH. Development status of China's vermicelli processing industry and policy recommendations [J]. Grain Process, 2021, 46(6): 59–68.
- [25] MI H, LIY, WANG C, *et al.* The interaction of starch-gums and their effect on gel properties and protein conformation of silver carp surimi [J]. Food Hydrocolloid, 2021, 112: 106290.
- [26] REN Y, JIANG L, WANG W, *et al.* Effects of *Mesona chinensis* Benth polysaccharide on physicochemical and rheological properties of sweet potato starch and its interactions [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 99: 105371.
- [27] CHEN S, QIN L, CHEN T, *et al.* Modification of starch by polysaccharides in pasting, rheology, texture and in vitro digestion: A review [J]. Int J Biol Macromol, 2022, 207: 81–89.
- [28] XIAO Y, LIU S, SHEN M, *et al.* Effect of different *Mesona chinensis* polysaccharides on pasting, gelation, structural properties and *in vitro* digestibility of tapioca starch- *Mesona chinensis* polysaccharides gels [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 99: 105327.
- [29] 石彬, 李咏富, 龙明秀, 等. 四种多糖代替明矾改善红薯粉的品质特性[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 202–210.
SHI B, LI YF, LONG MX, *et al.* Improvement of quality characteristics of sweet potato flour by four polysaccharides instead of alum [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(9): 202–210.
- [30] FENG YY, MU TH, ZHANG M, *et al.* Effects of different polysaccharides and proteins on dough rheological properties, texture, structure and *in vitro* starch digestibility of wet sweet potato vermicelli [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 148: 1–10.
- [31] FENG YY, MU TH, ZHANG M, *et al.* Effects of ionic polysaccharides and egg white protein complex formulations on dough rheological properties, structure formation and *in vitro* starch digestibility of wet sweet potato vermicelli [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 149: 1170–1179.
- [32] WEISS J, SALMINEN H, MOLL P, *et al.* Use of molecular interactions and mesoscopic scale transitions to modulate protein-polysaccharide structures [J]. Adv Colloid Interf Sci, 2019, 271: 101987.
- [33] YANG S, DHITAL S, ZHANG MN, *et al.* Structural, gelatinization, and rheological properties of heat-moisture treated potato starch with added salt and its application in potato starch noodles [J]. Food Hydrocolloid, 2022, 131: 107802.
- [34] LI SG. Study on influential factor of texture property of sweet potato starch gel [J]. Adv J Food Sci Technol, 2016, 11(10): 686–691.
- [35] FANG F, LUO X, FEI X, *et al.* Stored gelatinized waxy potato starch forms a strong retrograded gel at low pH with the formation of intermolecular double helices [J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(13): 4036–4041.
- [36] JIANG J, ZENG J, GAO H, *et al.* Effect of low temperature on the aging characteristics of a potato starch gel [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 150: 519–527.
- [37] MALUMBA P, DORAN L, DANTHINE S, *et al.* The effect of heating rates on functional properties of wheat and potato starch-water systems [J]. LWT, 2018, 88: 196–202.
- [38] 周睿, 曹龙奎, 张桂芳, 等. 芸豆营养粉条的研制及品质特性的研究[J]. 农产品加工, 2014, (19): 4–8.

- ZHOU R, CAO LK, ZHANG GF, *et al.* Development and quality characteristics of nutritional vermicelli from kidney beans [J]. *Agric Prod Process*, 2014, (19): 4–8.
- [39] 邢丽君, 木泰华, 张苗, 等. 紫薯全粉添加量对甘薯淀粉物化特性及粉条性质的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(3): 484–492.
- XING LJ, MU TH, ZHANG M, *et al.* Effects of purple potato whole meal addition on physical and chemical properties of sweet potato starch and vermicelli properties [J]. *J Nucl Agric*, 2015, 29(3): 484–492.
- [40] 万照东. 小球藻粉条的研发及其免疫活性的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- WAN ZD. Development of *Chlorella* powder strips and its immunological activity [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.
- [41] 陈兵. 鲜湿菠菜粉条的研制及其保鲜的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- CHEN B. Development of fresh and wet spinach vermicelli and its research on preservation [D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [42] 柏绿山, 杨秀丽. 一种食叶草植物蛋白营养粉条制品及其制备方法与应用, 中国: CN109170837A[P]. 2019.
- BO LS, YANG XL. A leaf-eating grass plant protein nutritional vermicelli product and its preparation method and application, China: CN109170837A [P]. 2019.
- [43] 宋春春. 马铃薯营养粉丝(条)的研制[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- SONG CC. Development of nutritious potato vermicelli [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013.
- [44] 郭卫芸, 陈振毫, 高雪丽, 等. 茶多酚红薯粉条的研制及其抗氧化活性评价[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(13): 156–161.
- GUO WY, CHEN ZH, GAO XL, *et al.* Development of tea polyphenol sweet potato vermicelli and evaluation of its antioxidant activity [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2022, 43(13): 156–161.
- [45] MENON R, PADMAJA G, SAJEEV MS. Cooking behavior and starch digestibility of NUTRIOSE® (resistant starch) enriched noodles from sweet potato flour and starch [J]. *Food Chem*, 2015, 182: 217–223.
- [46] MA M, LIU Y, CHEN X, *et al.* Thermal and pasting properties and digestibility of blends of potato and rice starches differing in amylose content [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 165: 321–332.
- [47] HUANG Y, WU P, CHEN XD. Mechanistic insights into the influence of flavonoids from dandelion on physicochemical properties and *in vitro* digestibility of cooked potato starch [J]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 130: 107714.
- [48] WALIULLAH MH. 马铃薯渣及其膳食纤维结构, 物化与功能特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- WALIULLAH MH. Study on the structure, physical and functional properties of potato pomace and its dietary fibre [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
- [49] YIN X, ZHENG Y, KONG X, *et al.* RG-I pectin affects the physicochemical properties and digestibility of potato starch [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 117: 106687.
- [50] ZHANG Z, TIAN J, FANG H, *et al.* Physicochemical and digestion properties of potato starch were modified by complexing with grape seed proanthocyanidins [J]. *Molecules*, 2020, 25(5): 1123.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

作者简介



郭 昊, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: zero_guo@163.com

孙红男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。

E-mail: sunhongnan@caas.cn

马梦梅, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品化学与营养。

E-mail: meimei881020@163.com