

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241007002

引用格式: 马春敏, 王鑫钰, 徐悦, 等. 挤压型米线的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 99–109.

MA CM, WANG XY, XU Y, *et al.* Research progress of extruded rice noodles [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 99–109. (in Chinese with English abstract).

挤压型米线的研究进展

马春敏¹, 王鑫钰¹, 徐悦¹, 艾连中², 王冰¹, 杨杨¹,
林枫翔³, 李云辉⁴, 吴双⁵, 张娜^{1*}

- (1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028; 2. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海, 200093;
3. 哈尔滨美华生物技术股份有限公司, 哈尔滨 150010; 4. 黑龙江省五常金禾米业有限公司, 五常 150200;
5. 黑龙江双盛米业有限公司, 佳木斯 154002)

摘要: 挤压型米线是以大米作为原料, 经研磨并调配至一定水分含量后, 挤压熟化成型后干燥而得到的米线。传统工艺生产的米线费力、耗时, 在多步骤米线生产过程中会导致产品质量不一等问题。相比而言, 挤压技术是一种集混合、加热、杀菌和成型于一体的食品加工技术。将挤压技术应用到米线加工中, 具有营养成分损失少、微生物污染机会少、生产时间短、生产效率高和操作简便等优点。因此, 我国米线加工业生产中, 自动化的机械加工正逐步取代传统的手工作坊。挤压型米线质量主要受挤压型米线生产过程中原辅材料、加工工艺、挤压参数的影响。因此, 本文阐述了挤压型米线的加工工艺及成型机制, 综述了原辅材料、挤压参数对挤压型米线品质的影响规律, 以为挤压型米线加工工艺及关键点的控制提供理论依据。

关键词: 挤压型米线; 加工工艺; 原辅材料; 挤压参数

Research progress of extruded rice noodles

MA Chun-Min¹, WANG Xin-Yu¹, XU Yue¹, AI Lian-Zhong², WANG Bing¹, YANG Yang¹,
LIN Feng-Xiang³, LI Yun-Hui⁴, WU Shuang⁵, ZHANG Na^{1*}

- (1. School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China; 2. School of Health Science and Engineering, Shanghai University of Technology, Shanghai 200093, China; 3. Harbin Meihua Biotechnology Company Limited by Shares, Harbin 150010, China; 4. Heilongjiang Wuchang Jinhe Rice Industry Limited Liability Company, Wuchang 150200, China; 5. Heilongjiang Shuangsheng Rice Industry Company Limited, Jiamusi 154002, China)

ABSTRACT: Extruded rice noodles are made from rice as raw material, ground and blended to a certain moisture content, extruded and matured, and dried. The traditional production process of rice noodles is laborious and time-consuming, which lead to uneven product quality during the multi-step rice noodle production process. By comparison, extrusion technology is a food processing technique that integrates mixing, heating, sterilization, and shaping. Applying extrusion technology to rice noodle processing has the advantages of less loss of nutrients, fewer opportunities for microbial contamination, shorter production time, higher production efficiency, and easier operation.

收稿日期: 2024-10-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2100803); 国家自然科学基金项目(32372387); 黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG202080); 黑龙江省重点研发计划揭榜挂帅项目(2023ZXJ08B03); 黑龙江省青年科技人才托举工程项目(2023QNTJ001)

第一作者: 马春敏(1992—), 女, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为粮食谷物加工与副产物加工利用。E-mail: chunmin_ma@163.com

*通信作者: 张娜(1979—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食高值化利用。E-mail: foodzhangna@163.com

Therefore, in the production of rice noodle processing industry in China, automated mechanical processing is gradually replacing traditional manual workshops. The quality of extruded rice noodles is mainly affected by the raw materials, processing technology, and extrusion parameters during the production process of extruded rice noodles. Therefore, this paper elaborated on the processing technology and forming mechanism of extruded rice noodles, summarized the influence of raw materials and extrusion parameters on the quality of extruded rice noodles, in order to provide theoretical basis for the control of the processing technology and key points of extruded rice noodles.

KEY WORDS: extruded rice noodles; processing technology; raw materials; extrusion parameters

0 引言

米线源于中国,其发明可以追溯到近 2000 年前的西晋时期^[1]。作为大米深加工产品之一,在我国有着悠久的历史 and 广阔的市场。因其不含麸质,低过敏原和低脂肪含量,而广受欢迎。在工业制备中,米线可以通过两种不同的挤压工艺制备,分别为传统型米线和挤压型米线。传统型米线生产工艺如图 1 所示,榨粉是通过大米清洗浸泡、干磨、两次糊化、老化后形成的。而切粉是通过大米清洗浸泡、湿磨、摊浆、切片、老化后进行的。传统手工米线一般为现产现销,无法长期保存。且工艺较复杂,生产一批米线约需 20 多个小时。因此,传统的米线制作一直被认为是费力、耗时的。且多步骤米线生产工艺也导致了其质量不一的生产难题^[2]。

挤压技术是一种集混合、加热、杀菌和成型于一体的食品加工技术^[3],在组织化蛋白生产、高蛋白谷物类等食品领域中广泛应用。挤压型米线可以通过单螺杆或双螺杆挤压机来制备,因其具有营养成分损失少、微生物污染机会少、

生产时间短、高生产效率、操作简单等优点,而应用到米线加工中。挤压型米线是将水合或干燥后米粉与水送入挤压机并加热,后通过模具塑形而成的。其加工工艺与传统米线的榨粉工艺类似。区别在于挤压型米线在加工过程中将糊化、挤压成型两个工序合二为一,采用现代挤压工艺直接完成^[4]。SEETAPAN 等^[5]研究发现,相较于传统米线生产技术,使用双螺杆挤出机制备的米线具有更良好的延展性。然而,使用螺杆挤压机制备的米线具有质地柔软而黏稠的缺点。近年来,在米线的品质提升方面受到广泛的关注,但针对挤压型米线方面尚未见系统的综述报道。因此,本文阐述了双螺杆挤压型的原辅材料、挤压参数对挤压型米线品质的影响规律,并提供挤压型米线加工工艺及关键点的控制提供理论依据,以期获得品质优良的米线产品。

1 挤压米线加工工艺及成型机制

挤压型米线的具体加工工艺:大米浸泡、磨粉、调制水分、过筛、挤压熟化成型(挤压机)、老化、干燥、包装。图 2 是挤压型米线的具体加工工艺及成型机制。

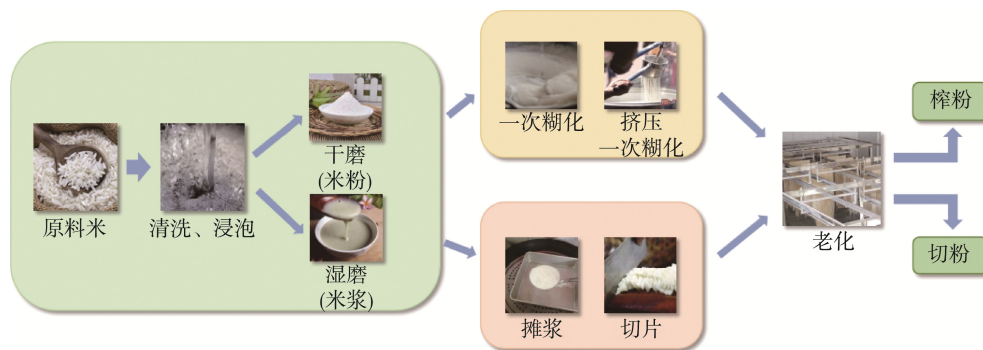


图1 传统米线的加工技术

Fig.1 Processing technology of traditional rice noodles

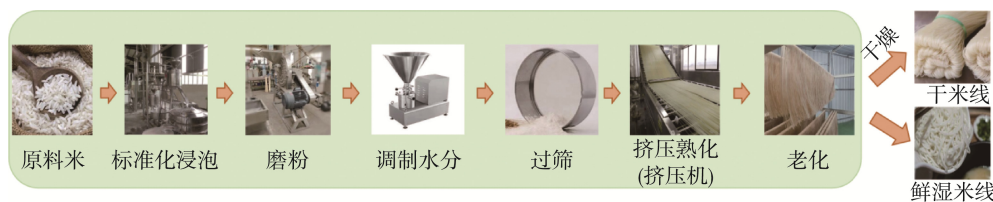


图2 挤压型米线的加工技术

Fig.2 Processing technology of extruded rice noodles

1.1 大米浸泡

大米浸泡一般是米线加工过程中的第一步。相比于直接粉碎,浸泡能够降低大米硬度,提高粉碎效率,且降低营养物质的损失。据研究表明,大米蛋白质颗粒附着于淀粉颗粒表面并填充在淀粉颗粒之间的空隙中^[6]。其中,大米蛋白的吸水性大于大米淀粉,但其吸水率却小于大米淀粉。因此,在长期浸泡条件下,由于蛋白质、淀粉的吸水性及速度差异,蛋白与淀粉间的键合发生了细微的位移,导致大米表面开裂,降低了大米硬度,从而提高了粉碎效率^[7]。

浸泡温度、浸泡时间是影响大米浸泡过程中内部结构和性质的重要因素。温水浸泡因其会增加淀粉的水合率,被用作缩短浸泡时间的常用方法。当浸泡温度降低到淀粉糊化温度以下时,能够减少内核的分裂和随后的固体浸出^[8]。YONG-SHENG 等^[9]研究发现,米线的出浆率随浸泡温度的提高先降低后增加。在 40 °C 的浸泡温度下,水分因热力运动而向米中渗透,较高的浸泡温度能在很短的时间内达到饱和含水量,在大米吸水后,淀粉粒子渗透度增加,米浆颗粒变小,淀粉更容易糊化,从而降低了米粉的出浆率。而浸泡时间通过影响淀粉颗粒大小、水合特性及其他物质与淀粉的分布和结合情况,来影响米线的品质。当大米浸泡 2 h 时,水分已充分被大米吸收,淀粉的糊化作用得以改善,吐浆率也随之下降。

1.2 磨粉

主要的磨粉方法包括湿法磨粉、干法磨粉和半干法磨粉。湿法磨粉制备米线:润米→浸泡→磨浆→挤压熟化→老化→干燥;干法磨粉制备米线:磨粉→筛粉→调制水分→挤压熟化→老化→干燥^[10];半干法制备米线:浸泡→磨粉→筛粉→调制水分→挤压熟化→老化→干燥。

湿法制粉是最常用的一种制粉方法,它是将米浸泡在大量的水中,直到淀粉颗粒的结构变得松散,然后和水一起研磨,得到的浆液用筛网或放入一个容器里,用重物压制和离心等方法除去大部分的水分,然后再进行干燥过筛制成米线。在整个湿磨过程中使米粉与大量水接触,水可以有效减少摩擦热对米粉颗粒的破坏作用,以避免产生过多损伤淀粉,而损伤的淀粉分子链较短,无法有效地形成强大的交联网络,导致米线变得松散或易断^[11]。湿磨制备的大米淀粉颗粒具有高完整性、低损伤淀粉含量、高糊化温度、高吸收焓和凝胶强度值^[12]。然而,在湿磨过程中会产生大量的废水,对环境构成了巨大威胁。且在浸泡过程的大量水,促使微生物的生长和繁衍,极易出现腐败变质问题。

干法磨粉与湿法磨粉相比具有产废水量小、微生物污染少等优点,但干法磨粉通常为提升其细腻度而会进行超微粉碎^[13]、球磨法等,在此强烈的机械作用下会导致更多的淀粉颗粒损坏和机械能损失^[14]。此外,还会产生大量热

量,导致米粉部分糊化。米粉的化学成分、黏合性能、消化率和水合作用也会受到影响^[15]。HEO 等^[16]研究发现,与湿磨米粉相比,干磨米粉表现出高度的淀粉破坏。NGAMNIKOM 等^[17]研究了一种使用冷冻研磨工艺的新方法,其中包括在干磨之前用液氮冷冻大米。在极低的温度下,样品通常很脆,更易破碎,且冷冻研磨在筛分后产生的产量更高。因此,冷冻研磨工艺是传统湿法研磨工艺的可行替代方案。

半干法制粉通过对大米进行调质和润米的工艺,使其具有比干法更易破碎的特性,耗水量更少,成本也更低等优点^[18]。通过浸泡使物料胚乳部分硬度降低,满足制粉的工艺需求,同时改善其加工品质和食用品质。这主要是由于水分的加入使颗粒中蛋白质和淀粉在吸水膨胀后结构松散,相互作用减弱,因此降低研磨过程中受到的力,获得更小的粒度。LIU 等^[19]研究发现电解水处理的米线中观察到较高的峰值黏度和较低的熔融焓。有效氯质量浓度 20.32 mg/L 的微酸性电解水处理米粉中米粉的硬度、胶质和咀嚼性显著增加。有效氯质量浓度 10.09 mg/L 处理后,强酸性电解水处理面条的蒸煮损失显著降低。

1.3 水分调制

物料的水分含量是影响米线品质的一个重要因素。水是一种高效能的增塑剂及润滑剂,当含水量过低时,自由水分子不足以使氢键完全断裂,淀粉分子链的迁移受到抑制,米粉颗粒进行有限的吸水膨胀,糊化不足,物料流动性和黏结性较差,米线制品结构松散,蒸煮损失大^[20];物料含水量过高,有利于淀粉分子链迁移,但因淀粉颗粒与水分子迅速水合,淀粉分子交联缠绕和有序聚合的机率减少,糊化过度,物料黏度过大,导致加工难度增大。张康逸等^[21]研究发现,随着原料含水量增加,糊化度先升高后降低,色差降低,含水量为 40% 时品质最好。安红周等^[22]研究发现,当原料含水量为 30% 时,淀粉的断条率、蒸煮损失率和糊化度都有较大地提高。这是由于在此条件下,熔融态流体没有完全生成,挤出机内摩擦力和剪切力过大,使米线的内部凝胶网络被破坏,米线膨胀,表面不光滑。

1.4 挤压成型

螺杆挤压技术对物料适应性强,能使物料受热均匀,极大提升了传统米线加工中熟化成型工艺的自动化程度。因此挤压熟化技术在现代米线加工中被广泛应用^[23]。目前,挤压加工过程可被分为 4 个区域,如图 3 所示:进料区域、混合区域、熔融区域和成型区域。在双螺杆挤压中,第一阶段进料区域,是将过筛的米粉倒入进料口。第二阶段混合区域起到疏松原料的作用,并在通过螺杆不断的挤压和转动中快速向前传送。在挤出过程中,将低密度的分散粒子导入到挤出腔内,从而使材料的结构发生变化,从而使材料的黏度和温度发生转变。第三阶段熔融区域,随着

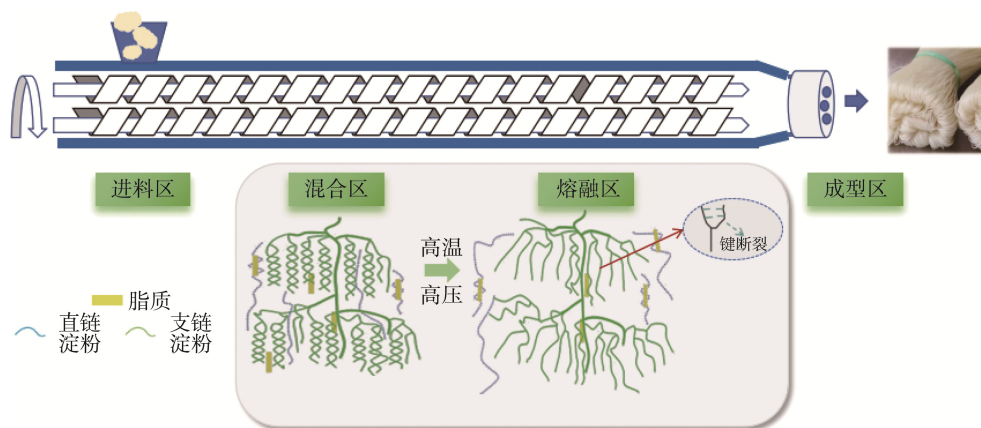


图3 挤压过程中淀粉的变化

Fig.3 Changes in starch during extrusion process

螺杆和挤压腔内的温度和压力的不断上升以及利用螺杆和机筒内壁对食品原料的空隙进行挤压和剪切,原料开始快速熔融至全部熔融;第四阶段成型区域,温度进一步的升高,压力进一步的增大,最终原料发生了包括原料淀粉的糊化、脂肪和其他蛋白质变性在内的生化反应,原料均匀地被挤压出模具口。其中,挤压温度、螺杆转速、喂料速度等操作参数决定质量温度、模头压力及单位机械能等系统参数,这些系统参数则直接影响挤压米线的理化性质、质构及风味,因此,工艺参数控制有利于获得预期的挤压产品。

1.4.1 挤压温度

挤出温度主要取决于机筒的温度与模具的温度。由于在经过螺杆过程中,机筒的表面会和物料发生摩擦,从而产生热量,所以产品的温度一般要比机筒的温度高^[24]。机筒温度影响蛋白质变性、淀粉糊化、脂肪挥发等进而影响米线的营养价值、质构特性、风味及色泽。温度过低,形成的凝胶网络结构耐热性差、易断条、糊化不完全、米线内芯较硬;温度过高时因淀粉链段充分伸展,支、直链淀粉充分分离,易结晶老化,蒸煮时易断裂。KASUNMALA等^[25]研究发现,在三区 75 °C 挤压的米线在蒸煮品质和质构分析方面均为最佳挤压温度。CHOKCHAITHANAWIWAT等^[26]研究中发现,三区温度在 90~100 °C 之间对挤出米线的特性影响显著,在 90 °C 下挤出的米线表面呈现出波浪形态,而在 110 °C 的温度下,米线表面由于高温而出现轻微的膨胀和多孔。

1.4.2 螺杆转速和喂料速度

螺杆转速是指物料绕着螺杆旋转的速度,与物料在机筒中的停留时间有关。转速越慢,物料停留的时间越长,容易引起原料中蛋白质变性、淀粉糊化以及各种营养成分损失,如维生素等。转速过快,物料停留的时间越短,物料没有完全熟化,断条现象比较严重。RATHOD等^[27]研究发现,当水分含量为 20%、模具温度为 95 °C、螺杆转速为 150 r/min 时,米线质量最好。WANG等^[28]研究发现,随着

螺杆转速的增加, b^* 、膨胀率、糊化淀粉百分比、抗性淀粉、蒸煮时间、硬度和表面黏性增加,而 a^* 和蒸煮重量减少。最佳工艺条件为机筒温度 95 °C,螺杆转速 150 r/min,含水率 35%。

喂料速度决定了螺杆前端混合区的填充度,对热传导率、物料受剪切程度、物料停留时间和单位机械能耗有较大影响。产品不同,一般所要求喂料速度不同。喂料速度要于螺杆转速相适应,否则会出现挤压堵塞,米线熟化过度或不足等现象。CHOKCHAITHANAWIWAT等^[26]螺杆转速 30 r/min,进料器转速 50 r/min,米线呈白色,保持形状良好。杨健等^[20]研究发现随喂料速率的提高,米线断条先降低后增加,但感官评定却与之相反,峰值均出现在喂料速度 0.5 kg/min 处。

1.5 老化

米线的老化是不可避免的,但可以通过控制米线的老化速率和老化程度来提高米线的品质。米线在老化的过程中,淀粉链之间发生了动态的排列重组,由无序结构逐渐转变为有序结构,从而影响米粉的质构、感官等品质。黄梅婷^[29]研究了低温高湿、室温高湿、室温风干 3 种不同老化方式处理对米线断条率的影响,发现米线断条率大小依次为室温风干 16%,室温高湿 13%,低温高湿 7%。原因是在室温条件下,由于温度和湿度不稳定,米线表面迅速变于变硬,内部网络结构没有足够的水分,未能形成完整的凝胶网络结构,米线干燥后表面结构不均匀,蒸煮时易断条。而低温高湿条件下,断条率达到最低。并随着老化时间的延长,米线的蒸煮损失率逐渐降低,这可能主要因为随着老化时间的延长,米线中淀粉有序排列成越来越紧密的凝胶网络结构,蒸煮米粉时,损失率降低至 10% 左右。但当老化时间超过 5 h 后,米线的蒸煮损失率降低趋势逐渐减缓,当超过一定的老化时间,直链淀粉对老化的影响不再明显。

1.6 干燥

在米线生产过程中, 干燥是提高米粉质量的一种重要方法, 也是一种常用的生产工艺。采用一种快速、高效的干燥方式, 可以在挤压成型后快速脱水和干燥, 避免老化, 从而保证米线质量和延长货架期。米线的传统干燥方法以自然通风和热风干燥为主, 但随着科学技术的进步, 微波干燥、真空冷冻干燥、联合干燥等新技术正逐步应用于米线的干燥领域。NGUYEN 等^[30]在微波真空干燥和微波连续干燥对于米线品质的影响的研究中发现, 微波真空干燥可以产生更大的孔隙率。米线在 30 W/g 下干燥, 蒸煮时间最短, 烹饪品质最好。真空干燥是一种将物料置于负压条件下, 并适当通过加热达到负压状态下的沸点或者通过降温使得物料凝固后来干燥物料的一种新型干燥技术, 它能很好地保留原料的原有色泽、香味, 且复水力强, 脱水完全, 适于长时间贮存和远距离运输^[31]。

2 原辅料对挤压型米线品质的影响

稻米的组分及其理化特性会对米线的糊化、老化、质地、口感等产生重要影响^[32]。已有研究发现, 米线中的直链淀粉含量是决定米线质量的关键, 而蛋白质和脂肪含量则是决定米线质量的重要因素。除此之外, 可以通过添加辅料(包括淀粉类、蛋白类、乳化剂类、食用胶类、酶类等)来改善由原料成分的缺陷导致的米线品质不良等问题。

2.1 淀粉

淀粉是大米的主要组成成分, 与其他淀粉基食品类似, 米线的黏弹性主要取决于淀粉的结构和性质。许多研究显示, 在原料米的选择上, 米线的加工原料应选择具有高直链淀粉含量的籼米。这是因为由直链淀粉所形成的网络结构具有良好的耐酸性、耐高温性, 从而保证米线的耐蒸煮性能^[33]。XUAN 等^[34]建议有必要选择直链淀粉含量在 20%~25%范围内的大米来进行米线生产。在生产过程中, 要结合米线制品的实际需要, 选用适当的淀粉用量。LU 等^[35]研究发现, 除了要考虑直链淀粉含量外, 支链淀粉部分的链长分布在决定大

米凝胶的动态黏弹性方面起着重要作用。据报道, 支链淀粉中的超长链是在粳稻淀粉凝胶中观察到的较慢回生的原因。

淀粉类食品在挤压后, 淀粉颗粒被破坏, 基本没有完整的粒子结构, 便于吸水, 使米线品质柔软, 消化性提高。直链淀粉从膨胀的淀粉颗粒中浸出后相互纠缠形成连续的糊状淀粉基质^[36], 具有合适的黏弹性, 直链淀粉与支链淀粉比例的变化也会影响米线的感官评价, 直链淀粉含量越高, 米线品质越好。因此, 可以通过添加外源淀粉, 提高原料直链淀粉含量、总淀粉含量等来改善米线品质的^[37]。由表 1 可知, 大多数外源淀粉的添加可以提高了米线的硬度、弹性或咀嚼性, 且提高了米线的蒸煮品质, 这是因为随着直链淀粉含量的增加, 米线的凝胶性增强, 蒸煮损失率降低。直链淀粉含量的增加能降低米粉的溶解度和溶胀力, 使其形成更致密凝胶网络结构, 从而赋予米线更优良的质构品质和蒸煮品质^[38]。

2.2 蛋白质

蛋白质也是大米重要的组成成分。BAXTER 等^[46]研究发现大米中多数蛋白与直链淀粉相互作用, 形成蛋白-直链淀粉复合物, 通过改变淀粉的糊化特性, 包括其耐热性、挤压性能和回生性能间接影响大米的加工品质。此外, 蛋白质也可增强米线凝胶网络结构, 使米线口感更筋道。

在挤压过程中, 蛋白质的分子链是沿着分子链展开的流动方向, 暴露原本封闭在分子内部的疏水性氨基酸。在融化区, 由于捏合元件的阻力和高温, 熔体的流速变得非常慢, 这将促进蛋白质-蛋白质的互作和蛋白质-水的互作, 最终关联或聚合蛋白质的黏度增加, 表现为黏度的增加。如表 2 所示, 大豆分离蛋白、玉米醇溶蛋白使其硬度、弹性、拉伸性提升, 大豆分离蛋白、玉米醇溶蛋白、蛋清蛋白、面筋蛋白蒸煮损失或断条率下降, 这类蛋白可以与淀粉很好地结合在一起, 形成更紧密的凝胶网络结构, 从而提高米粉的硬度、弹性、拉伸性和蒸煮品质^[47]。大豆 7S 蛋白使米线的硬度、咀嚼性及蒸煮品质均降低, 主要因其结合水的能力极强, 使淀粉水合不完全而导致糊化不彻底, 进而影响米线凝胶网络结构导致品质下降^[48]。

表 1 淀粉类辅料对挤压米线品质的影响
Table 1 Influences of starch excipients on the quality of extruded rice noodles

淀粉类	硬度	弹性	咀嚼性	拉伸性	蒸煮损失率	断条率	吸水率	感官评分	文献
绿豆淀粉	↑	↑	↑	-	↓	↓	-	↑	[12]
豌豆淀粉	↑	↑	↑	-	↓	-	-	-	[38]
马铃薯淀粉	↑	↑	↑	-	↓	↓	-	-	[39]
美人蕉淀粉	-	-	-	↑	↑	-	↑	-	[40]
扁豆淀粉	↓	-	-	-	-	-	-	-	[41]
芭蕉芋淀粉	↑	↑	↑	-	↓	↓	-	↑	[42]
大米淀粉	↑	-	↑	↑	-	-	-	-	[43]
木薯淀粉	↑	↑	-	-	-	↓	↑	-	[44]
羟丙基淀粉	↓	-	-	-	↓	↓	-	-	[45]

注: ↑代表淀粉类辅料对挤压米线相应品质有提高效果; ↓代表淀粉类辅料对挤压米线相应品质有降低效果; -代表文献中未报道相应效果。下同。

表 2 蛋白类辅料对挤压米线品质的影响
Table 2 Influences of protein excipients on the quality of extruded rice noodles

蛋白类	硬度	弹性	咀嚼性	拉伸性	蒸煮损失率	断条率	吸水率	感官评分	文献
大豆分离蛋白	↑	↑	↑	↑	↓	↓	-	-	[47]
大豆 7S 蛋白	↓	-	↓	-	↑	↑	-	-	[48]
玉米醇溶蛋白	↑	↑	-	↑	↓	-	↑	-	[49]
红扁豆蛋白	-	↑	-	-	↑	-	-	-	[50]
蛋清蛋白	-	-	-	↑	↓	-	↑	-	[51]
面筋蛋白	-	-	-	↑	↓	-	↑	-	[51]

2.3 脂类

大米中脂类含量较低(约 0.2%~2%), 因此在选择米制品的原料时通常会被忽略。研究表明, 天然淀粉中的直链淀粉-脂质复合物抑制其膨胀, 从而增加其糊化温度、峰值黏度、冷糊化黏度和分解黏度, 以及增加淀粉糊化所需的能^[52]。IBÁÑEZ 等^[53]研究发现, 与蛋白质相比, 脂质对糊化和流变特性的影响更大。通常, 脂类的存在会降低淀粉的糊化热焓, 促进凝胶体系的形成。脂质和淀粉形成的复合物阻止了直链淀粉结晶, 减少了淀粉的溶解, 保持了凝胶结构的稳定性, 从而抑制了老化的产生, 延长了产品的保质期。脂类也会影响米线的蒸煮品质, 随着其脂质含量的增加, 米线变得更容易蒸煮, 并且所需的蒸煮时间变得更短^[54]。

在米线加工过程中, 利用乳化剂的脂肪性质使它们在挤压过程中起润滑剂的作用, 减少喷嘴磨损模口堵塞, 从而使生产更容易^[55]。目前大部分的乳化剂均会降低米线的

硬度、韧性、咀嚼性及拉伸能力, 如表 3 所示, 这是由于乳化剂与直链淀粉形成的脂肪-淀粉复合物, 阻碍了米线的凝胶老化, 阻碍了米线的结构形成^[55]。没食子酸十二酯的添加使米线的硬度和咀嚼性提高, 这是因为没食子酸十二酯-淀粉络合物的形成和淀粉重排以及更多的分子有序结构增加了米线的刚性^[53]。

2.4 食用胶类

食用胶是一种常用于改善食品品质的增稠剂, 通过水化形成黏稠状大分子物质, 从而改变胶体的质构特性及机械性能。大多数食用胶类外源物质的加入能够提高米线的硬度、弹性、咀嚼性、拉伸性, 并改善米线的蒸煮品质, 如表 4 所示。这是因为食用胶能够固定聚合物链中的水分子, 并在淀粉基质中形成的具有紧密筛孔尺寸的水凝胶网络聚集结构有助于提高质构品质和蒸煮品质。因此它能够改善由直链淀粉含量低(小于 20%), 导致米线质地、蒸煮损失和其他感官特性等品质较差的问题。

表 3 乳化剂类辅料对挤压米线品质的影响
Table 3 Influences of emulsifier excipients on the quality of extruded rice noodles

乳化剂类	硬度	弹性	咀嚼性	拉伸性	蒸煮损失率	断条率	吸水率	感官评分	文献
单甘酯	↓	-	-	-	↓	-	↑	-	[51]
单硬脂酸甘油酯 + 商用乳化剂(KM3000)	↓	↓	↓	-	↓	↓	-	↑	[55]
没食子酸十二酯	↑	-	↑	-	-	-	-	-	[56]

表 4 食用胶类辅料对挤压米线品质的影响
Table 4 Influences of edible adhesive additives on the quality of extruded rice noodles

食用胶类	硬度	弹性	咀嚼性	拉伸性	蒸煮损失率	断条率	吸水率	感官评分	文献
瓜尔豆胶	↑	↑	↑	-	↓	↓	-	↑	[57]
羧甲基纤维素	↑	↑	↑	↑	↓	-	↑	↑	[57]
可得然胶	↑	↑	↑	-	↓	↓	-	-	[58]
刺槐豆胶	↓	↑	-	-	-	↓	-	-	[59]
阿拉伯胶	↓	-	-	-	↑	-	↑	-	[60]

2.5 酶 类

酶类辅料对挤压米线的质构和感官等品质有着重要的影响,且不同酶的种类对挤压米线品质的影响不同。 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、麦芽糖淀粉酶均能降低米线的硬度或咀嚼性,这是由于酶与淀粉发生了水解作用,降低了淀粉的凝胶结构,且具有很好的抗老化的效果^[61]。1,4- α -葡聚糖支链酶可以制备结构松散但强度性能高的米凝胶,解决米线质构品质与补水性能之间的矛盾^[62]。谷氨酰胺酶能够催化肽结合的谷氨酰残基和蛋白质中赖氨酸残基的 ϵ -氨基之间形成非二硫化物共价交联。因此,谷氨酰胺酶能来改善米线品质^[63]。普鲁兰酶添加量的增加会使断条率和吐浆值先减小后增大,当普鲁兰酶添加量为 0.03%时,断条率和吐浆值减小到最小值,且具有抗老化的效果,可能是由于普鲁兰酶能够切开支链淀粉分支点中的 α -1,6-糖苷键,将支链淀粉转变为直链淀粉,提高直链淀粉的含量,加强了方便米粉后期的老化,提高了抗性淀粉的含量^[64],如表 5 所示。

2.6 无机盐类

部分盐类在水溶液中通过电离生成的阴、阳离子与水分子相互作用影响淀粉-水分子的结合程度、淀粉分子间的静电斥力而引起淀粉糊化特性的改变,造成淀粉凝胶结构的致密程度发生改变,进而影响米线的食用品质。本文总结了一部分研究中无机盐类辅料对米线质构和感官品质的影响,如表 6 所示。碳酸钙、赖氨酸钙、磷酸三钙通过

降低体积密度和开孔百分比以及增加闭孔百分比来起成核剂的作用^[66]。NaCl 能够促进了蛋白质网络的展开,但减少了米线中淀粉颗粒的堆积。水迁移到含 NaCl 的米线中的速度较慢,因为含 NaCl 的米线的孔的数量、大小和深度由于蛋白质网络的形成而减少。因此,NaCl 增加了熟米线的延展性,降低了拉伸强度。蒸煮损失随着 NaCl 浓度的增加而增加^[67]。碳酸氢钠可以提高米线的硬度、咀嚼性和感官评分,是因为添加少量(0.02%~0.1%)的碳酸氢钠可以增强米线中淀粉-蛋白质之间的相互作用,使得淀粉-蛋白质之间形成有序稳定的网络结构。碳酸氢钠添加量为 0.1%时,米线的品质和感官评分最高^[68]。

2.7 其他类

除上述辅料的添加外,还有一些糖醇、多糖、其他原料粉、油酸等物质的添加也能一定程度的改善米线的质构品质、蒸煮品质、感官品质等。近年来,糖醇作为糖的替代品引起了广泛关注,并被证明是一类对淀粉基食品的结构和品质具有显著影响的化合物。赤藓糖醇显著降低了米粉的水接触角、结晶度、结晶层厚度和糊化焓,同时使米粉的网络结构松散^[70]。HUANG 等^[56]研究发现,添加 20% 赤藓糖醇,大大提高了干米粉的复水性和食用品质。YANG 等^[71]研究发现,在淀粉糊化过程中,可溶性大豆多糖的添加能在米粉表面形成水化层,增强了其保水能力,不仅抑制了淀粉回生,而且防止了米粉因失水而变得黏稠,从而显著降低了米粉的黏性,从而改善了整体质地。其他辅料对米线品质的影响如表 7。

表 5 酶类辅料对挤压米线品质的影响

Table 5 Influences of enzyme excipients on the quality of extruded rice noodles

酶类	硬度	弹性	咀嚼性	拉伸性	蒸煮损失率	断条率	吸水率	感官评分	文献
1,4- α -葡聚糖分支酶	-	↑	-	↑	-	-	↑	-	[62]
谷氨酰胺转氨酶	-	-	-	-	↓	↓	-	-	[63]
普鲁兰酶	-	-	-	-	-	↓	-	-	[64]
α -淀粉酶	↓	-	-	-	-	-	-	-	[65]
β -淀粉酶	↓	-	-	-	-	-	-	-	[65]

表 6 无机盐类辅料对米线品质的影响

Table 6 Influences of inorganic salt excipients on the quality of extruded rice noodles

无机盐类	硬度	弹性	咀嚼性	拉伸性	蒸煮损失率	断条率	吸水率	感官评分	文献
氯化钙	-	↑	-	-	-	↓	-	↑	[51]
氯化钾	-	↑	-	-	-	↓	-	↑	[51]
复合钙盐(碳酸钙+赖氨酸钙+磷酸三钙)	↓	-	-	-	↓	↓	-	↑	[66]
氯化钠	↓	↑	-	↓	↓	↓	↑	-	[67]
碳酸氢钠	↑	-	↑	-	-	-	-	↑	[68]
复合磷酸盐	-	-	↑	↑	↓	-	-	-	[69]

表 7 其他辅料对米线品质的影响
Table 7 Influences of other auxiliary materials on the quality of extruded rice noodles

其他类	硬度	弹性	咀嚼性	拉伸性	蒸煮 损失率	断条率	吸水率	感官 评分	文献
赤藓糖醇	↑	↑	↑	↑	↓	-	↑	-	[70]
可溶性大豆多糖	↑	-	-	-	↓	↓	-	-	[71]
葫芦巴多糖	-	-	-	-	-	-	↑	↑	[72]
海藻糖	↑	-	-	↑	↓	-	-	↑	[73]
香菇 β 葡聚糖	↑	-	-	↑	↓	-	↑	-	[74]
脱乙酰魔芋葡甘露聚糖	↓	-	-	-	-	↓	-	-	[75]
马郁兰叶粉	↓	-	-	-	-	-	↑	-	[76]
青稞粉	-	-	-	-	-	-	↑	-	[77]
预糊化米粉	-	-	-	-	↓	-	↑	-	[78]
发芽鹰嘴豆粉	-	-	-	-	↓	↓	-	↑	[79]
紫薯粉	-	-	-	-	↓	↓	-	↑	[80]
红茶粉	↑	↑	-	-	↓	↓	-	-	[81]
山药粉	↑	↑	↑	-	-	-	↓	↑	[82]
银杏粉	↓	↓	↓	-	↑	↑	-	-	[83]
油酸	↓	↓	↑	-	-	-	-	-	[84]

4 结束语

相较于传统工艺生产,挤压型米线生产具有营养成分损失少、微生物污染机会少、生产时间短、生产效率高和操作简便等优点。然而,使用螺杆挤压机制备的米线受原辅材料和挤压参数的影响较大。因此,本文阐述了双螺杆挤压型的原辅材料、挤压参数对挤压型米线品质的影响规律,并提供挤压型米线加工工艺及关键点的控制提供理论依据,以期获得品质优良的米线产品。

目前,对挤压型米线的研究大多集中在优化挤压参数和挤压工艺等方面。未来挤压米线的研究在以下几个方面有待拓展:(1)需借助传感器和数据分析系统,实时监控生产过程中的各项参数来加强挤压型米线的标准化生产及智能化控制,确保产品质量的稳定性和一致性。(2)长期以来,由于双螺杆挤压机存在着在成形过程中原料的成形状况难以准确把握,且成形机制不清,使得多变量之间的复杂相互作用,并做出正确设计和优化工业过程往往非常困难。而传统的停止采样法难以准确地反映出物料的实际状况。因此,需在复杂几何结构、反应动力学和进化流变行为中耦合流动仿真,以获得优良的米线产品。(3)开发针对不同特殊人群的功能性挤压米线,如青少年肥胖、糖尿病患者、慢性肾脏病患者、减肥人群等。这些研究将为挤压技术在米线中的应用提供更为可靠的理论基础,并促进米线在食品行业的发展。

参考文献

[1] AHMED I, QAZI I M, LI Z, *et al.* Rice noodles: Materials, processing and quality evaluation: Rice noodles: Materials, processing and quality

evaluation [J]. Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences: B. Life and Environmental Sciences, 2016, 53(3): 215–238.

- [2] TAN HZ, LI ZG, TAN B. Starch noodles: History, classification, materials, processing, structure, nutrition, quality evaluating and improving [J]. Food Research International, 2009, 42(5-6): 551–576.
- [3] OBADI M, XU B. Review on the physicochemical properties, modifications, and applications of starches and its common modified forms used in noodle products [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106286.
- [4] ZHANG Y, WANG Q, ZHANG Y, *et al.* Effects of moisture content on digestible fragments and molecular structures of high amylose jackfruit starch prepared by improved extrusion cooking technology [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 108023.
- [5] SEETAPAN N, LEELAWAT B, LIMPARYOON N, *et al.* Effect of different extrusion methods on physicochemical properties and qualities of noodles based on rice flour [J]. Food Science and Technology International, 2023, 29(3): 243–254.
- [6] 宋喜雅, 岳清华, 王瑞, 等. 米制粉方式及影响因素研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(5): 216–224.
SONG XY, YUE QH, WANG R, *et al.* Research progress on rice milling methods and influencing factors [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2024, 39(5): 216–224.
- [7] WU X, ZHOU Y, LU Q, *et al.* Ultrasonic-assisted immersion of parboiled treatment improves head rice yield and nutrition of black rice and provides a softer texture of cooked black rice [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 95: 106378.
- [8] LIU Y, LI M, JIANG D, *et al.* Superheated steam processing of cereals and cereal products: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(2): 1360–1386.
- [9] YONG-SHENG Z, YOU LI, HAI-YAN Z, *et al.* Effects of soaking and gelatinization process on the quality of semi-dry rice noodles [J]. Food and Machinery, 2023, 39(1): 204–209.
- [10] 陈洁, 李琳, 蔡永艳, 等. 磨粉工艺对大米粉品质特性影响[J]. 食品工

- 业, 2019, 40(1): 105–107.
- CHEN J, LI L, CAI YY, *et al.* Effect of milling process on the quality of rice flour [J]. *Food Industry*, 2019, 40(1): 105–107.
- [11] TIE XY, AN NN, LI D, *et al.* Recent advances in rice milling technology: Effect on nutrient, physical properties and digestibility [J]. *Food Reviews International*, 2024, 40(8): 2256–2282.
- [12] WU T, WANG L, LI Y, *et al.* Effect of milling methods on the properties of rice flour and gluten-free rice bread [J]. *LWT*, 2019, 108: 137–144.
- [13] 周维维, 刘帆, 谢曦, 等. 超微粉碎技术在农产品加工中的应用[J]. *农产品加工*, 2021(23): 67–71, 75.
- ZHOU WW, LIU F, XIE X, *et al.* Application of ultrafine grinding technology in agricultural products processing [J]. *Farm Products Processing*, 2021(23): 67–71, 75.
- [14] TIAN X, WANG Z, WANG X, *et al.* Mechanochemical effects on the structural properties of wheat starch during vibration ball milling of wheat endosperm [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 206: 306–312.
- [15] WANG Q, LI L, ZHENG X. A review of milling damaged starch: Generation, measurement, functionality and its effect on starch-based food systems [J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126267.
- [16] HEO S, LEE SM, SHIM JH, *et al.* Effect of dry-and wet-milled rice flours on the quality attributes of gluten-free dough and noodles [J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(1): 213–217.
- [17] NGAMNIKOM P, SONGSERMPONG S. The effects of freeze, dry, and wet grinding processes on rice flour properties and their energy consumption [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(4): 632–638.
- [18] 朱凤霞, 刘博, 张源泉, 等. 半干法制备米制品专用粉的工艺研究[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(10): 117–120.
- ZHU FX, LIU B, ZHANG YQ, *et al.* Research on the process of preparing rice products special powder by semi dry method [J]. *Food Science and Technology and Economy*, 2020, 45(10): 117–120.
- [19] LIU R, YU ZL, SUN YL, *et al.* Quality improvement effects of electrolyzed water on rice noodles prepared with semidry-milled rice flours [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2021, 30(6): 823–832.
- [20] 杨健, 白菊红, 张星灿, 等. 新型鲜湿方便米粉二级挤压工艺的研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(4): 134–141.
- YANG J, BAI JH, ZHANG XC, *et al.* Secondary extrusion process of new type fresh instant rice noodles [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2020, 35(4): 134–141.
- [21] 张康逸, 康志敏, 万景瑞, 等. 双螺杆挤压加工米粉的操作参数对产品理化品质的影响[J]. *农产品加工(学刊)*, 2013(1): 82–86.
- ZHANG KY, KANG ZM, WAN JR, *et al.* Effect of twin-screw extrusion operation parameters on physio-chemical quality in rice noodle production [J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2013(1): 82–86.
- [22] 安红周, 秦玉, 黄世豪, 等. 挤压制备方便米粉工艺优化的研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(8): 49–56.
- AN HZ, QIN Y, HUANG SH, *et al.* Influences of technological parameters of instant rice noodles prepared by extrusion [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2022, 37(8): 49–56.
- [23] 丁岚. 不同加工工艺对米线品质及消化性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- DING L. Effects of different processing techniques on the quality and digestibility of rice noodles [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [24] PANSAWAT N, JANGCHUD K, JANGCHUD D, *et al.* Effects of extrusion conditions on secondary extrusion variables and physical properties of fish, rice-based snacks [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 41(4): 632–641.
- [25] KASUNMALA IGG, NAVARATNE SB, WICKRAMASINGHE I. Effect of process modifications and binding materials on textural properties of rice noodles [J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2020, 21: 100217.
- [26] CHOKCHAITHANAWIWAT P, RUNGSARDTHONG V, THUMTHANARUK B, *et al.* Product development of dried noodle from wheat flour and riceberry rice flour by extrusion [C]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2019.
- [27] RATHOD RP, ANNAPURE US. Physicochemical properties, protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing [J]. *LWT*, 2017, 80: 121–130.
- [28] WANG N, MAXIMIUK L, TOEWS R. Pea starch noodles: Effect of processing variables on characteristics and optimization of twin-screw extrusion process [J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(3): 742–753.
- [29] 黄梅婷. 米粉老化工艺条件优化研究[J]. *福建农业科技*, 2019(1): 33–38.
- HUANG MT. Study on optimizing the aging conditions of rice noodle [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2019(1): 33–38.
- [30] NGUYEN TP, RATNANINGSIH R, SONGSERMPONG S. Characterization of instant mung bean vermicelli quality using microwave vacuum and microwave continuous drying [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(11): 7320–7329.
- [31] TULY SS, MAHIUDDIN M, KARIM A. Mathematical modeling of nutritional, color, texture, and microbial activity changes in fruit and vegetables during drying: A critical review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(13): 1877–1900.
- [32] 刘小青, 叶发银, 雷琳, 等. 大米的米线加工适性评价及改良方法研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(6): 307–315.
- LIU XQ, YE FY, LEI L, *et al.* Research progress on noodles processing adaptability of rice and its improving methods [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(6): 307–315.
- [33] JIANG H, MCCLEMENTS DJ, DAI L, *et al.* Effects of moisture content and retrogradation on structure and properties of indica rice flour and starch gels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109657.
- [34] XUAN Y, YI Y, LIANG H, *et al.* Amylose content and RVA profile characteristics of noodle rice under different conditions [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(1): 117–129.
- [35] LU ZH, SASAKI T, LI YY, *et al.* Effect of amylose content and rice type on dynamic viscoelasticity of a composite rice starch gel [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(7): 1712–1719.
- [36] ALAM MS, KAUR J, KHAIRA H, *et al.* Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review [J]. *Critical Reviews in food Science and Nutrition*, 2016, 56(3): 445–473.
- [37] 徐晓茹, 周坚, 吕庆云, 等. 挤压前、后大米淀粉理化性质的变化[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 187–194.
- XU XR, ZHOU J, LV QY, *et al.* Changes in the physicochemical properties of rice starch before and after extrusion [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(12): 187–194.
- [38] JIAO A, YANG Y, LI Y, *et al.* Structural properties of rice flour as affected by the addition of pea starch and its effects on textural properties of extruded rice noodles [J]. *International Journal of Food Properties*, 2020,

- 23(1): 809–819.
- [39] WANG L, GUO J, WANG R, *et al.* Studies on quality of potato flour blends with rice flour for making extruded noodles [J]. *Cereal Chemistry*, 2016, 93(6): 593–598.
- [40] WANDEE Y, UTTAPAP D, PUNCHA-ARNON S, *et al.* Quality assessment of noodles made from blends of rice flour and canna starch [J]. *Food Chemistry*, 2015, 179: 85–93.
- [41] WANG N, WARKENTIN TD, VANDENBERG B, *et al.* Physicochemical properties of starches from various pea and lentil varieties, and characteristics of their noodles prepared by high temperature extrusion [J]. *Food Research International*, 2014, 55: 119–127.
- [42] 孟亚萍, 吴凤凤, 徐学明. 芭蕉芋淀粉对米粉理化性质及粉丝品质的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(9): 33–38.
MENG YP, WU FF, XU XM. Effects of canna edulis ker starch on physicochemical properties of rice flour and quality of rice noodles [J]. *Food Science*, 2015, 36(9): 33–38.
- [43] HORMDOK R, NOOMHORM A. Hydrothermal treatments of rice starch for improvement of rice noodle quality [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 40(10): 1723–1731.
- [44] 吴依云, 刘容, 覃香妹, 等. 不同淀粉添加和老化时间对干米粉品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(9): 62–66, 133.
WU YY, LIU R, QIN XM, *et al.* Effects of starch addition and retrogradation time on the quality of dry rice noodles [J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(9): 62–66, 133.
- [45] 卢斌, 李才明, 顾正彪, 等. 羟丙基淀粉对鲜湿米粉贮藏品质的影响及其作用机理分析[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(2): 16–22.
LU B, LI CM, GU ZB, *et al.* Effect of hydroxypropyl starch on storage quality of fresh rice noodles and its mechanism analysis [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(2): 16–22.
- [46] BAXTER G, BLANCHARD C, ZHAO J. Effects of prolamin on the textural and pasting properties of rice flour and starch [J]. *Journal of Cereal Science*, 2004, 40(3): 205–211.
- [47] DETCHEWA P, THONGGAM M, JANE JL, *et al.* Preparation of gluten-free rice spaghetti with soy protein isolate using twin-screw extrusion [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 53: 3485–3494.
- [48] QIAO F, WANG L, GUAN C, *et al.* Effects of soybean 7S protein on the quality and digestibility of dry rice noodles under twin-screw extrusion process [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(1): 463–472.
- [49] ZHANG Y, XU M, ZHANG X, *et al.* Application of zein in gluten-free foods: A comprehensive review [J]. *Food Research International*, 2022, 160: 111722.
- [50] LIN Z, LIU L, QIN W, *et al.* Changes in the quality and in vitro digestibility of brown rice noodles with the addition of ultrasound-assisted enzyme-treated red lentil protein [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(2): 1150–1160.
- [51] 梁蕊, 叶发银, 陈嘉, 等. 米粉品质改良剂研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(7): 346–353.
LIANG R, YE FY, CHEN J, *et al.* Research progress on quality improver for rice noodles [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(7): 346–353.
- [52] MANINGAT CC, JULIANO BO. Starch lipids and their effect on rice starch properties [J]. *Starch-Stärke*, 1980, 32(3): 76–82.
- [53] IBÁÑEZ AM, WOOD DF, YOKOYAMA WH, *et al.* Viscoelastic properties of waxy and nonwaxy rice flours, their fat and protein-free starch, and the microstructure of their cooked kernels [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(16): 6761–6771.
- [54] YU X, CHU M, CHU C, *et al.* Wild rice (*Zizania* spp.): A review of its nutritional constituents, phytochemicals, antioxidant activities, and health-promoting effects [J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127293.
- [55] LAI HM. Effects of rice properties and emulsifiers on the quality of rice pasta [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, 82(2): 203–216.
- [56] HUANG S, CHI C, LI X, *et al.* Understanding the structure, digestibility, texture and flavor attributes of rice noodles complexation with xanthan and dodecyl gallate [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 127: 107538.
- [57] KRAITHONG S, RAWDKUEN S. Effects of food hydrocolloids on quality attributes of extruded red Jasmine rice noodle [J]. *PeerJ*, 2020, 8: e10235.
- [58] 李才明, 陈荻, 陆瑞琪, 等. 可得然胶对米粉加工及食用品质的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(16): 23–28.
LI CM, CHEN D, LU RQ, *et al.* Effect of curdlan on processing and eating quality of rice noodles [J]. *Food Science*, 2021, 42(16): 23–28.
- [59] 李静. 亲水胶体对鲜湿米线老化延缓及结构影响[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(6): 129–136.
LI J. Effect of hydrophilic colloid on aging retardation and structure of fresh wet rice noodles [J]. *China Food Additives*, 2022, 33(6): 129–136.
- [60] BAE IY, JUNG DS, LEE HG. Influence of Arabic gum on *in vitro* starch digestibility and noodle-making quality of Segoami [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 125: 668–673.
- [61] 王睿, 马晓军. 几种淀粉酶对即食米饭老化影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2007(4): 114–116.
WANG R, MA XJ. Influence of amylases on retrogradation of instant rice [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2007(4): 114–116.
- [62] ZHANG J, KONG H, LI C, *et al.* Highly branched starch accelerates the restoration of edible quality of dried rice noodles during rehydration [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 292: 119612.
- [63] LARROSA V, LORENZO G, ZARITZKY N, *et al.* Improvement of the texture and quality of cooked gluten-free pasta [J]. *LWT*, 2016, 70: 96–103.
- [64] 王志兴, 邢文君, 张森. 复合辅料对方便米粉品质特性的影响及降低 GI 值研究[J]. *食品科技*, 2022, 47(10): 183–190.
WANG ZX, YING WJ, ZHANG M. Effect of compound excipients on the quality characteristics of instant rice noodles and reducing GI [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(10): 183–190.
- [65] 王月慧, 丁文平. 品质改良剂对鲜湿米线储藏品质影响的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2005(2): 20–21.
WANG YH, DING WP. Effects of modifier on the storage properties of the instant wet rice noodles [J]. *Cereal & Feed Industry*, 2005(2): 20–21.
- [66] JANVE M, SINGHAL RS. Fortification of puffed rice extrudates and rice noodles with different calcium salts: Physicochemical properties and calcium bio accessibility [J]. *LWT*, 2018, 97: 67–75.
- [67] SANGPRINGY, FUKUOKA M, RATANASUMAWONG S. The effect of sodium chloride on microstructure, water migration, and texture of rice noodle [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 64(2): 1107–1113.
- [68] 肖文. 碳酸氢钠对发酵半干米粉品质特性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.

- XIAO W. Effect of sodium bicarbonate on the quality characteristics of fermented semi-dried rice noodles [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2024.
- [69] 陈洁, 张玮, 蔡永艳, 等. 米粉食用品质改良的研究[J]. 食品科技, 2018, 43(11): 178–184.
- CHEN J, ZHANG W, CAI YY, *et al.* Effect of food additives on quality of rice noodles [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(11): 178–184.
- [70] GAO L, XU Z, ZHANG R, *et al.* Effects of erythritol on rheological properties of rice flour and structural characteristics of extruded dried rice noodles with rapid rehydration behaviors [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109007.
- [71] YANG H, FU Y, ZHANG Y, *et al.* Evaluation of mannitol and xylitol on the quality of wheat flour and extruded flour products [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(8): 4119–4128.
- [72] SHIRANI G, GANESHARANEE R. Extruded products with Fenugreek (*Trigonella foenum-graecium*) chickpea and rice: Physical properties, sensory acceptability and glycemic index [J]. Journal of food engineering, 2009, 90(1): 44–52.
- [73] 胡云峰, 王晓彬, 魏增宇, 等. 海藻糖对米线品质改良技术研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(10): 132–139.
- HU YF, WANG XB, WEI ZY, *et al.* Study of trehalose on the quality improvement of rice noodle [J]. China Food Additives, 2018(10): 132–139.
- [74] HEO S, JEON S, LEE S. Utilization of *Lentinus edodes* mushroom β -glucan to enhance the functional properties of gluten-free rice noodles [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 55(2): 627–631.
- [75] 赵琦, 覃小丽, 王豪缘, 等. 脱乙酰魔芋葡甘露聚糖对挤压熟化米粉品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 190–197.
- ZHAO Q, QIN XL, WANG HY, *et al.* Effect of deacetylated konjac glucomannan on quality of extruded cooked rice noodles [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 190–197.
- [76] VISHWAKARMA S, MANDLIYA S, DALBHAGAT CG, *et al.* Effect of marjoram leaf powder addition on nutritional, rheological, textural, structural, and sensorial properties of extruded rice noodles [J]. Foods, 2023, 12(5): 1099.
- [77] 李丽梅, 宋继田, 李卢, 等. 青稞粉对鲜榨米粉团糊化和流变学特性的影响及其蒸煮品质分析[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(7): 70–75.
- LI LM, SONG JT, LI L, *et al.* Effect of highland barley powder on pasting and rheological properties of fresh extruded rice-shaped kernels (FER) dough and its analysis in cooking quality [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2024, 39(7): 70–75.
- [78] 缙帅龙, 任传顺, 舒星琦, 等. 挤压处理的预糊化米粉添加量对大米粉理化特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 29–36.
- GOU SL, REN CS, SHU XQ, *et al.* Effect of the additive amount of extruded pregelatinized rice flour on the physicochemical properties of rice flour [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 45(4): 29–36.
- [79] SOFI SA, SINGH J, MIR SA, *et al.* *In vitro* starch digestibility, cooking quality, rheology and sensory properties of gluten-free pregelatinized rice noodle enriched with germinated chickpea flour [J]. LWT, 2020, 133: 110090.
- [80] 梁璐, 隋勇, 梅新, 等. 紫薯粉对米粉食用品质和理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 254–260.
- LIANG L, SIU Y, MEI X, *et al.* Effect of purple sweet potato flour on edible quality and physicochemical characteristics of rice noodles [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 254–260.
- [81] 刘昭明, 高晓惠, 郭雪梅, 等. 红茶粉对鲜湿米粉品质的影响[J/OL]. 中国粮油学报, 1–10. [2024-11-29]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000819>
- LIU ZM, GAO XH, GUO XM, *et al.* Effect of black tea powder on the quality of fresh rice noodles [J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 1–10. [2024-11-29]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000819>
- [82] 张静瑶, 谭稳根, 范郁冰, 等. 基于传统健脾食疗名方的复合米粉研制及品质评价[J]. 食品与机械, 2020, 36(8): 166–170, 177.
- ZHANG JY, TAN WG, FAN YB, *et al.* Development and quality evaluation of compound rice noodles based on traditional recipe for strengthening spleen diet [J]. Food & Machinery, 2020, 36(8): 166–170, 177.
- [83] 高利, 于晨, 高成成, 等. 银杏-籼米粉特性及其挤压粉丝的品质研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(2): 1–7.
- GAO L, YU C, GAO CC, *et al.* Properties of rice-ginkgo blends and the quality properties of extruded rice noodles [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2019, 34(2): 1–7.
- [84] 莫斯敏, 孟陆丽, 程谦伟, 等. 油酸对米粉食味品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(2): 14–18, 31.
- MO SM, MENG LL, CHENG QW, *et al.* Effects of oleic acid on eating quality of rice noodles [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2022, 37(2): 14–18, 31.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)