

木薯/玉米复合淀粉的添加对鲜湿豆丝品质的影响

徐梦雪, 刘梦媛, 王月慧, 陈曦, 沈谦, 沈章妍, 陈磊, 丁文平
(武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430040)

摘要: 为了改善鲜湿豆丝在传统加工过程中存在的质地偏硬、蒸煮易断条、色泽偏暗等问题。本研究利用木薯/玉米复合淀粉对鲜湿豆丝的配方进行了优化。通过质构特性、色泽分析、快速黏度分析(RVA)、扫描电子显微镜(SEM)和感官评价等实验,研究了不同配比的木薯/玉米复合淀粉对鲜湿豆丝品质特性的影响,并确定了其最佳配比。结果显示,当玉米淀粉质量分数为30%时,豆丝的硬度提升至最佳口感,色泽亮度较空白组提高了1.7%,蒸煮损失率显著降低至10.2%。综合质构特性、色泽、糊化特性、微观结构和感官评价等指标分析,确定 m (玉米淀粉): m (木薯淀粉)的最佳添加比为3:7。

关键词: 鲜湿豆丝;复合淀粉;理化指标;配方优化;感官评价

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001295

中图分类号:TS213.2 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0044-11

网络首发时间:2025-12-31 14:32:41

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.2864.ts.20251231.1140.002

The impact of adding tapioca/corn composite starch on the quality of fresh wet dousi

Xu Mengxue, Liu Mengyuan, Wang Yuehui, Chen Xi, Shen Qian, Shen Zhangyan, Chen Lei, Ding Wenping
(School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430040)

Abstract: In this study, the formula of fresh wet Dousi preparing from tapioca/corn composite starch was optimized to address the issues of hardness, susceptibility to breaking during cooking, and dull color in traditionally processed fresh wet Dousi. The effects of different ratios of tapioca/corn composite starch on the quality characteristics of fresh wet Dousi were systematically investigated using texture profile analysis, color analysis, rapid visco analyzer (RVA) analysis, scanning electron microscopy (SEM) observation, and sensory evaluation. The results showed that the hardness of Dousi was enhanced to the optimal texture for taste, the color brightness was increased by 1.7% compared with the control group, and the cooking loss rate was significantly reduced to 10.2% when the mass fraction of corn starch was 30%. The optimal mass ratio of corn starch to tapioca starch added was determined to be 3:7 based on the comprehensive analysis of textural properties, color, pasting properties, microstructure, and sensory evaluation indices.

Key words: fresh wet Dousi; composite starch; physicochemical indices; formulation optimization; sensory evaluation

豆丝在食品分类中属于粮食加工半成品,主要原料为大米,及其他食品原辅料(如豆类、小麦粉),经浸泡后,混合磨浆、热烫成型制成^[1,2],是一种典型的淀粉凝胶食品。传统工艺制作的豆丝成型主要依赖大米淀粉及植物蛋白,存在蒸煮容易糊汤、切成

条后易断条等问题。

针对豆丝产品的品质改良研究已有报道。杨洁等^[3]研究在豆丝中添加改良剂大豆分离蛋白质量分数0.64%,单甘脂质量分数0.2%, β -环糊精质量分数0.8%,魔芋粉质量分数0.35%和多聚磷酸钠,

基金项目:“十四五”国家重点研发计划重点专项项目(2024YFF1106900)

收稿日期:2025-05-08

第一作者:徐梦雪,女,2000年出生,硕士,谷物资源利用,879039457@qq.com

通信作者:陈磊,男,1992年出生,讲师,粮食加工(食品碳水化合物),chenlei921@sina.com

能改善湿豆丝在储藏过程中出现的表面干硬,失水严重等现象,使其质构柔软,持水性增强和延长货架期,能有效抑制湿豆丝的回生;倪文霞等^[4]研究发现紫外杀菌及复合脱氧剂使鲜湿豆丝在37℃恒温环境中保藏3d后的菌落总数 $<10^5$ cfu/g,霉菌总数 <150 个/g,保持其可食用性,延长了鲜湿豆丝的保质期。已有研究主要通过加入食品添加剂以改善豆丝品质及贮藏特性,但添加剂可用种类在米制品中使用有限。因此,利用安全的食品配料(如食用淀粉、蛋白等)作为其品质改良剂,并探究、提升食用营养品质机制具有重要意义^[5]。

淀粉能够通过增加食品的黏稠度、稳定性和质地来提升口感和外观。例如木薯淀粉因含有高比例的支链淀粉,具有良好的吸水性和持水性,可有效改善食品的柔软度和弹性^[6,7];而玉米淀粉富含直链淀粉,能为食品提供良好的硬度和结构支撑,使产品更加耐煮、结构稳定^[8,9]。有研究报道,通过在淀粉基食品中引入单一外源或其复配淀粉对其品质改良有显著效果^[10,11]。Aleman等^[12]研究将高蛋白糙米(60 g/100 g)、木薯淀粉(30.71 g/100 g)和马铃薯淀粉(质量分数9.29%)进行组合,对制作的纸杯蛋糕的比容、颜色和质地产生显著影响,从而使产品具有更强的感官可接受性;Nindjin等^[13]研究表明山药淀粉质量分数30%、木薯淀粉质量分数20%与精制小麦粉混合制作复合面包的配比较好,如果添加山药淀粉质量分数超过30%,制成的面包的味道会影响产品的整体接受度。

通过添加木薯/玉米复合淀粉可以提升产品的糊化特性、流变性、耐煮性和口感。吴依云等^[14]研究发现添加质量分数20%玉米淀粉老化6h或者添加质量分数40%木薯淀粉老化6h制作出的干米粉品质较好;陈阳等^[15]研究改善了鲜湿鱼面口感不佳等问题,当玉米/木薯淀粉复合淀粉质量比为2:1,即木薯淀粉添加质量分数为20%时,鱼面的硬度降低了5.39%,咀嚼性提高了3.60%。本研究通过在豆丝中加入木薯淀粉、木薯/玉米复合淀粉及玉米淀粉,探究不同淀粉对鲜湿豆丝质构、感官及蒸煮特性的影响,以期提高其工业化生产的适用性。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

黄豆、绿豆和大米,购自武汉;玉米淀粉、木薯淀粉,购自石家庄。

1.2 主要仪器与设备

JM-L50立式胶体磨、MC-JCN30S电饼铛、真空冷冻干燥机、TMS-Pro物性分析仪、WSB-1白度测定仪、NMI20-040V-1低场核磁共振仪;Super-4型快速黏度分析仪;D8-Advance型XRD、MIRALMS扫描电子显微镜。

1.3 实验方法

1.3.1 鲜湿豆丝制作工艺

m (黄豆): m (绿豆): m (籼米)按1:3:10比例称取,分别用水浸泡,黄豆浸泡8h,籼米和绿豆均浸泡2h。将浸泡后的籼米、黄豆、绿豆沥干、混合,加入适量清水 m (干基): m (水)比为1.0:1.5后磨浆,浆液无大颗粒粗糙感时(胶体磨10min)即可结束磨浆。随后加入不同浓度梯度的食品改良剂,配制成豆丝浆料;在烫饼设备中倒入定量浆料,180℃烫制50s;将烫好的豆丝在室温下通风设备中放置(1h),随后切成条状装袋,初始以包装进行包装。

改良剂:在磨好的浆料中加入总添加量占豆丝干原料质量分数8%的复合淀粉,设置8个实验组,分别为空白组(CK)、纯木薯淀粉(TS)、纯玉米淀粉(CS-100%)、木薯/玉米复合淀粉以玉米淀粉的质量分数表达,分别为CS-20%、CS-30%、CS-50%、CS-70%、CS-80%,使其与豆丝浆料混合均匀。

表1为玉米淀粉和木薯淀粉的成分,玉米淀粉的总淀粉质量分数为96.23%,略低于木薯淀粉质量分数97.14%,表明木薯淀粉的淀粉纯度更高。木薯淀粉的蛋白质质量分数为0.50%,高于玉米淀粉的蛋白质质量分数0.18%,这可能使其在溶解性和凝胶强度方面更具优势。木薯淀粉干基水分更高,说明其吸湿性更强、更易受潮,对干燥和储存的条件要求更高;而玉米淀粉更稳定、更耐储。木薯淀粉的脂肪质量分数为0.11%,灰分质量分数为0.22%,均略高于玉米淀粉,这可能影响其加工性能和杂质含量。

表1 淀粉成分的质量分数

样品	w (总淀粉) /%	w (蛋白质) /%	w (干基 水分)/%	w (脂肪) /%	w (灰分) /%
玉米淀粉	96.23±0.23 ^a	0.18±0.01 ^a	12.7±0.02 ^a	0.09±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a
木薯淀粉	97.14±0.15 ^b	0.50±0.01 ^b	13.1±0.03 ^b	0.11±0.01 ^b	0.22±0.01 ^b

注:同列不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$),余同。

1.3.2 质构特性测定

采用质构仪分析鲜湿豆丝质构特性。对于鲜湿豆丝的TPA分析,参照Aleman等^[12]的方法略作修改,采用10mm的返回触发路径进行距离校准。鲜湿豆丝的TPA全质构测试:取60.0mm×13.0mm×

2.5 mm 规格的鲜湿豆丝于测试台上,使用 P/36R 探针(直径 36 mm 的圆柱形探针)进行测试。实验条件设定为:测前速度:2.0 mm/s;测试速度:0.8 mm/s;测后速度:0.8 mm/s;压缩比 50%;间隔时间:1 s;感应力:5.0 g(0.049 N)。重复测定 12 次,去掉差异较大的数据,保留 6 次平行数据,结果取平均值。

1.3.3 吸水率与蒸煮损失率测定

参考姜东辉^[16]的方法,并稍作修改。称取(20.0 ± 0.5) g 豆丝,质量记为 m_1 ,放入 500 mL 沸腾的蒸馏水中,煮至最佳烹煮时间后冷却,用滤纸吸干豆丝表面水分再称质量,记为 m_2 ,根据式(1)计算豆丝的吸水率(Y_1),每组样品重复测量 3 次,取平均值。

$$Y_1 = \frac{m_2 - m_1}{m_1 \times (1 - w)} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Y_1 为豆丝吸水率/%; m_1 为豆丝质量/g; m_2 为煮后沥干的豆丝质量/g; w 为煮前豆丝水质量分数/%。

参考司艺蕾^[17]的方法,并稍作修改。称取(20.0 ± 0.5) g 豆丝,质量记为 m_1 ,放入 500 mL 沸腾的蒸馏水中,煮至最佳烹煮时间后立即捞出,待面汤冷却至室温后转移至 500 mL 容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度并使面汤混合均匀。向铝罐(质量记为 m_2)中准确移取 100 mL 面汤,并置于 105 °C 烘箱中加热至恒重,质量记为 m_3 ,根据式(2)计算豆丝的蒸煮损失率(Y_2),每组样品重复测量 3 次,取平均值。

$$Y_2 = 5 \times \frac{m_2 - m_3}{m_1 \times (1 - w)} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Y_2 为蒸煮损失率/%; m_1 为豆丝质量/g; m_2 为铝罐质量/g; m_3 为铝罐质量和罐中固形物量的总和/g; w 为煮前豆丝水质量分数/%。

1.3.4 色泽的测定

蓝光白度作为白度评定指标,可应用于淀粉、小麦粉等食品领域。采用白度测定仪测定鲜湿豆丝的 R_{457} 白度,白度值记为 WB。WB 值越大,鲜湿豆丝越白。对白度仪进行校正后,即可测定鲜湿豆丝颜色。

使用色差仪测定室温下不同淀粉添加比例鱼面的 L^* 值(x)、 a^* 值(y)和 b^* 值(z),并根据下式(2)计算鱼面的白度^[18]。

$$\text{白度} = 100 - \sqrt{(100 - x^*)^2 + y^{*2} + z^{*2}} \quad (3)$$

式中: x^* 为样品的亮度; $-y^*$ 为样品偏绿; $+y^*$ 为样品偏红; $-z^*$ 为样品偏蓝; $+z^*$ 为样品偏黄。

1.3.5 微观结构的测定

采用扫描电镜分析了添加复合淀粉的鲜湿豆丝冻干的截面形状。将不同 TS/CS 添加量的鲜湿豆丝冷

冻干燥,观测其横截面微观结构。将干燥的鲜湿豆丝置于小托盘的导电胶上,然后置于离子喷射仪中进行表面喷金处理,测量在 5.0kV 的加速电压下进行^[19]。

1.3.6 结晶结构的测定

采用 X-射线衍射仪测定鲜湿豆丝晶体结构及淀粉结晶度的变化。分别将了不同添加比例 TS/CS 的鲜湿豆丝冷冻干燥,粉碎过 80 目筛后进行实验。采用 Cu-K α 靶进行实验,衍射角(2θ)在 5°~40°之间,扫描速率为 2(°)/min,步长为 0.02°。用 MDI Jade 6 软件计算鲜湿豆丝体系的结晶度。

1.3.7 糊化性质的测定

鲜湿豆丝的糊化性质通过快速粘度分析仪来测定,鲜湿豆丝糊化特性的测试方法参照文献方法进行修改^[20]。不同 TS/CS 添加量的鲜湿豆丝进行冷冻干燥,然后粉碎过 100 目筛,取 3 g 样品溶解于 25 mL 蒸馏水中,进行 RVA 测定。测定程序设置为:50 °C 下保持 2 min,以 12 °C/min 升至 95 °C,95 °C 平衡 2.5 min,再以 12 °C/min 降至 50 °C,在 50 °C 平衡 2 min。

1.3.8 水分迁移的测定

鲜湿豆丝的水分迁移和分布特性使用低场核磁共振分析仪测试。取 3 块 20.0 mm × 20.0 mm × 2.5 mm 规格的鲜湿豆丝样品,用保鲜膜将其包裹放入检测管内,置于核磁共振仪中检测。检测参数:采样点数 TD = 2 048,重复扫描次 NS = 8,弛豫衰减时间 TW = 1 500 ms。利用 CPMG 脉冲序列测定样品的横向弛豫时间(T_2)。

1.3.9 感官评价

感官评价由 10 名由经过培训的感官评价小组成员完成,评分标准包括色泽、弹性、口感和黏性等。每名评价人员依据表 2 的标准对不同组别豆丝进行综合评分。

表 2 鲜湿豆丝感官评价表

感官指标	评价及评分标准	评分/分
色泽(20分)	颜色较亮、有光泽	15~20
	色泽一般	10~14
	色泽较深、较暗	0~9
气味(20分)	豆香味浓郁	15~20
	有少量豆香味、无异味	10~14
	有异味	0~9
口感(40分)	咀嚼时爽口、不粘牙	15~20
	较爽口、稍粘牙	10~14
	明显粘牙	0~9
弹性(20分)	有咬劲,富有弹性	15~20
	咬劲及弹性较小	10~14
	咬劲差、弹性不足	0~9
蒸煮特性(20分)	基本不浑汤	15~20
	浑汤较重	10~14
	浑汤严重	0~9

1.3.10 数据处理

数据均采用 Excel 软件制表,采用 Origin 2018 软件进行图像绘制,采用 SPSS 软件进行数据分析,采用 Duncan 检验在 $P < 0.05$ 的水平下进行显著性分析,数据结果以平均值 \pm 标准差的形式表示。

2 结果与讨论

2.1 主要成分测定

表3显示,在固定复合淀粉总添加量下,不同木薯/玉米淀粉配比显著影响鲜湿豆丝的基本成分。玉米淀粉比例增加,总淀粉含量线性增长,CS-100%组较CK组提升52.9%,这源于玉米淀粉高结晶度和直链淀粉含量,使其在糊化时形成稳定凝胶网络,增强淀粉保留率。水分含量与玉米淀粉比例呈强负相关,CS-100%组较CK组降低17.0%,因玉米淀粉高膨胀势和刚性网络限制游离水迁移,当比例超50%时,水分降幅趋缓,表明淀粉网络吸水饱和^[18]。蛋白质含量呈“V”型变化,CS-30%组最低,CS-100%组反弹至17.16%,推测低比例时玉米淀粉物理吸附减少蛋白质溶出,高比例时强凝胶性促使蛋白质-淀粉复合物沉淀^[22]。脂肪含量变异系数仅4.4%,对脂质分布影响有限,但CS-80%组脂肪含量显著低于CK组,可能与玉米淀粉片层结构对脂肪微滴的包埋效应有关^[23]。灰分质量分数稳定在0.72%~0.77%,说明淀粉复配未显著改变原料矿

物质热稳定性^[24]。

2.2 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝质构特性的影响

由表4可知,不同复配比例的木薯/玉米淀粉对鲜湿豆丝的硬度、弹性和咀嚼性等质构特性产生了显著影响随着玉米淀粉比例的增加。CK组显示出中等水平的硬度和最高的内聚性,这可能是由于未添加额外淀粉的豆丝保持了较为均匀且稳定的结构^[25]。硬度随着玉米淀粉比例的增加呈现出先增加后减少的趋势。在较低比例的玉米淀粉(如CS-20%和CS-30%)时,硬度有所增加,由于玉米淀粉的加入使得豆丝的结构更加紧密,直链淀粉含量较高,在糊化中发生 β 化反应,形成了更加致密的凝胶结构,从而使豆丝硬度增加;当玉米淀粉比例进一步增加到CS-50%和CS-70%时,硬度又有所降低,这可能是由于过量的玉米淀粉可能导致豆丝的结构变得相对疏松,或者与木薯淀粉的比例失衡,从而降低了硬度,TS组的硬度显著增加至 (292.08 ± 11.35) N,这可能与木薯淀粉中高比例的支链淀粉有关,支链淀粉在凝胶化过程中形成的结构较为柔软但硬度较高^[26];内聚性在不同玉米淀粉比例下变化不大,但整体呈现一定的波动。TS-100%的内聚性最低,而CK和CS-30%的内聚性较高。内聚性在CS-30%和CS-70%时达到 0.61 ± 0.03 和 0.61 ± 0.03 ,显示出较好的结构稳定性,内聚性与淀粉分子间的相互

表3 不同木薯/玉米淀粉配比豆丝基本成分

样品名称	w(总淀粉)/%	w(蛋白质)/%	w(水)/%	w(脂肪)/%	w(灰分)/%
CK	19.02 \pm 0.48 ^a	16.63 \pm 0.12 ^b	62.00 \pm 0.22 ^a	1.58 \pm 0.02 ^a	0.77 \pm 0.01 ^a
TS	22.65 \pm 0.22 ^b	16.04 \pm 0.09 ^{cd}	59.08 \pm 0.01 ^b	1.47 \pm 0.02 ^{bc}	0.74 \pm 0.01 ^c
CS-20%	22.76 \pm 0.16 ^b	16.33 \pm 0.13 ^{bc}	58.74 \pm 0.02 ^c	1.45 \pm 0.02 ^d	0.72 \pm 0.01 ^e
CS-30%	23.55 \pm 0.19 ^c	16.05 \pm 0.04 ^{cd}	58.17 \pm 0.11 ^d	1.48 \pm 0.02 ^b	0.73 \pm 0.01 ^d
CS-50%	25.60 \pm 0.31 ^d	15.73 \pm 0.23 ^d	56.50 \pm 0.05 ^e	1.42 \pm 0.02 ^e	0.74 \pm 0.01 ^c
CS-70%	26.72 \pm 0.12 ^e	15.90 \pm 0.16 ^d	55.16 \pm 0.01 ^f	1.45 \pm 0.02 ^d	0.76 \pm 0.01 ^b
CS-80%	27.63 \pm 0.16 ^f	16.46 \pm 0.26 ^b	53.69 \pm 0.01 ^g	1.43 \pm 0.02 ^e	0.77 \pm 0.01 ^a
CS-100%	29.11 \pm 0.25 ^g	17.16 \pm 0.22 ^a	51.49 \pm 0.05 ^h	1.46 \pm 0.02 ^{cd}	0.77 \pm 0.01 ^a

表4 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝质构特性的影响

样品名称	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/mJ	咀嚼性/N	恢复性
CK	144.30 \pm 12.10 ^b	0.61 \pm 0.03 ^a	0.62 \pm 0.07 ^c	74.52 \pm 8.84 ^e	48.68 \pm 2.96 ^c	0.56 \pm 0.04 ^{ab}
TS-100%	292.08 \pm 11.35 ^a	0.46 \pm 0.03 ^b	0.96 \pm 0.07 ^{ab}	138.56 \pm 9.88 ^{bcd}	109.21 \pm 8.33 ^{cd}	0.38 \pm 0.03 ^{bc}
CS-20%	240.54 \pm 27.54 ^a	0.61 \pm 0.05 ^{ab}	0.79 \pm 0.05 ^{abc}	103.15 \pm 13.58 ^{abc}	97.39 \pm 7.20 ^{cd}	0.49 \pm 0.05 ^{ab}
CS-30%	190.26 \pm 26.37 ^b	0.61 \pm 0.03 ^b	0.76 \pm 0.05 ^{bc}	115.85 \pm 6.87 ^d	85.37 \pm 9.67 ^d	0.61 \pm 0.06 ^c
CS-50%	293.66 \pm 12.18 ^a	0.57 \pm 0.05 ^{ab}	0.93 \pm 0.02 ^{ab}	174.37 \pm 5.87 ^a	157.10 \pm 5.74 ^a	0.46 \pm 0.03 ^a
CS-70%	195.69 \pm 13.04 ^b	0.61 \pm 0.03 ^a	0.69 \pm 0.02 ^c	127.94 \pm 5.22 ^{cd}	89.76 \pm 2.87 ^{cd}	0.58 \pm 0.03 ^{abc}
CS-80%	263.88 \pm 16.74 ^a	0.61 \pm 0.04 ^a	0.81 \pm 0.02 ^{abc}	160.73 \pm 11.73 ^{abc}	118.76 \pm 6.54 ^{bc}	0.57 \pm 0.03 ^{ab}
CS-100%	287.20 \pm 8.04 ^a	0.53 \pm 0.06 ^{ab}	0.99 \pm 0.08 ^a	172.88 \pm 17.50 ^{ab}	142.68 \pm 16.25 ^{ab}	0.48 \pm 0.06 ^{ab}

作用密切相关。木薯淀粉和玉米淀粉的分子结构差异可能导致它们在样品中的分布和结合方式不同,从而影响内聚性;弹性随着玉米淀粉比例的增加呈现出先增加后减少的趋势,TS-100%和CS-50%的弹性较高,而CK的弹性较低。弹性在CS-100%时达到最高,为 (0.99 ± 0.08) mm,玉米淀粉的支链淀粉分子链相对较短且分支较多,这使得其在较低比例时能够提供良好的弹性。但当比例过高时,可能会导致分子链之间的相互干扰,降低弹性。胶黏性和咀嚼性随着玉米淀粉比例的增加呈现出先增加后减少的趋势,胶黏性与咀嚼性在CS-50%组达到峰值,较CK组分别提升134%和223%,表明该比例下淀粉网络兼具高硬度与强内聚性,形成理想的咀嚼特性。恢复性随着玉米淀粉比例的增加呈现出一定的波动。CK的恢复性最高,而TS-100%的恢复性最低,恢复性在CS-30%组显著升高至0.61,推测低比例玉米淀粉通过调控凝胶网络的可逆变形能力增强回弹性^[27],而高比例下黏度骤增可能抑制恢复性。

直链淀粉增强了淀粉体系的凝胶网络,提升了豆丝的硬度和稳定性,但过高比例会增加回生现象和咀嚼阻力;支链淀粉改善了豆丝的柔软性和流变特性,避免了高刚性问题,但单独使用会降低质构稳定性。复合淀粉CS-30%组和CS-50%组通过两种淀粉的协同作用,不仅改善了豆丝的加工特性,还优化了冷却后质构的柔软性和储存稳定性^[25]。

2.3 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝色泽的影响

由表5可知,玉米淀粉比例增加时,WB白度先

降后升再降。以CK为参照,计算其余样品与CK的 ΔE 之差。CK组白度最高,因无其他成分干扰;TS组白度受影响小,因木薯淀粉透明度高、吸光性低。玉米淀粉加入后白度降低,CS-100%组白度最低,因其颗粒大且不规则,散射光线降低白度^[28]。L*值先降后升,表明木薯淀粉增亮,玉米淀粉使颜色变暗;a*值先升后降,CK和TS组偏绿,玉米淀粉比例增加使a*值上升,CS-30%组最高;b*值先升后降,CK组偏蓝,玉米淀粉比例增加使b*值上升,CS-70%和CS-80%组最高,100%时略降但仍高于CK和TS。这些变化与淀粉颗粒特性、吸光性及水分分布有关,玉米淀粉高支链淀粉含量和大颗粒尺寸增加光线散射,降低亮度,增加红绿色度和黄蓝色度,而木薯淀粉低直链淀粉含量和小颗粒尺寸对光线散射作用小,色度变化小^[29]。

最佳复合淀粉比例为CS-20%到CS-50%,在此范围内,豆丝亮度和色调平衡良好,提升外观品质。最佳的复合淀粉比例范围为CS-20%到CS-50%,在这一范围内,豆丝的亮度和色调均保持良好平衡,有助于提高样品的整体外观品质。

2.4 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝糊化特性的影响

表6结果表明,不同复合淀粉比例显著影响豆丝的糊化行为和回生特性。糊化温度整体先增后减,CK组最低,因天然淀粉含量低、颗粒小且结构简单,水分子易渗透。玉米淀粉比例增加时,糊化温度上升,因其颗粒大、结构紧密,阻碍水分子渗透,延缓糊化过程。峰值黏度整体先减后增,CK组峰值黏度

表5 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝色泽的影响

样品名称	a* 值	b* 值	L* 值	WB/%	ΔE
CK	-0.93 ± 0.23^{ab}	14.43 ± 0.66^c	81.13 ± 0.82^a	76.21 ± 0.19^a	0.00
TS	-0.99 ± 0.34^{ab}	14.73 ± 0.74^c	79.42 ± 0.77^{bc}	74.65 ± 0.19^b	1.74
CS-20%	-0.89 ± 0.26^{ab}	14.82 ± 0.74^{ab}	79.39 ± 0.56^{cd}	74.60 ± 0.26^{bc}	1.78
CS-30%	-0.80 ± 0.17^{ab}	14.90 ± 0.82^{bc}	79.35 ± 0.42^{bcd}	74.52 ± 0.27^{bc}	1.84
CS-50%	-1.02 ± 0.23^b	14.88 ± 0.83^{bc}	78.60 ± 0.63^{cd}	73.96 ± 0.27^{bc}	2.57
CS-70%	-1.03 ± 0.27^b	16.23 ± 1.17^{ab}	79.93 ± 0.62^b	74.15 ± 0.53^b	2.15
CS-80%	-0.71 ± 0.29^{ab}	16.35 ± 1.02^{ab}	78.71 ± 0.56^{cd}	73.04 ± 0.42^{cd}	3.09
CS-100%	-0.57 ± 0.27^a	16.97 ± 1.60^a	78.42 ± 0.53^d	72.59 ± 0.11^d	3.64

表6 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝糊化特性的影响

样品名称	糊化温度/°C	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	最终黏度/cP	回生值/cP
CK	81.60 ± 2.56^a	1714.00 ± 157.27^a	1585.00 ± 151.79^a	2393.00 ± 153.83^a	734.00 ± 69.39^a
TS	90.20 ± 1.68^{bc}	1345.00 ± 57.81^{bc}	1319.33 ± 40.16^{ab}	1742.67 ± 84.03^{bc}	423.33 ± 47.38^b
CS-20%	88.40 ± 1.34^{ab}	1326.00 ± 32.23^{cd}	1173.00 ± 23.16^{ab}	1464.00 ± 35.67^{ab}	291.33 ± 9.67^{ab}
CS-30%	92.60 ± 1.62^{bc}	851.33 ± 9.13^d	849.00 ± 27.27^{ab}	1049.67 ± 8.00^d	185.33 ± 4.05^d
CS-50%	88.40 ± 3.20^{cd}	1324.67 ± 50.41^{bc}	1315.33 ± 63.77^{ab}	1609.33 ± 54.90^c	267.00 ± 11.46^{cd}
CS-70%	88.40 ± 1.66^d	1428.00 ± 66.34^{abc}	1352.67 ± 10.21^c	1702.00 ± 46.50^{bc}	349.33 ± 22.69^{bc}
CS-80%	88.45 ± 2.74^b	1575.67 ± 55.95^{ab}	1518.67 ± 76.26^a	1955.33 ± 103.75^b	436.67 ± 40.72^b
CS-100%	89.60 ± 1.88^{bc}	1362.33 ± 98.17^c	1343.33 ± 96.01^b	1657.00 ± 92.67^c	314.00 ± 29.29^{cd}

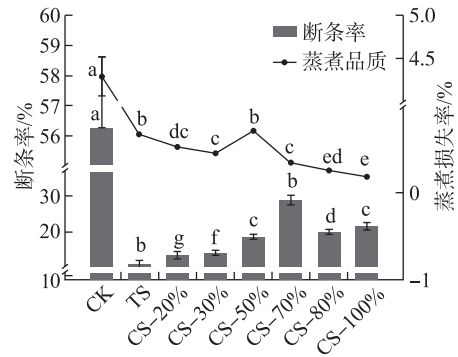
最高,因其蛋白质和天然淀粉形成的网络结构紧密。CS-100%和CS-80%组峰值黏度较高,因玉米淀粉中高直链淀粉含量增强了凝胶结构^[30]。而CS-30%组峰值黏度仅为851.33 cP,显著下降,因木薯淀粉高支链淀粉含量和松散结构减弱了淀粉颗粒的膨胀能力,降低了体系黏度^[31]。

谷值黏度和最终黏度方面,复合淀粉对豆丝质构有重要调节作用,整体先减后增。CS-100%至CS-70%组黏度较高,表明冷却后形成紧密凝胶网络。而CS-30%和CS-50%组黏度显著降低,因木薯淀粉比例增加,支链淀粉分散特性削弱了凝胶强度,特别是CS-30%组最终黏度仅为1 049.67 cP,显著低于CS-100%组和CK组,表明冷却后形成的凝胶结构更松散、柔软。CS-100%组回生值最高,表明玉米淀粉体系冷却后分子重结晶能力强,而木薯淀粉高支链结构抑制了回生^[32]。CS-30%组回生值为185.33 cP,显著降低,表明高比例木薯淀粉减少了淀粉分子的重结晶行为,形成更柔软、稳定的质构。

复合淀粉的合理配比通过调节直链淀粉和支链淀粉的比例,改善了豆丝的质构和储存稳定性。CS-100%组增强了糊化和凝胶形成能力,但回生现象较为显著,而高比例木薯淀粉,例如CS-30%组通过减少冷却后分子的重新排列抑制了回生。CS-30%组和CS-50%组的复合配比通过玉米淀粉和木薯淀粉的协同作用,在降低回生值、保持柔软性和提高质构稳定性方面表现最佳。

2.5 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝蒸煮品质的影响

由图1可见,CK组断条率近60%,蒸煮损失率4.29%,表明其结构脆弱,易断裂且溶解固形物多,品质差。玉米淀粉比例增加时,断条率先降后升,蒸煮损失率先升后降。TS组断条率降至11.1%,因木薯淀粉高支链淀粉含量形成致密胶凝结构,减少断裂和固形物溶出,显著改善蒸煮品质。CS-20%和CS-30%组断条率和蒸煮损失低,因木薯淀粉与玉米淀粉形成紧密胶凝网络,有效包裹成分,增强结构强度。CS-50%至CS-100%组断条率上升,因玉米淀粉比例增加使网络致密性降低,空隙增大,无法有效包裹固形物,导致断裂。CS-70%至CS-100%组蒸煮损失率降低,因玉米淀粉的直链与支链淀粉比例改善了持水能力^[30],直链淀粉与支链淀粉的比例,改善了豆丝的整体持水能力,从而降低了蒸煮损失率。



注:不同样本之间具有不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图1 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝蒸煮品质的影响

2.6 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝红外光谱的影响

傅里叶红外光谱对评价淀粉的短程有序性非常敏感^[33], $1\ 047\text{ cm}^{-1}$ 处的吸光度与淀粉的结晶区域及有序双螺旋结构有关, $1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 处的吸光度与淀粉的非结晶区域及无序双螺旋结构的变化有关。 995 cm^{-1} 处的吸光度可表示淀粉分子之间的氢键结构。因此,可采用 $1\ 047\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 与 $995\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 处的红外透光率比值表示淀粉样品的晶体结构和短程有序性^[34,35]。由图2和表7可知,不同的复合淀粉比例添加对豆丝内部组分分子间相互作用产生影响。FTIR分析显示,CK样品的 $1\ 047\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 比值为1.09, $995\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 比值为0.98,结晶度高且水合作用强,源于直链淀粉有序排列和天然豆类淀粉的亲水性。添加木薯淀粉后,TS组 $1\ 047\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 比值降至1.06, $995\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 比值升至1.06,结晶度略降但水合作用增强^[31]。玉米淀粉比例增加, $1\ 047\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 比值下降,结晶度减弱;CS-50%组比值进一步下降,可能是回生现象加剧;CS-100%组比值回升至 0.99 ± 0.01 ,结晶度未进一步增强^[32]。 $995\text{ cm}^{-1}/1\ 022\text{ cm}^{-1}$ 比值方面,CS-50%组(0.76 ± 0.02)最低,水合作用差;CS-30%(0.97 ± 0.01)、CS-70%(0.96 ± 0.01)和CS-100%(0.94 ± 0.03)组水合作用较强^[30]。在CK样品的红外光谱中, $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 处的氨基($-\text{NH}_2$)特征吸收峰显著存在,表明样品中含有氨基官能团。随着复合淀粉的添加,该峰逐渐减弱并趋于平稳。这一现象可归因于复合淀粉相容性的提升,淀粉的加入改善了体系内各组分之间的相容性,使得氨基与淀粉分子之间形成了较强的氢键相互作用。这种相互作用增强了体系的分子间作用力,导致氨基的特征吸收峰强度降低^[36]。

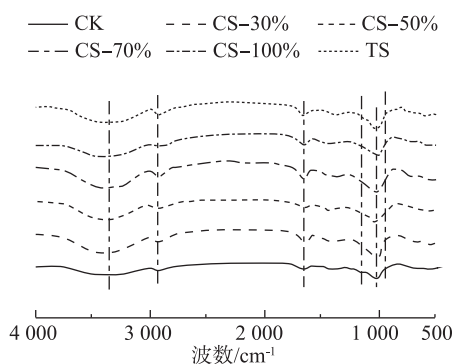


图2 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝红外光谱的影响

CS-30%的复合淀粉比例实现了直链淀粉与支链淀粉的平衡,氢键作用和分子结晶度达到了最佳状态,从而在质构上具备适当的弹性与柔韧性,同时确保分子网络的稳定性。已有研究报道,添加适量的淀粉能够优化食品基质的物理化学特性,平衡弹性和脆性^[37,38]。

表7 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝红外特征参数影响

样品名称	1 047 cm ⁻¹ /1 022 cm ⁻¹	995 cm ⁻¹ /1 022 cm ⁻¹
CK	1.09 ± 0.06 ^a	0.98 ± 0.03 ^b
TS	1.06 ± 0.01 ^{ab}	1.06 ± 0.02 ^a
CS-30%	0.96 ± 0.01 ^{bc}	0.97 ± 0.01 ^b
CS-50%	0.92 ± 0.03 ^c	0.76 ± 0.02 ^c
CS-70%	0.98 ± 0.01 ^{bc}	0.96 ± 0.01 ^b
CS-100%	0.99 ± 0.01 ^{abc}	0.94 ± 0.03 ^b

2.7 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝结晶状态的影响

图3表明,在17.38°和20.09°处有2个主要的尖峰,可能在样品制备的过程中淀粉没有完全糊化,保留了一部分的B型淀粉晶体结构^[39]。复合淀粉的加入没有在鲜湿豆丝的淀粉中产生新的衍射峰,表明复合淀粉对鲜湿豆丝的晶体结构特性没有影响。空白样品CK结晶度(RC)为14.39%,其结晶结构较为松散,晶体的有序性较差。TS组结晶度提升至18.01%,代表样品加入了木薯淀粉后在糊化过程中使样品的糊化程度降低,这与RVA结果相一致。

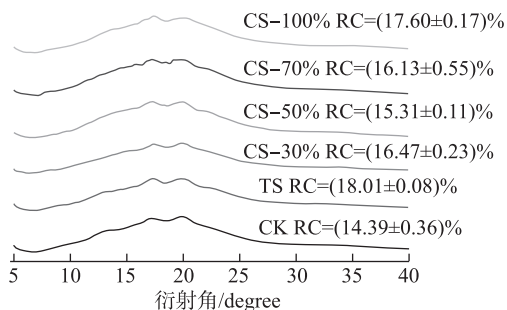


图3 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝结晶状态的影响

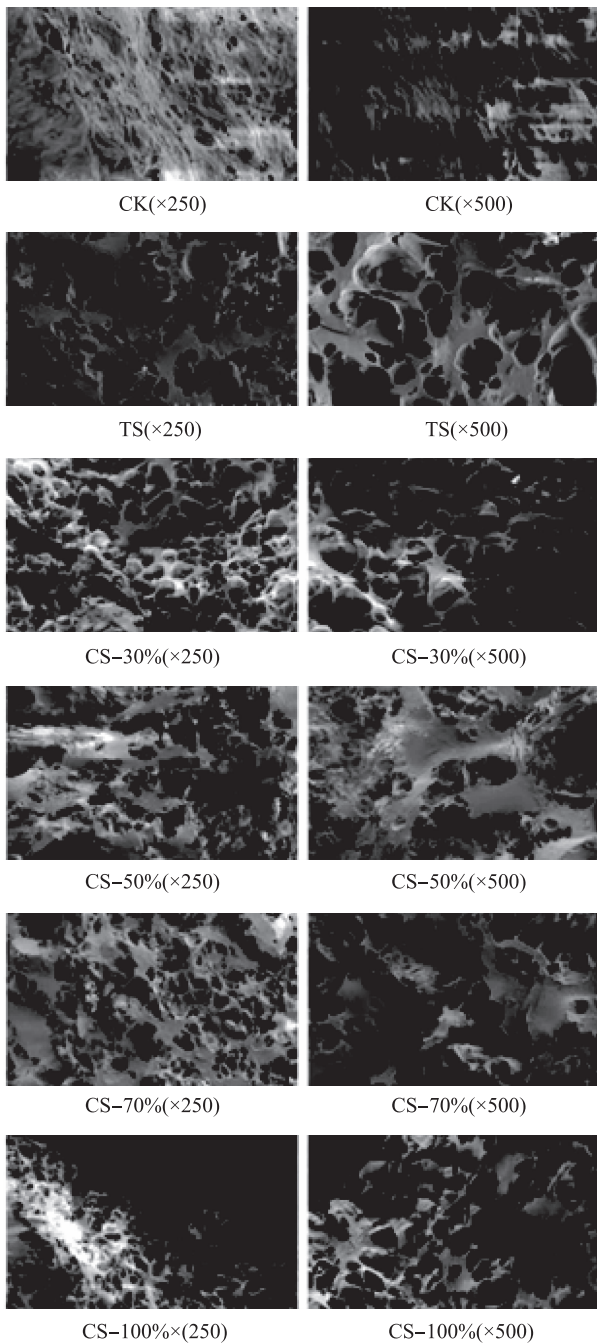
玉米淀粉比例增加时,结晶度先升后降再升,但整体比CK组更紧密。CS-30%结晶度高于CS-50%和CS-70%,达18.47%,因适量直链淀粉易形成规则晶区^[40]。玉米淀粉比例继续增加至CS-100%时,结晶度降至17.60%,因直链淀粉分子堆积增强,无定形区域增多,结晶度提升受限。CS-100%中,尽管体系由直链淀粉主导,但结晶度未达预期,可能因直链淀粉过度交联形成凝胶网络,部分区域保持无定形,或冷却时缺乏支链淀粉柔性结构,限制了晶区重排^[41]。

2.8 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝微观结构的影响

图4表明,添加不同淀粉后,豆丝冻干横截面微观结构显著变化。CK组结构平整紧致,孔洞少,因淀粉吸水膨胀、糊化充分。外源淀粉使豆丝呈多孔蜂窝结构,因外源淀粉与直链淀粉结合,改变氢键和空间结构,影响淀粉水相互作用,形成多孔结构,提升保水性^[42,43]。TS组添加木薯淀粉后,横截面孔隙多、孔径大且分布均匀,低倍下孔隙网络开放。木薯淀粉支链淀粉含量高,吸水膨胀时形成紧密网络,增强持水能力,其颗粒表面孔洞利于水分吸附保持,冻干后形成稳定多孔结构。高倍下孔隙壁薄,强度低。玉米淀粉添加样品中,不同浓度影响孔隙分布和致密程度。CS-30%组孔隙多、结构开放、孔壁厚,利于水分迁移和复水。CS-50%组孔隙均匀、孔壁厚、网络致密,结构和性能平衡佳,冻干豆丝品质好。CS-70%和CS-100%组孔隙少、趋于闭合,高浓度玉米淀粉过度交联,抑制孔隙形成,高倍下致密性高,影响复水,煮时易断条,与蒸煮结果一致。由此得出,CS-30%~CS-50%的配比在微观结构上表现最佳,适中的孔洞和孔壁厚度平衡了豆丝的韧性和硬度,适合提升产品质量。

2.9 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝水分分布的影响

由图5可见,CK组水分迁移峰面积小、峰值低且出现早,表明其水分流动性高但结合弱。TS组添加木薯淀粉后,水分迁移峰面积增大且峰值左移,表明水分结合增强、迁移变慢。玉米淀粉比例增加时,水分迁移曲线峰值上升、峰面积增大、峰值左移,表明水分结合能力增强,迁移速率降低,水分状态更稳定。CS-20%到CS-50%样品的水分迁移曲线更集中、峰值更高、峰面积更大,表明水分迁移受更强控制。CS-100%组中,尽管直链淀粉比例最高,水分迁移峰值却下降,峰面积较小,可能是直链淀粉含量



注: 不同样本之间具有不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝微观结构的影响
过高,水分自由度受限,迁移受阻,部分水分无法有效结合。相比之下,CS-20%到CS-50%范围内,木薯淀粉和玉米淀粉的互补作用有效优化了水分的动态平衡^[24]。

复合淀粉比例在CS-20%到CS-50%之间是改善豆丝品质的最佳范围。在这一比例范围内,通过木薯淀粉和玉米淀粉的协同作用,实现了自由水和结合水比例的动态优化,赋予豆丝更好的保水能力,从而提升了产品的综合品质。

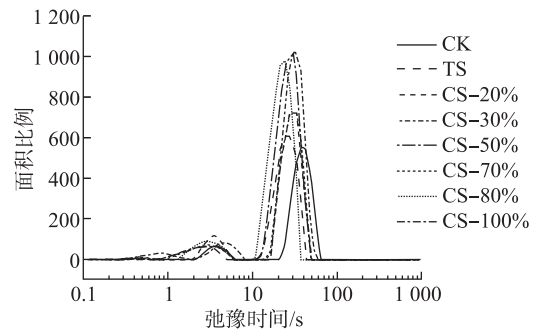


图 5 玉米/木薯复合淀粉添加对鲜湿豆丝水分分布的影响

2.10 感官评价

图 6 结果显示,复合淀粉比例为CS-30%的豆丝在多个感官品质评价指标上均表现优异。该配比的豆丝在色泽、弹性和黏度方面的得分较高,这表明其在视觉吸引力、韧性和质地方面具有显著优势。CS-30%配比的豆丝在浑汤指标上也表现良好,煮制后的汤色较为清澈,未出现明显的浑浊现象。汤色的清澈度不仅影响食物的整体外观,还可能间接反映食物的新鲜度和加工过程中的清洁度,进而影响消费者的食欲和食物的接受度。CS-30%配比的豆丝在色泽、弹性、黏度和浑汤等感官品质评价指标上均表现较好,这表明该配比能够在保持豆丝整体感官品质的同时,满足消费者对食物色泽、口感和外观的综合需求。

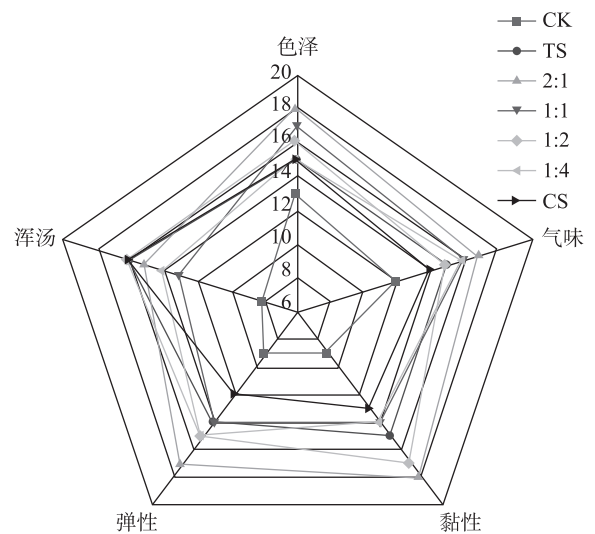


图 6 感官评价

3 结论

研究木薯/玉米复合淀粉对鲜湿豆丝品质的影响,通过对比不同配比的复合淀粉与空白组,明确了其在改善豆丝质地、色泽、糊化特性和微观结构方面

的显著作用。研究结果显示,当复合淀粉中木薯淀粉质量分数由0%增至30%时,豆丝的硬度提升至最佳口感;色泽方面,亮度相比空白组提高了1.7%;糊化特性分析显示,回生值相比空白组降低了74.7%。低场核磁共振实验表明,水分的自由度降低,微观结构更加均匀。蒸煮损失率显著降低至10.2%,表明豆丝的耐煮性和结构稳定性显著提升。结合感官评价结果,确定 m (木薯淀粉): m (玉米淀粉)的最佳添加比为3:7。在此配比下,豆丝的综合品质达到最佳,表现为良好的色泽、柔韧性和蒸煮特性,同时显著提升了口感和储存稳定性。

参考文献

- [1]徐平,王月慧,陈磊,等.可溶性大豆多糖对鲜湿豆丝货架期内贮藏品质的影响[J].食品科学,2023,44(17):144-152
Xu P, Wang Y, Chen L, et al. Effect of soluble soybean polysaccharide on storage quality of fresh wet bean thread during shelf life period[J]. Food Science, 2023, 44(17): 144-152
- [2]王荣,丁文平.方便豆丝加工工艺研究[J].食品工业科技,2010,31(6):188-191
Wang R, Ding W. Study on the processing technology of instant rice and bean noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(6):188-191
- [3]杨洁,朱晓玲,刘睿.不同添加剂对湿豆丝老化抑制效果的研究[J].中国粮油学报,2010,25(9):92-96
Yang J, Zhu X, Liu R. Inhibition effect of different additives on aging of wet bean thread[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(9):92-96
- [4]倪文霞,黄泽元,王尚玉,等.鲜湿豆丝保鲜研究[J].武汉工业学院学报,2011,30(2):11-15
Ni W, Huang Z, Wang S, et al. Research on preservation of the fresh bean silk[J]. Journal of Wuhan Polytechnic University, 2011, 30(2):11-15
- [5]蔡沙,蔡芳,施建斌,等.黄豆丝制作配方优化及其淀粉消化特性研究[J].食品研究与开发,2021,42(5):125-130
Cai S, Cai F, Shi J B, et al. Research on the formulation optimization of bean noodles and its starch digestibility[J]. Food Research and Development, 2021, 42(5):125-130
- [6]Chisenga S M, Workneh T S, Bultosa G, et al. Progress in research and applications of cassava flour and starch: a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(6):2799-2813
- [7]Tappiban P, Smith D R, Triwitayakorn K, et al. Recent understanding of starch biosynthesis in cassava for quality improvement: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 83:167-180
- [8]Li L, Chen J, Chen L. Effect of corn starch on gel properties of rice flour[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(4):7-11, 40
- [9]杨婉莹,王韧,冯伟,等.玉米淀粉对冷冻米线冻融品质的影响[J].食品与机械,2024,40(8):120-126
Yang W, Wang R, Feng W, et al. The effects of corn starch addition on the freeze-thaw qualities of frozen rice noodles[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8):120-126
- [10]Guo A L, Zhou X, Yao Y, et al. Physicochemical properties and starch quality of different corn varieties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(5):39-47
- [11]张欢欢,高飞虎,张玲,等.甘薯和木薯复配淀粉理化特性及粉条品质的比较研究[J].中国粮油学报,2024,39(7):94-101
Zhang H, Gao F, Zhang L, et al. Comparative study on physicochemical properties and vermicelli qualities of sweet potato and cassava compound starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(7):94-101
- [12]Aleman R S, Paz G, Morris A, et al. High protein brown rice flour, tapioca starch & potato starch in the development of gluten-free cupcakes[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 152:112326
- [13]Nindjin C, Amani G N, Sindic M. Effect of blend levels on composite wheat doughs performance made from yam and cassava native starches and bread quality[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(4):1637-1645
- [14]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
Wu Y, Liu R, Qin X, 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
- [15]陈阳,熊汉国.玉米/木薯复合淀粉的添加对鲜湿鱼面品质的影响研究[J].中国调味品,2022,47(10):1-6
Chen Y, Xiong H. Study on effect of addition of corn/cassava composite starch on the quality of fresh and wet fish noodles[J]. China Condiment, 2022, 47(10):1-6
- [16]姜东辉.生鲜湿面微生物控制及品质保持研究[D].无锡:江南大学,2019:12
Jiang D. Study on microbial control and quality maintenance of fresh wet noodles [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 12

- [17] 司艺蕾, 艾志录, 许梦言, 等. 占比90%紫薯全粉面条加工工艺优化[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(03): 160–166
Si Y, Ai Z, Xu M, et al. Optimization of processing technology for noodles with 90% purple sweet potato flour[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(03): 160–166
- [18] Kuo C, Shieh C J, Huang S, et al. The effect of extrusion puffing on the physicochemical properties of brown rice used for saccharification and Chinese rice wine fermentation[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 363–370
- [19] Low Y K, Effarizah M E, Cheng L H. Factors influencing rice noodles qualities [J]. Food Reviews International, 2020, 36(8): 781–794
- [20] Wang L, Zhang L, Wang H, et al. Insight into protein–starch ratio on the gelatinization and retrogradation characteristics of reconstituted rice flour[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 146: 524–529
- [21] 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]. Current Opinion in Food Science, 2021, 39: 103–109
- [22] Xu X, Cao Y, Zhang H, et al. Effects of cornstarch on the gel properties of black bean protein isolate[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(5): 548–555
- [23] Li Y, Zhu J, Liu C, et al. Effect of pre–treatments and frying conditions on the formation of starch–lipid complex in potato starch chips during deep–frying process[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131355
- [24] 张义平, 刘德阳, 池承灯, 等. 淀粉水热稳定性的影响因素及其调控研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 438–447
Zhang Y, Liu D, Chi C, et al. Progress in key factors and the modulation technology of starch hydrothermal stability [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 438–447
- [25] Ali shahzad S, Hussain S, Mohamed A A, et al. Effect of hydrocolloid gums on the pasting, thermal, rheological and textural properties of chickpea starch[J]. Foods, 2019, 8(12): 687
- [26] Zhu F, Hua Y, Li G. Physicochemical properties of potato, sweet potato and quinoa starch blends[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105278
- [27] Fonseca–Florido H A, Méndez–Montealvo G, Velázquez De La Cruz G, et al. Physicochemical characteristics of stored gels from starch blends[J]. LWT – Food Science and Technology, 2019, 114: 108408
- [28] Punia S, Siroha A K, Sandhu K S, et al. Rheological behavior of wheat starch and barley resistant starch (type IV) blends and their starch noodles making potential[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 595–604
- [29] 苏键, 李振玉. 几种不同来源淀粉的水合特性和糊化特性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(8): 43–46
Su J, Li Z. Study on hydration and gelatinization properties of starch from different sources[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(8): 43–46
- [30] Bemiller J N. Pasting, paste, and gel properties of starch–hydrocolloid combinations [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(2): 386–423
- [31] Pancha–Arnon S, Pathipanawat W, Puttanlek C, et al. Effects of relative granule size and gelatinization temperature on paste and gel properties of starch blends[J]. Food Research International, 2008, 41(5): 552–561
- [32] Zhao Y, Hu Y, Zhang L. Effect of corn starch on the texture and retrogradation of starch–based products[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105251
- [33] Sevenou O, Hill S E, Farhat I A, et al. Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2002, 31(1–3): 79–85
- [34] Zhang B, Li X, Liu J, et al. Supramolecular structure of A– and B–type granules of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 31(1): 68–73
- [35] Wang S, Zhang X, Wang S, et al. Changes of multi–scale structure during mimicked DSC heating reveal the nature of starch gelatinization[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 28271
- [36] Xu H, Zhang S, Yu W. Revealing the mechanism beneath the effects of starch–amino acids interactions on starch physicochemical properties by molecular dynamic simulations[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107359
- [37] Adal E, Aktar T, Keskin ÇAvdar H. Alteration of the morphological and physicochemical characteristics of corn and wheat starch via dry heating with whey protein isolates[J]. Foods, 2024, 13(22): 3701
- [38] Zhang J, Bian X, Liu T, et al. Mechanism of protein component addition on digestive properties of starch in fermented barley[J]. Journal of Cereal Science, 2025, 121: 104063
- [39] Cheetham N W H, Tao L. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules: an X–ray powder diffraction study [J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 36(4): 277–284
- [40] Utrilla–Coello R G, Hernández–Jaimes C, Carrillo–Navas H, et al. Acid hydrolysis of native corn starch: mor-

- phology, crystallinity, rheological and thermal properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 103:596 – 602
- [41] Zhang B, Li X, et al. Effect of starch crystallinity on pasting and thermal properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 89, 428 – 436
- [42] Chen L, Tian Y, Tong Q, et al. Effect of pullulan on the water distribution, microstructure and textural properties of rice starch gels during cold storage [J]. *Food Chemistry*, 2017, 214:702 – 709
- [43] Shi X, Bemilier J N. Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2002, 50(1):7 – 18.