

无明矾薯类鲜湿粉条的加工工艺优化及其理化特性

孙震曦^{1,2}, 木泰华¹, 马梦梅¹, 陈井旺¹

(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. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 为优化无明矾薯类鲜湿粉条的加工工艺, 以混合薯类淀粉(马铃薯淀粉:木薯淀粉=1:1, *m/m*)为原料, 以无明矾鲜湿粉条和 0.30%明矾鲜湿粉条作为对照, 探索了海藻酸钠添加量、成型时间、冷藏及冷冻时间等对无明矾薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量及整体可接受性的影响规律; 在此基础上, 对比了不同老化方式对无明矾薯类鲜湿粉条断条时间、表观及微观结构(扫描电镜、傅里叶红外光谱、小角 X 射线散射)的影响。结果表明: 添加 1%海藻酸钠后, 薯类鲜湿粉条的拉伸强度(2.86 g/mm²)、拉伸形变(63.88%)、剪切应力(39.89 g/mm²)、剪切形变(37.76%)、水分含量(60.40%)和整体可接受性与 0.30%明矾粉条最为接近, 说明 1%海藻酸钠可作为明矾替代物来加工无明矾薯类鲜湿粉条; 此外, 无明矾薯类鲜湿粉条的加工工艺条件为成型时间 1 min、4 °C 冷藏 24 h, 该条件下薯类鲜湿粉条的弹性和咀嚼性较好、断条时间显著延长、表观结构更为均匀。本研究结果可为无明矾薯类鲜湿粉条的产业化应用提供新的基础数据和理论依据。

关键词: 马铃薯淀粉; 木薯淀粉; 无明矾鲜湿粉条; 加工工艺; 理化特性

文章编号: 1673-9078(2020)12-153-160

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.12.0546

Processing Technology Optimization and Physicochemical Properties of

Alum-free Fresh Potato/Cassava Starch Noodles

SUN Zhen-xi^{1,2}, MU Tai-hua¹, MA Meng-mei¹, CHEN Jing-wang¹

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Science; Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Beijing 100193, China)

(2. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to optimize the processing technology of alum-free fresh potato/cassava starch noodles, the effects of addition ratio of sodium alginate, shaping time, refrigerated and frozen time, etc, on the texture properties, moisture content, and overall acceptability of alum-free fresh potato/cassava starch noodles were evaluated. In addition, effects of different retrogradation treatments on the breaking time, apparent and microstructure (scanning electron microscopy, Fourier infrared spectrum, small angle X-ray scattering) of alum-free fresh potato/cassava starch noodles were investigated, the mixture starches of potato and cassava (potato starch: cassava starch=1:1, *W/W*) was used as raw material, the fresh starch noodles without alum and with 0.30% alum were used as control. The results showed that the tensile strength (2.86 g/mm²), tensile deformation (63.88%), shear stress (39.89 g/mm²), shear deformation (37.76%), moisture content (60.40%), and overall acceptability of fresh potato/cassava starch noodles were the closest to those of fresh starch noodles with 0.30% alum after adding 1% sodium alginate, indicating 1% sodium alginate could be used as alum substitute for the production of fresh starch noodles. Furthermore, the optimal conditions for processing fresh potato/cassava starch noodles without alum were as follows: shaping time 1 min, cold storage at 4 °C for 24 h. The fresh potato/cassava starch noodles without alum obtained under this condition exhibited better elasticity and chew ability, longer breaking

引文格式:

孙震曦,木泰华,马梦梅,等.无明矾薯类鲜湿粉条的加工工艺优化及其理化特性[J].现代食品科技,2020,36(12):153-160

SUN Zhen-xi, MU Tai-hua, MA Meng-mei, et al. Processing technology optimization and physicochemical properties of alum-free fresh potato/cassava starch noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(12): 153-160

收稿日期: 2020-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0133600); 国家农业科技创新工程项目(CAAS-ASTIP-201X-IAPPST)

作者简介: 孙震曦(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 薯类加工与综合利用

通讯作者: 木泰华(1964-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品化学与营养; 马梦梅(1988-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品化学与营养

time and more uniform apparent structure. Therefore, the study can provide new basic data and theoretical support for the industry application of alum-free fresh wet potato starch noodles.

Key words: potato starch; cassava starch; alum-free fresh starch noodles; processing technology; physicochemical properties

我国是薯类生产大国,据FAO统计,2017年我国马铃薯、甘薯和木薯总产量约为2.10亿t,其中马铃薯0.99亿t、甘薯0.72亿t、木薯0.39亿t,均居世界首位^[1]。薯类作物具有适应性强、耐瘠薄、耐干旱、产量高、营养丰富等特点,对保障国家粮食安全、改善居民膳食营养、实现可持续发展具有重要作用^[2]。在我国,薯类主要用于加工淀粉及其制品,如粉条、粉丝、粉皮等。其中,粉条是深受我国乃至亚洲人民喜爱的传统薯类淀粉制品,具有口感润滑、食用方便等特点^[3]。按水分含量的不同,可将粉条进一步分为干粉条(水分含量<15%)和鲜湿粉条(水分含量>50%);其中,鲜湿粉条加工过程中不需要干燥,具有包装体积小、携带方便、无需浸泡、蒸煮时间短等优点,因此日益获得消费者的青睐^[4]。

纯马铃薯淀粉制作的粉条耐煮性好、不易断条^[5]。但由于马铃薯淀粉价格高,为降低生产成本,许多企业采用马铃薯淀粉和木薯淀粉混合粉(1:1, *m/m*)来生产粉条,并通过添加明矾来增加其耐煮性、降低断条率。然而,长期摄入明矾会影响肠道中矿物质元素的吸收,导致骨质疏松,同时影响神经系统的传导,从而引发中青年早衰、老年痴呆等症状^[6]。因此,亟需研发无明矾薯类粉条加工工艺,缓解铝过量摄入引起的健康问题,并促进薯类产业的可持续发展。

国内外的相关研究主要通过添加亲水胶体、蛋白质或盐类等来改善无明矾粉条的品质。例如,刘品华等^[7]研究表明向芋头淀粉中添加0.5%~1%的海藻酸钠可使芋头粉丝口感柔软、有弹性。吕振磊等^[8]研究表明卡拉胶可提高马铃薯淀粉的热稳定性和凝胶强度。Feng等^[9]研究显示添加蛋清蛋白可以显著提高无明矾甘薯湿粉条的质构和营养特性。刘兰霞等^[10]研究表明向马铃薯粉条中添加0.8%~1%食盐替代明矾,可使马铃薯粉条耐煮、口感劲道。课题组先前的研究也证实海藻酸钠可以改善无明矾甘薯鲜湿粉条的品质特性^[11]。此外,不同冷藏和冷冻时间对淀粉的老化也具有不同的影响,进而影响粉条的品质^[12,13]。但是,目前针对无明矾薯类粉条的研究主要集中在单一薯类淀粉或豆类淀粉与薯类淀粉复配粉方面,而关于马铃薯和木薯淀粉混合粉为原料加工无明矾鲜湿粉条的研究未见报道。

本文以马铃薯淀粉与木薯淀粉混合粉(1:1, *m/m*)为原料,探讨海藻酸钠添加量对无明矾薯类鲜湿粉条

质构特性的影响;在此基础上,研究煮制时间、冷藏时间、冷冻时间对薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量、断条时间、结构(扫描电镜、傅里叶红外光谱、小角X射线散射)等指标的影响规律,优化薯类鲜湿粉条的加工工艺,为无明矾薯类鲜湿粉条的产业化应用提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉(食品级)购自甘肃定西陇原宏淀粉制品有限公司,基本成分(以干基计)如下:淀粉94.26%、粗蛋白0.14%、粗脂肪1.10%、灰分0.30%;木薯淀粉(食品级)购自泰国PVD公司,基本成分(以干基计)如下:淀粉93.49%、粗蛋白0.22%、粗脂肪1.00%、灰分0.30%;海藻酸钠(食品级)购自河南中信化工股份有限公司,纯度为99%;食用明矾(食品级)购自河南中信化工股份有限公司,纯度为99%;其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

BCD-206TX型冰箱,中国青岛海尔公司;TA-XT2I型物性测试仪,英国Stable Micro System公司;电磁炉,中国广东美的公司;HZ57型手动压面机,河北华强公司;万能粉碎机,天津泰斯特仪器有限公司;SU8010型扫描电子显微镜,日本日立公司;Tensor 27型傅里叶红外光谱仪,德国布鲁克公司;Point 2.0型小角X散射仪,奥地利安东帕尔公司;MJ33型快速水分测定仪,瑞士梅特勒-托利多公司。

1.3 试验方法

1.3.1 粉条制备工艺流程

取10g马铃薯和木薯混合淀粉(马铃薯淀粉:木薯淀粉=1:1, *m/m*)于烧杯中,加入60g蒸馏水,混合均匀后置于沸水浴中加热,使其充分糊化成芡。再称取100g混合淀粉与芡粉以及占总淀粉不同比例(0.50%、1%、2%)的海藻酸钠混合,并揉制成均匀光滑的淀粉粉团。将揉制好的光滑粉团置于压面机中使粉条均匀漏至沸水锅内(压面机与锅的距离保持30cm)煮制1min,捞出置于冷水中冷却。之后,鲜湿粉条分别采用三种不同的老化方式进行处理:一是直

接装入包装袋作为未浸泡的鲜湿粉条样品；二是将鲜湿粉条放入蒸馏水(室温)中继续浸泡 40 min 后取出，此为浸泡 40 min 的鲜湿粉条样品；三是将鲜湿粉条装入包装袋内，4 ℃冷藏 24 h 后取出，得冷藏后鲜湿粉条样品。0.30%明矾粉条和无明矾粉条作为对照。

1.3.2 质构特性

(1) 拉伸参数: 参照谭洪卓等^[13]方法。用 TA-XT2I 型物性测试仪测定，条件为：探头间距离 10 cm，感应力 2 g，拉伸距离 120.00 mm；测试前、中后的速度分别为 2.0、0.8 和 2.0 mm/s。计算公式如下：

拉伸强度=最大拉力(g)/粉条横截面积(mm²)

拉伸形变=拉伸距离(mm)/粉条长度(mm)×100%

(2) 剪切参数: 参照谭洪卓等^[14]方法，感应力 20 g，测试形变 90%，测试速度 1.7 mm/s，测试前后速度均为 2.0 mm/s。计算公式如下：

剪切应力=最大剪切力(g)/粉条横截面积(mm²)

剪切形变=最大力所在距离(mm)/粉条直径(mm)×100%

1.3.3 断条时间的测定

随机抽取 20 根约 10 cm 长的粉条，在电磁炉中加入 1 L 饮用水，然后将粉条放入电磁炉中采用沸水浴加热，煮制时将电磁炉档位设置为 1300 W，保持微沸，观察并记录粉条的断条时间。断条时间越短，则耐煮性越差。

1.3.4 水分含量的测定

采用 MJ33 型快速水分测定仪测定（每组数据测定三次取平均值为最终结果）。

1.3.5 感官评价

采用九点嗜好法对不同工艺条件下制备的粉条进行感官评价。评价内容包括透明度、硬度、粘度、弹性、风味及整体可接受性。其中，1~2 分为非常不喜欢，3~4 分为一般不喜欢，5~7 分为轻微喜欢，8~9 分为非常喜欢。结果以整体可接受性表示。

1.3.6 扫描电子显微镜 (SEM)

采用 SU8010 型扫描电子显微镜观察粉条的显微结构。样品利用铜片进行粘合与固定，然后采用溅射镀膜法将其表面镀金，在加速电压 10 kV 下对其进行电镜扫描观察拍照，粉条横截面图片扫描倍数 50 倍。

1.3.7 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)

红外光谱由 Tensor 27 型傅里叶红外光谱仪测定。将鲜湿粉条冻干粉与 KBr (1:100, m/m) 充分混合，制成压片。红外光谱由 400~4000 cm⁻¹ 记录，经 64 次扫描，分辨率为 4 cm⁻¹，背景为 KBr。用 OMNics 8.0 自动基线校正 FT-IR 光谱，并对其进行处理，从 1200 cm⁻¹ 到 800 cm⁻¹，半峰宽为 28 cm⁻¹、增强系数为 2.2。

测定淀粉在 1047/1022 cm⁻¹ 处的吸光度比值，比较淀粉的短程有序结构。

1.3.8 小角 X 射线散射 (SAXS)

小角 X 射线散射在束线装置 SAXSpoint 2.0 上进行测定。将鲜湿粉条冻干粉置于离心管中，加入蒸馏水 (1:5, m/V)，经 12 h 平衡后进行 SAXS 测试。粉条样品被装入糊状样品槽，两个窗口都用 Kapton 胶带复盖。利用 SAXS 软件包分析，将得到的二维数据转换为一维数据。

1.3.9 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件进行数据分析。所有试验最少重复 3 次，试验数据用平均数±标准差 (Mean±SD) 表示。方差分析 (ANOVA) 用 Duncan 多重比较法进行显著性检验 ($p<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 海藻酸钠添加量对薯类鲜湿粉条质构特

性、水分含量及整体可接受性的影响

粉条的质构特性是反映粉条品质的关键指标。剪切应力可用于评价粉条的咀嚼性，剪切应力越高说明其咀嚼性越好^[14]。拉伸形变和拉伸强度可以表示粉条的弹性，拉伸形变和拉伸强度数值越大，说明粉条在外界作用力下越不易断裂，弹性越好^[15]。不同海藻酸钠添加量对薯类鲜湿粉条质构特性的影响结果见表 1。

由表 1 可知，无明矾粉条的拉伸强度、拉伸形变、剪切应力及剪切形变均最小，分别为 2.08 g/mm²、32.68%、16.83 g/mm² 和 28.56%，说明该粉条的弹性和咀嚼性最差。与无明矾粉条相比，添加不同比例海藻酸钠后，鲜湿粉条的拉伸强度、拉伸形变、剪切应力及剪切形变均有增强，说明添加海藻酸钠可显著地改善薯类鲜湿粉条的弹性和咀嚼性。随海藻酸钠添加量的逐渐增大，鲜湿粉条的拉伸强度及拉伸形变均逐渐增大，说明鲜湿粉条的弹性与海藻酸钠添加量呈正相关性；值得注意的是，当海藻酸钠添加量高于 1% 时，鲜湿粉条的剪切应力显著下降，由 48.81 g/mm² 降低至 19.75 g/mm²，说明鲜湿粉条的咀嚼性变差。当海藻酸钠添加量为 1% 时，鲜湿粉条的拉伸强度 (2.86 g/mm²)、拉伸形变 (63.88%)、剪切应力 (39.89 g/mm²) 和剪切形变 (37.76%) 与 0.30% 明矾粉条相当。刘品华等和张灿等^[7,16] 研究结果显示添加一定量的海藻酸钠可以提高芋头粉丝和鲜湿马铃薯粉条的弹性，Kaur 等^[17] 也发现添加瓜尔豆胶和黄原胶均可改善马铃薯、玉米和绿豆淀粉粉条的弹性。有研究显示海藻酸钠分

子中大量亲水性基团,如-COOH和-OH等,具有良好的生物相容性,溶于水后可增大淀粉凝胶体系的粘弹性;此外,海藻酸钠分子中的G链在加热过程中可与淀粉分子形成致密的“蛋盒”凝胶结构,进而提高粉条的拉伸特性和剪切特性^[16,18-20]。

此外,由表1可知,随海藻酸钠添加量的增大,鲜湿粉条的水分含量逐渐增加。这可能是由于海藻酸

钠的加入增大了胶体与淀粉之间的粘连性,导致淀粉充分吸水,使水分含量逐渐增大^[10,19]。当海藻酸钠添加量为1%时,薯类鲜湿粉条的水分含量与0.30%明矾粉条最为接近。感官评价的结果显示,0.30%明矾粉条和添加1%海藻酸钠制备的无明矾粉条的整体可接受性最高。综合考虑薯类鲜湿粉条的质构特性、水分含量及感官评价结果,1%海藻酸钠可作为明矾替代物。

表1 不同海藻酸钠添加量对薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量及整体可接受性的影响

Table 1 Effects of different sodium alginate content on texture properties, moisture content, and overall acceptability of fresh potato/cassava starch noodles

样品	拉伸强度/(g/mm ²)	拉伸形变/%	剪切应力/(g/mm ²)	剪切形变/%	水分含量/%	整体可接受性
无明矾粉条	2.08±0.18 ^a	32.68±8.52 ^a	16.83±3.58 ^a	28.56±2.34 ^a	58.60±0.04 ^b	6.05±0.12 ^a
0.3%明矾粉条	2.56±0.27 ^a	69.78±7.49 ^c	48.92±3.43 ^{bc}	34.93±2.76 ^b	60.30±0.05 ^c	8.01±0.45 ^{de}
0.5%海藻酸钠粉条	2.52±0.18 ^a	58.13±5.28 ^b	48.81±2.93 ^{bc}	35.36±1.72 ^b	56.20±0.07 ^a	7.55±0.02 ^c
1%海藻酸钠粉条	2.86±0.36 ^{abc}	63.88±5.21 ^{bc}	39.89±2.30 ^c	37.76±1.33 ^b	60.40±0.15 ^c	7.93±0.12 ^d
2%海藻酸钠粉条	3.20±0.21 ^{bc}	80.93±4.88 ^d	19.75±3.44 ^a	42.30±0.75 ^{bc}	61.50±0.16 ^d	7.02±0.29 ^b

注:小写字母表示同一列的显著差异性($p < 0.05$)。表2、3、6同。

表2 不同成型时间对薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量及整体可接受性的影响

Table 2 Effects of shaping time on texture properties, moisture content, and overall acceptability of fresh potato/cassava starch noodles

成型时间	拉伸强度/(g/mm ²)	拉伸形变/%	剪切应力/(g/mm ²)	剪切形变/%	水分含量/%	整体可接受性
1 min	3.29±0.22 ^d	63.57±4.56 ^a	64.69±2.83 ^c	44.91±1.76 ^c	56.67±0.12 ^a	7.64±0.12 ^d
2 min	2.88±0.36 ^c	63.98±4.51 ^a	59.98±2.31 ^d	45.33±1.74 ^d	57.81±0.09 ^b	7.32±0.45 ^d
3 min	2.79±0.18 ^b	58.10±5.69 ^a	38.06±2.51 ^c	40.59±2.88 ^b	59.76±0.13 ^c	6.65±0.23 ^{bc}
4 min	2.58±0.26 ^{ab}	58.59±4.65 ^a	32.27±1.97 ^b	37.98±1.15 ^a	60.56±0.17 ^d	6.55±0.12 ^b
5 min	2.48±0.19 ^a	61.24±5.37 ^a	31.38±1.68 ^a	42.59±2.27 ^c	61.98±0.15 ^e	6.02±0.22 ^a

2.2 成型时间对薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量及整体可接受性的影响

成型时间不仅影响鲜湿粉条的熟化程度,而且对鲜湿粉条的质构特性也有一定的影响,从而影响鲜湿粉条的整体可接受性^[21,22]。由表2可知,随成型时间的增加,鲜湿粉条的拉伸强度与剪切应力均逐渐减小,说明鲜湿粉条的弹性和咀嚼性逐渐变差,出现软烂现象,这可能是由于成型过程中淀粉与胶体逐渐吸水所致^[10]。感官评价的结果也显示,当成型时间为1~2 min时,鲜湿粉条的整体可接受性最高;当成型时间逐渐延长,鲜湿粉条的整体可接受性逐渐降低。综合考虑粉条的弹性、咀嚼性以及成型过程中的能耗,确定1 min为最佳成型时间。曾洁等^[22]研究显示,当成型时间低于1 min时,马铃薯鲜湿粉条的糊汤率高,有夹生现象;而成型时间高于1 min时,马铃薯鲜湿粉条也开始出现软烂现象;这与本研究的结果一致。

2.3 冷藏及冷冻时间对薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量及整体可接受性的影响

在粉条加工过程中通常会采用冷藏或冷冻的方式使淀粉发生老化,不仅可使粉条富有弹性,增加筋道感;而且可降低粉条的粘性^[22]。但是,过度老化会造成粉条过硬,影响食用品质。因此,适宜的老化温度及时间是制备高品质粉条的关键指标。不同冷藏及冷冻时间对无明矾薯类鲜湿粉条质构特性及水分含量的影响结果见表3。由上述数据可知,随冷藏时间的增加,粉条的拉伸强度、拉伸形变先减小后增大,在冷藏24 h时拉伸强度及拉伸形变出现最大值,分别为2.15 g/mm²和59.50%,说明冷藏24 h时鲜湿粉条的弹性最好。此外,鲜湿粉条的剪切应力先增大后减小,而剪切形变一直减小,说明鲜湿粉条的咀嚼性逐渐变差,这可能是由于在测试中鲜湿粉条经过二次烹煮导致。综合考虑鲜湿粉条的弹性和咀嚼性,确定最佳冷

藏时间为 24 h。赵萌等^[12]的研究结果也显示,甘薯、绿豆淀粉混合粉条的拉伸强度和剪切应力随冷藏时间的延长呈增大趋势。进一步地,对比冷藏和冷冻条件,相同时间下,冷冻处理后鲜湿粉条的拉伸强度和剪切形变小于冷藏处理的粉条,说明冷藏处理优于冷冻处理,即 4℃冷藏 24 h 为最佳处理条件。这可能是因为在低温冷冻下有冰晶生成,破坏了粉条的内部结构,使粉条的凝胶强度降低^[12]。此外,从表 3 还可看出,当 4℃冷藏 24 h 时,鲜湿粉条的整体可接受性最高,其他冷藏及冷冻条件对鲜湿粉条的整体可接受性影响较小。由上述研究可得,在海藻酸钠添加量为 1%、定型时间为 1 min、4℃冷藏 24 h 条件下所得无明矾薯

类鲜湿粉条的质构特性最佳、整体可接受性最高。

市场调研发现,许多生产企业通过浸泡 40 min 的方式来代替冷藏对粉条进行老化处理,从而提高鲜湿粉条的品质。然而,目前针对浸泡处理对混合淀粉制备鲜湿粉条品质的影响研究较少,且浸泡与冷藏处理对鲜湿粉条品质特性影响的作用机制尚未解明。因此,本研究分别采用不同老化方式(未浸泡、浸泡 40 min、4℃冷藏 24 h)制备无明矾鲜湿粉条、0.30%明矾粉条、1%海藻酸钠粉条,通过对其表观、微观结构、官能团及断条时间进行系统对比分析,明确不同老化方式对无明矾薯类鲜湿粉条品质特性的影响机制,进一步确定制备无明矾薯类鲜湿粉条的最佳工艺条件。

表 3 不同冷藏及冷冻时间对薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量及整体可接受性的影响

Table 3 Effects of different refrigerating and freezing time on texture properties, moisture content, and overall acceptability of fresh potato/cassava starch noodles

冷藏及冷冻时间	拉伸强度/(g/mm ²)	拉伸形变/%	剪切应力/(g/mm ²)	剪切形变/%	水分含量/%	整体可接受性
4℃冷藏 3 h	1.95±0.18 ^{bc}	57.62±6.82 ^c	10.70±1.28 ^a	38.47±3.22 ^f	69.30±0.08 ^a	7.05±0.39 ^{ab}
4℃冷藏 6 h	1.70±0.40 ^b	47.93±6.04 ^b	16.15±1.90 ^e	36.34±1.58 ^{cd}	70.60±0.12 ^a	7.27±0.26 ^{ab}
4℃冷藏 12 h	1.77±0.22 ^b	41.70±7.62 ^{ab}	12.37±0.95 ^{bc}	36.09±1.92 ^b	72.20±0.07 ^b	7.26±0.45 ^{ab}
4℃冷藏 24 h	2.15±0.25 ^c	59.50±6.79 ^c	12.13±1.72 ^{ab}	34.83±1.63 ^c	73.30±0.12 ^c	7.87±0.12 ^d
-40℃冷冻 3 h	1.90±0.26 ^{bc}	61.12±6.29 ^c	14.10±1.64 ^{abc}	38.40±1.9 ^e	72.10±0.06 ^b	7.56±0.23 ^c
-40℃冷冻 6 h	1.47±0.15 ^a	42.65±4.99 ^b	20.10±1.80 ^f	34.25±1.52 ^{cd}	72.50±0.04 ^c	7.12±0.12 ^{ab}
-40℃冷冻 12 h	1.88±0.20 ^b	38.07±4.52 ^a	14.15±1.73 ^{ab}	32.28±2.10 ^a	73.30±0.02 ^c	6.85±0.53 ^a
-40℃冷冻 24 h	1.79±0.30 ^b	53.10±5.04 ^b	15.42±2.14 ^{de}	34.85±2.46 ^d	73.60±0.06 ^d	6.83±0.41 ^a

2.4 不同老化方式对薯类鲜湿粉条官能团的影响

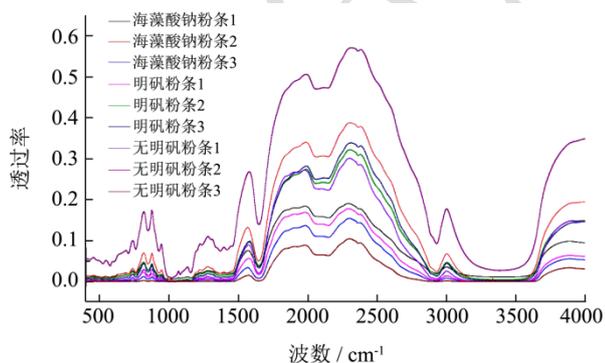


图 1 不同老化方式鲜湿粉条的红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of fresh potato/cassava starch noodles processed by different retrogradation treatments

注: 1-未浸泡, 2-浸泡 40 min, 3-冷藏 24 h。

在图 1 中, 含有海藻酸钠的鲜湿粉条在未浸泡时和在 4℃冷藏 24 h 后的红外光谱在形状上相似, 但强度不同, 表明淀粉与海藻酸钠之间没有化学相互作用,

但可能对长程有序性和结晶度有一定影响^[23]。3450 cm⁻¹ 处强度的变化可能与淀粉-OH 基团和来自添加剂分子的某些基团之间氢键的重排有关, 这比随水分含量的变化更为显著。对于中心位于 2100 cm⁻¹ 和 1642 cm⁻¹ 处的峰, 也可以做出类似的解释, 即海藻酸钠最初与淀粉化学基团结合的水分子的相互作用。总的来说, 添加海藻酸钠的鲜湿粉条比添加明矾和无明矾的鲜湿粉条红外光谱强度低, 可能是由于鲜湿粉条中存在的不同的水结合能力和淀粉的聚合物构象^[24]。此外, 在冷藏后, 鲜湿粉条表现出与未浸泡时相似的特性。

1047 cm⁻¹ 和 1022 cm⁻¹ 处的相对峰强度(拟合 R 值)被用于表征结晶淀粉的含量^[25]。不同鲜湿粉条的 1047 cm⁻¹ 和 1022 cm⁻¹ 的红外强度之比见表 4。从表 4 的数据可以看出, 与无明矾粉条和 0.30%明矾粉条相比, 添加了海藻酸钠后粉条的 R 值显著增大; 且 4℃冷藏 24 h 后, 3 种粉条的 R 值均高于未浸泡和浸泡 40 min 后粉条的 R 值, 这可能是因为短期老化过程中会造成粉条内氢键与添加剂的重新组合造成有序结构的比例增加, 即冷藏后鲜湿粉条可以形成更多的晶体结构^[25]。

表 4 不同老化方式对薯类鲜湿粉条官能团的影响

Table 4 Effects of different retrogradation treatments on chemical groups of fresh potato/cassava starch noodles

粉条类型	老化方式	R(1047 cm ⁻¹ /1022 cm ⁻¹)
无明矾粉条	未浸泡	0.905
	浸泡 40 min	0.913
	冷藏 24 h	0.942
0.3%明矾粉条	未浸泡	0.959
	浸泡 40 min	0.924
	冷藏 24 h	1.053
1%海藻酸钠粉条	未浸泡	0.954
	浸泡 40 min	0.977
	冷藏 24 h	1.031

2.5 不同老化方式对薯类鲜湿粉条微观结构的影响

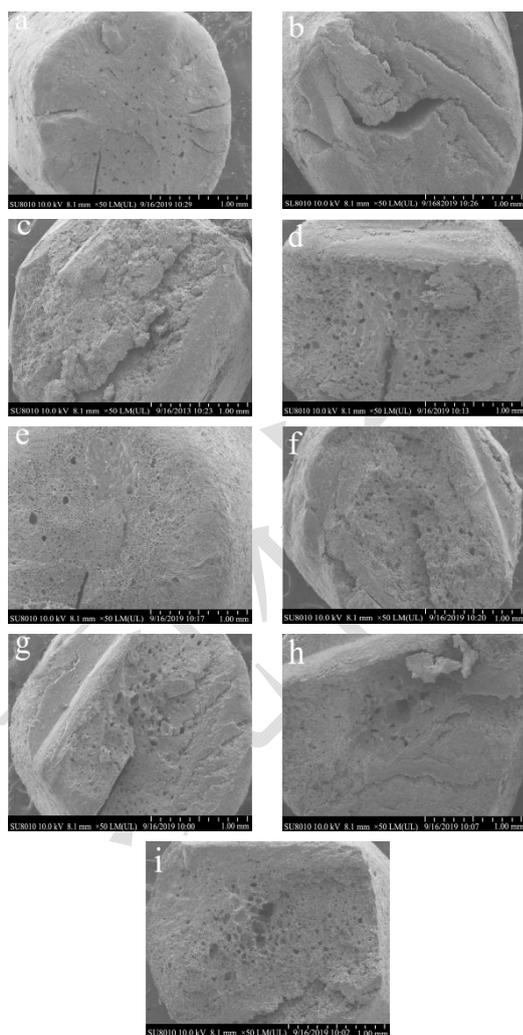


图 2 不同老化方式下薯类鲜湿粉条的微观结构

Fig.2 Microstructure of fresh potato/cassava starch noodles under different retrogradation treatments

注: a~c: 无明矾粉条未浸泡, 浸泡 40 min, 冷藏 24 h; d~f: 0.30%明矾粉条未浸泡, 浸泡 40 min, 冷藏 24 h; g~i: 海藻酸钠粉条未浸泡, 浸泡 40 min, 冷藏 24 h。

不同老化方式对薯类鲜湿粉条样品微观结构的影响见图 2。未浸泡时, 0.30%明矾粉条具有粗糙的多孔结构, 而无明矾粉条和添加海藻酸钠粉条的多孔结构数量更少、分布更均匀。浸泡 40 min 后, 与无明矾粉条相比, 0.30%明矾粉条与海藻酸钠粉条的多孔结构更为致密。此外, 4 °C 冷藏 24 h 后, 三种鲜湿粉条的多孔结构均比未浸泡时增多, 这可能是因为在低温冷藏过程中淀粉发生了老化, 导致多孔结构增多。已有研究表明, 淀粉是通过直链淀粉或支链淀粉分子的连接形成胶束网络结构, 在加热过程中控制着膨胀过程; 当胶体与淀粉混合时, 溶出的直链淀粉和低分子量支链淀粉在糊化过程中与胶体发生相互作用, 形成不同的网状结构^[26], 从而改变鲜湿粉条的结构与品质。

2.6 不同老化方式对薯类鲜湿粉条的小角 X 射线散射 (SAXS) 变化

天然淀粉和加工淀粉常用小角 X 射线散射法进行研究。分形维数表示体系的致密性, 并用于描述凝胶结构的自相似结构, α 值反映了粉条内部淀粉的排列方式, 其中指数 α 可以用来表示淀粉分子间的堆积结构^[27,28]。 α 值越大表明淀粉分子内部结构更松散。 α 值越小表明淀粉内部结构更致密。由表 5 可知, 未浸泡时所有鲜湿粉条样品的 α 值范围为 1.790~1.916, 这表明所有鲜湿粉条样品都形成了不同程度的堆积结构。与未浸泡的鲜湿粉条样品相比, 各组鲜湿粉条浸泡 40 min 后 α 值均有略微降低, 而在 4 °C 冷藏 24 h 后 α 值进一步降低, 表明在冷藏期间淀粉分子可能形成了更紧密的堆集结构, 这与图 2 中 SEM 的结果一致。

表 5 不同老化方式对薯类鲜湿粉条 SAXS 特性的影响

Table 5 Effects of different retrogradation treatments on SAXS characteristics of fresh potato/cassava starch noodles

粉条类型	老化方式	α 值	R ²
无明矾粉条	未浸泡	1.916	0.999
	浸泡 40 min	1.817	0.999
	冷藏 24 h	1.441	0.999
0.3%明矾粉条	未浸泡	1.790	0.999
	浸泡 40 min	1.717	0.999
	冷藏 24 h	1.401	0.999
1%海藻酸钠粉条	未浸泡	1.806	0.999
	浸泡 40 min	1.699	0.999
	冷藏 24 h	1.538	0.999

2.7 不同老化方式对薯类鲜湿粉条断条时间的影响

断条时间是反映鲜湿粉条产品品质的关键指标。蒸煮时间越长,鲜湿粉条质量越好^[29]。由表6数据可以知,未浸泡时,加入海藻酸钠后,鲜湿粉条的蒸煮时间较无明矾粉条和0.30%明矾粉条显著增加。浸泡40 min后,鲜湿粉条由于吸水,硬度降低,导致耐煮性下降^[30]。在4℃冷藏24 h后各组粉条的断条时间有略微减少,这可能因为冷藏导致鲜湿粉条内部结构和组成发生变化,鲜湿粉条吸水速度较慢,进而影响了粉条的断条时间。

表6 不同老化方式对薯类鲜湿粉条断条时间的影响

Table 6 Effects of different retrogradation treatments on the breaking time of fresh potato/cassava starch noodles

粉条类型	老化方式	断条时间/min
无明矾粉条	未浸泡	18±0.9 ^a
	浸泡 40 min	14±0.5 ^a
	冷藏 24 h	17±0.7 ^a
0.3%明矾粉条	未浸泡	24±1.0 ^b
	浸泡 40 min	22±1.2 ^{ab}
	冷藏 24 h	21±1.0 ^{ab}
1%海藻酸钠粉条	未浸泡	48±1.0 ^c
	浸泡 40 min	46±1.4 ^c
	冷藏 24 h	46±1.2 ^c

3 结论

通过研究不同海藻酸钠添加量、成型时间、冷藏及冷冻时间等对薯类鲜湿粉条质构特性、水分含量及整体可接受性的影响规律,确定了明矾替代物—海藻酸钠的最佳添加量及无明矾薯类鲜湿粉条的最优工艺。在此基础上,系统对比不同老化方式(未浸泡、浸泡40 min、4℃冷藏24 h)对薯类鲜湿粉条表观、微观结构(扫描电镜、傅里叶红外光谱、小角X射线散射)与断条时间的影响,初步阐明不同老化方式影响鲜湿粉条品质特性的作用机制,明确最佳的老化方式。研究表明,添加1%海藻酸钠、成型1 min、4℃冷藏24 h后,薯类鲜湿粉条的弹性、咀嚼性、水分含量及整体可接受性较好,与0.30%明矾粉条相比无显著差异,可作为无明矾薯类鲜湿粉条的最佳工艺。此外,与未浸泡和浸泡40 min两种老化方式相比,4℃冷藏24 h可显著提高鲜湿粉条的结晶区含量,形成更稳定、更致密的胶束网络结构,从而延长鲜湿粉条的断条时间,可作为优选的粉条老化方式。

参考文献

- [1] FAO (Food and Agriculture Organization). Food and Agricultural Commodities Production [R]. United States: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017
- [2] 马莹. 马铃薯加工业的现状与发展前景[J]. 中国马铃薯, 2001, 2: 123-125
MA Rong. Current situation and development prospect of potato processing industry [J]. Chinese Potato, 2001, 2: 123-125
- [3] 陈素芹. 甘薯粉丝的品质改进与质量评价[D]. 无锡: 江南大学, 2006
CHEN Su-qin. Quality improvement and quality evaluation of sweet potato vermicelli [D]. Wuxi: Jiangnan university, 2006
- [4] 唐丽, 张娟, 李一沛, 等. 湿热处理对不同水分含量的米粉性质及粉条品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2019, 401(2): 93-96
TANG Li, ZHANG Juan, LI Yi-pei, et al. Effects of heat moisture treatment on the properties of rice flour and its noodles at different moisture contents [J]. Hunan Agricultural Science, 2019, 401(2): 93-96
- [5] 杨续金, 郝苗苗. 无明矾马铃薯粉条制作工艺[J]. 农产品加工, 2012, 7: 70-73
YANG Xu-jin, HAO Miao-miao. Preparation technology of alum-free potato starch noodle [J]. Agricultural Processing, 2012, 7: 70-73
- [6] 杨志华, 王德宝, 李美君, 等. 焦磷酸钠无矾粉条的研制及品质特性分析[J]. 食品科技, 2015, 4: 241-247
YANG Zhi-hua, WANG De-bao, LI Mei-jun, et al. Preparation and analysis of the quality characteristics of non alum vermicelli [J]. Food Science and Technology, 2015, 4: 241-247
- [7] 刘品华, 陈吉书, 刘明研, 等. 芋头粉丝的研制[J]. 食品科技, 2011, 7: 139-142
LIU Pin-hua, CHEN Ji-shu, LIU Ming-yan, et al. Development of taro bean vermicelli [J]. Food Science and Technology, 2011, 7: 139-142
- [8] 吕振磊, 李国强, 陈海华. 马铃薯淀粉糊化及凝胶特性研究[J]. 食品与机械, 2010, 3: 28-33
LYU Zhen-lei, LI Guo-qiang, CHEN Hai-hua. Gelatinization and gel properties of potato starch [J]. Food and Machinery, 2010, 3: 28-33
- [9] FENG Ya-yun, MU Tai-hua, ZHANG Miao, 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]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 1170-1179
- [10] 刘兰霞,章睿,赵怀卓.食用氯化钠替代明矾在马铃薯粉丝(条)中的应用[J].农产品加工学,2010,11:107-108
LIU Lan-xia, ZHANG Rui, ZHAO Huai-zhuo. Application and research on edible sodium chloride as substitute for alum in production of potato starch noodle [J]. Journal of Agricultural Product Processing, 2010, 11: 107-108
- [11] FENG Ya-yun, MU Tai-Hua, ZHANG Miao, 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]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 1-10
- [12] 赵萌,王珊,沈群,等.红薯淀粉与绿豆淀粉复配粉条的工艺研究[J].食品研究与开发,2017,38(12): 58-63
ZHAO Meng, WANG Shan, SHEN Qun, et al. Study on the compounding process of sweet potato starch and mung bean starch [J]. Food Research and Development, 2017, 38(12): 58-63
- [13] 范会平,李瑞,王娜,等.冷冻工艺对无铝红薯粉条品质的影响[J].食品与发酵工业,2016,42(8):142-146
FAN Hui-ping, LI Rui, WANG Na, et al. Effect of freezing process on the quality of aluminum-free sweet potato vermicelli [J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(8): 142-146
- [14] 谭洪卓,陈素芹,谷文英.粉丝品质评价标准的补充建议[J].粮油加工,2006,3:78-81,84
TAN Hong-zhuo, CHEN Su-qin, GU Wen-ying. Supplementary suggestions on quality evaluation criteria for fans [J]. Grain and Oil Processing, 2006, 3: 78-81, 84
- [15] 廖卢艳,吴卫国.湿热处理改善红薯粉条品质的优化工艺研究[J].中国粮油学报,2016,31(10): 114-119,130
LIAO Lu-yan, WU Wei-guo. Study on the optimization of hot and humid treatment to improve the quality of sweet potato vermicelli [J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2016, 31(10): 114-119,130
- [16] 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 Can, ZENG Xue-dan, JIANG Guang-yang, et al. Screening of alum substitutes in fresh potato vermicelli [J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2019, 34(10): 95-102
- [17] Kaur A, Shevkani K, Singh N, et al. Effect of guar gum and xanthan gum on pasting and noodle-making properties of potato, corn and mung bean starches [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(12): 8113-8121
- [18] LI J L, KIM S Y, CHEN X, et al. Calcium-alginate beads loaded with gallic acid: preparation and characterization [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68: 667-673
- [19] 张垚.明矾改善土豆粉品质的机理研究和无矾土豆粉的生产工艺优化[D].郑州:河南农业大学,2017
ZHANG Yao. Mechanism study on alum improves the quality of potato starch noodle and alum free potato starch noodle production technology optimization [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017
- [20] Srikaeo K, Laothongsan P, Lerdluksamee C, et al. Effects of gums on physical properties, microstructure and starch digestibility of dried-natural fermented rice noodles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 109: 517-523
- [21] 倪小宇.影响粉条品质的关键因素研究[D].沈阳:沈阳工业大学理学院,2017
NI Xiao-yu. Research on key factors affecting the quality of vermicelli [D]. Shenyang: College of Science of Shenyang University of Technology, 2017
- [22] 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 Jie, JIANG Ji-kai, GAO Hai-yan, et al. Optimization of the aging process for potato vermicelli without additives and quality changes during storage [J]. Food Science, 2019, 40(12): 283-289
- [23] Dankar I, Haddarah A, Omar F E L, et al. Characterization of food additive-potato starch complexes by FT-IR and X-ray diffraction [J]. Food Chemistry, 2018, 260: 7-12
- [24] Sevenou O, Hill S E, Farhat I A, et al. Organization of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2003, 31(1-3): 79-85
- [25] Soest J J G V, Wit D D, Tournois H, et al. Retrogradation of potato starch as studied by fourier transform infrared spectroscopy [J]. Starch-Stärke, 1994, 46(12): 453-457
- [26] Rosell C M, Yokoyama W, Shoemaker C. Rheology of different hydrocolloids-rice starch blends. Effect of successive heating-cooling cycles [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84(1): 373-382
- [27] KUANG Q, XU J, LIANG Y, et al. Lamellar structure change of waxy corn starch during gelatinization by time-resolved synchrotron SAXS [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 62: 43-48