

球磨协同普鲁兰酶处理对红薯粉丝品质的影响

潘牧^{1,2}, 刘辉^{1,2}, 石义权³, 李俊^{1,2*}

(1. 贵州省农业科学院 生物技术研究, 贵州 贵阳 550006; 2. 贵州省农业生物技术重点实验室, 贵州 贵阳 550006; 3. 贵州神康原生态食品有限公司, 贵州 黔南 550600)

摘要: 为提高红薯淀粉直链淀粉含量进而改善红薯粉丝品质, 该文采用球磨、普鲁兰酶处理红薯淀粉, 利用直链淀粉试剂盒、傅里叶红外光谱仪、快速黏度分析仪、质构仪等对红薯淀粉直链淀粉含量、短程有序性、糊化特性进行表征。结果显示, 球磨处理、普鲁兰酶处理及球磨协同普鲁兰酶处理, 均能够增加红薯淀粉直链淀粉含量, 增加量分别为 12.83%、27.52% 和 50.41%。经预处理后, 红薯淀粉短程有序性下降, 回生和拉伸特性提高, 粉丝断条率分别下降 4.90%、9.99% 和 12.56%。球磨、普鲁兰酶单一处理方法能够显著改善粉丝的形态和口感。相比于球磨和酶解单一处理, 球磨协同普鲁兰酶处理能够更好地提高红薯粉丝的弹性和韧性, 改善其口感。

关键词: 球磨; 普鲁兰酶; 红薯淀粉; 直链淀粉含量; 感官品质

Effect of Ball Milling Combined with Pullulanase Treatment on the Quality of Sweet Potato Vermicelli

PAN Mu^{1,2}, LIU Hui^{1,2}, SHI Yiquan³, LI Jun^{1,2*}

(1. Institute of Biotechnology, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, Guizhou, China; 2. Guizhou Key Laboratory of Agricultural Biotechnology, Guiyang 550006, Guizhou, China; 3. Guizhou Shengkang Original Ecological Food Co., Ltd., Qiannan 550600, Guizhou, China)

Abstract: Ball milling and pullulanase were employed to increase the content of amylose in sweet potato starch and improve the quality of sweet potato vermicelli. An amylose assay kit, a Fourier infrared spectrometer, a fast viscosity analyzer, and a texture analyzer were used to determine the content, short-range order, and gelatinization properties of amylose in sweet potato starch. The results revealed that ball milling, pullulanase, and ball milling combined with pullulanase increased the amylose content by 12.83%, 27.52%, and 50.41%, respectively. The pre-treatment decreased the short-range order and improved the retrogradation and stretching properties of the starch. Ball milling, pullulanase, and ball milling combined with pullulanase decreased the broken rate of vermicelli by 4.90%, 9.99%, and 12.56%, respectively. Ball milling or pullulanase treatment improved the shape and flavor of vermicelli. The combination of ball milling and pullulanase outperformed either ball milling or pullulanase alone in improving the elasticity, texture, and taste of sweet potato vermicelli.

Key words: ball milling; pullulanase; sweet potato starch; amylose content; sensory quality

引文格式:

潘牧, 刘辉, 石义权, 等. 球磨协同普鲁兰酶处理对红薯粉丝品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 33-38, 159.

PAN Mu, LIU Hui, SHI Yiquan, et al. Effect of Ball Milling Combined with Pullulanase Treatment on the Quality of Sweet Potato Vermicelli[J]. Food Research and Development, 2023, 44(21): 33-38, 159.

红薯粉丝作为一种传统食品, 因其口感软糯丝滑深受消费者的喜爱。随着人们生活水平的提高, 消费者对红薯粉丝更加青睐, 同时对红薯粉丝的品质要求

越来越高。粉丝以淀粉为原料加工而成, 因此, 粉丝的品质与红薯淀粉的性质密切相关^[1]。淀粉由支链淀粉和直链淀粉组成^[2]。通常认为直链淀粉含量越高, 粉丝

基金项目: 贵州省省级科技计划项目资助(黔科合支撑[2021]一般 174、黔科合成果[2019]4243 号)

作者简介: 潘牧(1980—), 男(汉), 博士, 研究方向: 农产品加工。

* 通信作者: 李俊(1990—), 男(汉), 助理研究员, 博士, 研究方向: 农产品加工。

的品质越好^[3],因为支链淀粉具有多分支结构,而直链淀粉通常呈线性结构,其空间位阻更小^[4],因此,直链淀粉更容易发生老化从而提高粉丝的品质。李敏等^[5]发现相比于红薯粉丝,绿豆粉丝口感更加爽滑,蒸煮损失率更低,这是因为绿豆淀粉直链淀粉含量更高。由于红薯淀粉直链淀粉含量较低,在蒸煮过程中,红薯粉丝容易断条糊汤。为了改善红薯粉丝的品质,通常利用明矾增加其韧性和耐煮性,但明矾对人体有害,过度食用明矾会导致记忆力衰退、智力下降等问题。因此,开发一种绿色无害、提高红薯粉丝品质的工艺具有重要意义。直链淀粉含量是调控红薯粉丝品质变化的重要参数,提高红薯淀粉直链淀粉含量是改善红薯粉丝品质的重要思路。

普鲁兰酶是一种常用的脱支酶,其能够专一性水解淀粉中的 α -1,6糖苷键^[6-7],使支链淀粉的分支链脱离主干,从而形成具有线性结构的短直链淀粉,进而提高淀粉体系中直链淀粉含量。同时,根据世界卫生组织及我国GB 1886.174—2016《食品安全国家标准食品添加剂 食品工业用酶制剂》的相关要求,普鲁兰酶可在食品加工中使用。高能球磨法是一种通过机械力引发物质发生物理化学变化的改性方法,该方法改性过程中不引入化学试剂,具有环保、安全的特点^[8-9]。郎双静等^[10]发现球磨处理能够增加直链淀粉含量,降低淀粉凝胶的黏性。通过普鲁兰酶和球磨单一处理提高红薯粉丝品质的研究已有相关报道,但两者协同处理对红薯粉丝品质的影响鲜有报道。本研究基于球磨和普鲁兰酶协同提高直链淀粉含量原理,开发一种改善红薯粉丝品质的新方法,对红薯粉丝的工业化及高值化生产具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

红薯淀粉:天津顶峰开发有限公司;普鲁兰酶(60 U/mL):北京诺维信公司;K-AMYL直链淀粉试剂盒:Megazyme(爱尔兰)公司;无水磷酸氢二钠、无水柠檬酸(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

IS10型衰减全发射傅里叶变换红外光谱仪(Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR):美国Thermo-Nicolet科学仪器有限公司;GZX-9146MBE电热鼓风干燥箱:上海博迅实业有限公司医疗设备厂;OMNIC 8.2光谱处理软件、DXRZXi拉曼光谱仪:赛默飞科技有限公司;RVA-4500型快速黏度分析仪(rapid visco analyser, RVA):澳大利亚Perten公司;TA XT plus型物性分析仪:英国Stable Micro Systems公司;MINI ZETA 03E高能湿法球磨仪:德国Netzsch公司。

1.3 方法

1.3.1 改性红薯淀粉的制备

1.3.1.1 球磨预处理淀粉(sweet potato starch-ball milling, SPS-B)

取未处理的红薯淀粉(sweet potato starch, SPS)配制浓度为8%的悬浮液,通过料斗加入高能湿法球磨仪中处理20 min。球磨过程中采用低温循环水装置对球磨外壁进行降温。球磨处理结束后,淀粉浆置于烧杯中备用。

1.3.1.2 普鲁兰酶处理淀粉(sweet potato starch-enzyme, SPS-E)

向浓度为8%的淀粉乳中加入普鲁兰酶(120 U/g),搅拌均匀,55℃下反应30 min,酶解后的淀粉冻干,研磨并过100目网筛,用于指标测定。

1.3.1.3 球磨协同普鲁兰酶处理淀粉(sweet potato starch-ball milling and enzyme, SPS-BE)

向球磨处理后的淀粉乳中加入普鲁兰酶(120 U/g),搅拌均匀,55℃下反应30 min,酶解后的淀粉冻干,研磨并过100目网筛,用于指标测定。

1.3.2 直链淀粉含量测定

原淀粉和改性淀粉直链淀粉含量采用K-AMYL直链淀粉试剂盒测定^[11]。

1.3.3 淀粉短程有序性测定

将适量淀粉样品放置于FTIR的衰减全反射附件(attenuated total reflection, ATR)晶体表面,测试参数:扫描范围为4 000~400 cm⁻¹,扫描次数为32次,分辨率为4 cm⁻¹。

1.3.4 淀粉糊化特性测定

准确称取3.0 g淀粉样品于铝盒内,加入一定质量的去离子水,混合均匀,将铝盒放入RVA快速黏度分析仪中按照标准程序进行测定。

1.3.5 红薯粉丝的制备

配制一定浓度的淀粉乳,沸水浴中加热20 min,使其完全糊化。糊化的淀粉经过压面成型后,浸入冷水中冷却,然后自然风干。

1.3.6 淀粉凝胶性质测定

配制10 g/100 mL浓度的淀粉乳,于沸水中加热20 min,使其完全糊化,将糊化的淀粉置于特制的模具中,4℃放置24 h后,取出直径为3 cm的圆柱形凝胶测定其凝胶性质。具体测定条件:探头类型P36,感应力0.196 N,压缩形变50%,测试速度1.00 mm/s。

1.3.7 粉丝拉伸强度测定

取一定长度的粉丝,沸水浴加热20 min,冷却备用。利用A/SPR探头进行测定,拉伸速度为3.0 mm/s。

1.3.8 粉丝断条率测定

选择20根成品粉丝于烧杯中,煮沸20 min,通过

公式(1)计算粉丝的断条率。

$$R=C_i/C_f \times 100 \quad (1)$$

式中: R 为断条率,%; C_i 和 C_f 分别为煮前和煮后保持完整的粉丝条数。

1.3.9 粉丝蒸煮损失率测定

将 5 g 粉丝在 65 ℃ 烘箱中干燥至恒重,称取一定质量的粉丝(m_1 ,g)置于盛有沸水的烧杯中,煮沸 20 min,加热过程中保持水量恒定。粉丝冷却后,用滤纸吸干表面水分,并记录其质量。将湿粉丝置于烘箱中干燥至恒重,并记录质量(m_2 ,g)。蒸煮损失率(R_z ,%)通过公式(2)进行计算。

$$R_z=(m_1-m_2)/m_1 \times 100 \quad (2)$$

1.3.10 感官评价

将形貌相似的红薯粉丝在沸水中加热 20 min,取出冷却后用于感官评价。选择 15 位具有感官评价经验的人员对粉丝的不同属性做出评价,将每个属性的平均值作为最终评分。粉丝感官评分标准见表 1。

表 1 粉丝感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of sweet potato vermicelli

项目	分数	评分标准
组织形态	15~20	整体透明无裂痕、无明显断条
	10~<15	整体透明有少量裂痕、有少量断条
	0~<10	浑浊有多处裂痕、有大量断条
色泽	15~20	色泽透明
	10~<15	色泽较为透明
	0~<10	色泽浑浊
口感	15~20	软硬适中,口感爽滑,弹性十足
	10~<15	稍软或稍硬,口感较为爽滑,弹性较好
	0~<10	偏软或偏硬,口感黏腻不爽滑,弹性不足
气味	15~20	无异味
	10~<15	无明显异味
	0~<10	有明显异味
整体可接受度	15~20	满意
	10~<15	较满意
	0~<10	不满意

1.4 数据分析

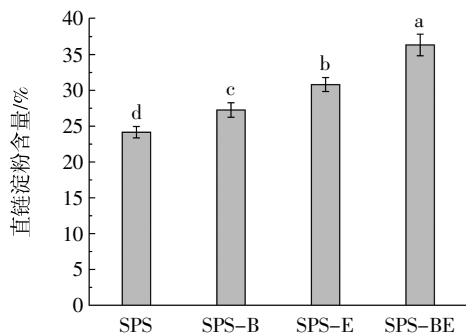
通过 SPSS 22.0 软件对数据进行方差分析,每组试验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示,采用 Origin-Pro 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 直链淀粉含量变化

不同样品的直链淀粉含量如图 1 所示。

由图 1 可知,SPS 的直链淀粉含量为 24.16%,经球磨和酶解单一处理后,直链淀粉含量分别增加 12.83% 和 27.52%。 α -1,6 糖苷键主要位于淀粉的无定型区,球磨处理能够破坏支链淀粉的 α -1,6 糖苷键,产生线



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 1 红薯淀粉直链淀粉含量

Fig.1 Amylose content of sweet potato starch

性支链段,从而导致直链淀粉含量增加^[12]。Liu 等^[13]研究发现球磨处理后木薯淀粉直链淀粉含量增加,支链淀粉分子量更大,且具有多分支结构,在剪切力作用下更容易被破坏,形成线性短链。普鲁兰酶能够专一性水解支链淀粉中的 α -1,6 糖苷键,从而产生短直链淀粉^[14],相比于球磨处理,酶解能够更有效增加淀粉的直链淀粉含量,这表明酶催化效率更高,反应速率更快。SPS-BE 直链淀粉含量显著高于 SPS-B 和 SPS-E 的直链淀粉含量,表明球磨协同酶处理能够进一步提高红薯淀粉的直链淀粉含量。一方面,球磨处理能够破坏支链淀粉的 α -1,6 糖苷键,残余的支链淀粉能够被酶进一步水解。另一方面,球磨与淀粉颗粒之间以及淀粉颗粒与淀粉颗粒之间的摩擦力和剪切力导致淀粉颗粒受损,粒径下降,有利于酶的水解。因此,球磨协同普鲁兰酶处理能够提高红薯淀粉直链淀粉含量,且其效果优于球磨和普鲁兰酶单一处理。

2.2 短程有序性测定

采用傅里叶红外光谱对红薯淀粉进行检测,结果如图 2 和图 3 所示。

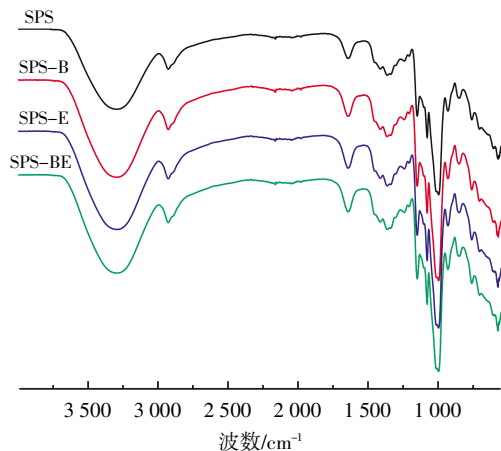


图 2 红薯淀粉的傅里叶变换红外光谱

Fig.2 Fourier transform infrared spectra of sweet potato starch samples

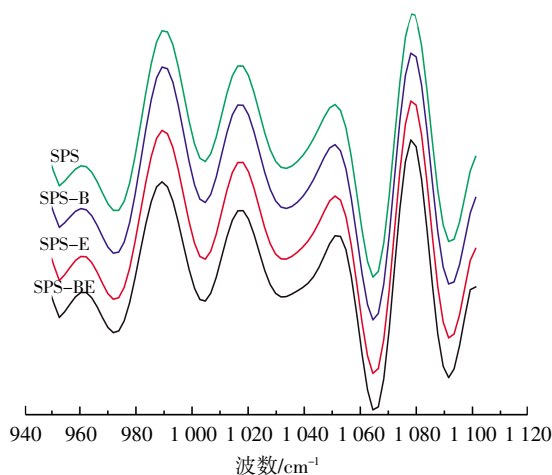
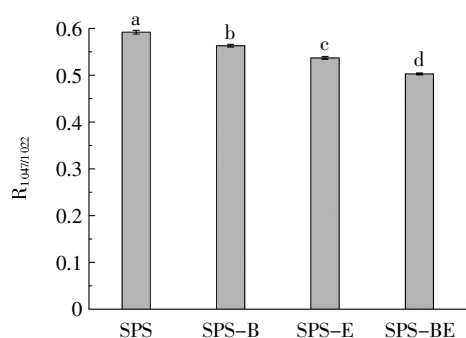


图3 红薯淀粉去卷积光谱

Fig.3 Deconvolution spectra of sweet potato starch samples

从图2中可以看出,3 400 cm^{-1} 处代表 O—H 振动,与淀粉的氢键相互作用有关。FTIR 光谱能够反映淀粉的短程有序性,1 047 cm^{-1} 和 1 022 cm^{-1} 处的吸光度分别与结晶区和无定型区相关,因此,1 047 cm^{-1} 和 1 022 cm^{-1} 的比值($R_{1\,047/1\,022}$)能够评估淀粉短程有序性的数量^[15-16]。 $R_{1\,047/1\,022}$ 的数值可通过傅里叶去卷积获得,样品 $R_{1\,047/1\,022}$ 的结果如图4所示。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图4 红薯淀粉 $R_{1\,047/1\,022}$ 值Fig.4 $R_{1\,047/1\,022}$ values of sweet potato starch samples

由图3、图4可知,SPS的 $R_{1\,047/1\,022}$ 数值显著高于SPS-B、SPS-E和SPS-BE。经球磨和酶解处理后 $R_{1\,047/1\,022}$ 的数值显著低于原淀粉的红外比值,表明样品的短程有序性下降,结果与文献[17-18]类似。短程有序性与螺旋结构的局部有序排列密切相关,且淀粉的结晶区主要由支链淀粉构成,而直链淀粉形成无定型区^[19]。球磨和酶解处理过程中, α -1,6糖苷键断裂,导致支链淀粉结构被破坏,结晶区减少,从而导致 $R_{1\,047/1\,022}$ 的数值降低。同时,短直链淀粉的形成导致螺旋结构的局部排列更加无序。SPS-BE的 $R_{1\,047/1\,022}$ 数值分别比SPS-B和SPS-E降低0.060和0.034。相比于球磨和酶解单一处理,球磨协同酶解处理后,支链淀粉结构破坏程度更高,产生的短直链淀粉更多,因此其短程有序性更低。

2.3 糊化特性

淀粉糊的性质与粉丝的品质密切相关,采用RVA测定淀粉的糊化性质,相关参数如表2所示。

表2 红薯淀粉的糊化特性

Table 2 Gelatinization properties of sweet potato starch samples

样品	峰值黏度	谷值黏度	最终黏度	回生值	衰减值	cp
SPS	4 300±20 ^a	2 200±19 ^d	3 350±35 ^d	1 150±15 ^d	2 100±35 ^a	
SPS-B	4 100±15 ^b	2 315±22 ^c	3 530±32 ^c	1 215±19 ^c	1 785±26 ^b	
SPS-E	4 012±24 ^c	2 422±18 ^b	3 680±20 ^b	1 258±16 ^b	1 590±20 ^c	
SPS-BE	3 800±34 ^d	2 500±15 ^a	3 813±25 ^a	1 313±18 ^a	1 300±30 ^d	

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

峰值黏度与淀粉颗粒的溶胀有关,加热过程中,淀粉颗粒膨胀相互挤压导致淀粉糊黏度上升。搅拌过程中,在剪切力作用,颗粒崩解,淀粉糊黏度下降^[20]。由表2可知,SPS的峰值黏度显著高于其他3种样品,这可能是因为球磨和酶解处理过程中,淀粉颗粒结构被破坏,更容易溶胀破裂。随温度下降,淀粉发生回生,在氢键、范德华力等非共价键作用下,淀粉链发生有序重排,形成凝胶网络结构,导致淀粉糊的黏度提高。回生值是最终黏度和谷值黏度的差值,回生值越大则证明淀粉回生越快,冷淀粉糊的稳定性越高^[21-22]。淀粉的回生特性在一定程度上决定了粉丝的品质。球磨和酶解处理后淀粉样品的回生值显著高于原红薯淀粉,表明淀粉的回生速率和稳定性提高。相比于原淀粉,球磨和酶解处理后,直链淀粉含量升高,而直链淀粉回生速度显著高于支链淀粉且直链淀粉具有线性结构,有利于形成良好的凝胶网络^[23]。因此,球磨协同酶解处理能够提高红薯淀粉糊的回生速率和稳定性。SPS-B、SPS-E和SPS-BE的回生值分别为1 215、1 258、1 313 cp,这表明球磨和酶解协同处理的淀粉样品,回生速率最快。衰减值是指峰值黏度与谷值黏度的差值,衰减值与淀粉糊的稳定性呈负相关^[24]。经球磨和酶解处理后,淀粉糊的衰减值显著降低,表明淀粉糊抵抗外力的能力增强,这可能与良好的凝胶网络有关。

2.4 凝胶特性

糊化的淀粉在冷却过程中会发生回生现象,无序的淀粉链在氢键作用下相互缠绕形成具有弹性和强度的凝胶,淀粉凝胶的性质一定程度上反映了粉丝的品质。红薯淀粉的凝胶特性见表3。

由表3可知,SPS的硬度显著低于SPS-B、SPS-E和SPS-BE。球磨和酶处理均能够显著增加淀粉的直链淀粉含量^[25-27],直链淀粉具有线性结构,空间位阻小,更容易发生有序重排形成晶体结构,形成更多的交联位点。同时,直链淀粉能够作为晶种加速支链淀粉回生^[28],而凝胶的硬度主要依赖于支链淀粉^[29]。SPS

表3 红薯淀粉凝胶特性

Table 3 Gel properties of sweet potato starch samples

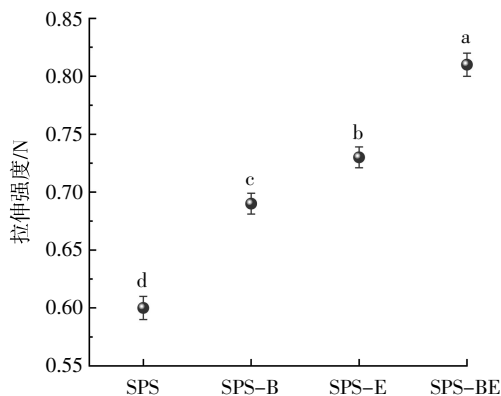
样品	硬度/N	弹性/mm	黏性/N	咀嚼性/mJ	回复性/%
SPS	1 500±0 ^d	1.01±0.02 ^d	1 200±24 ^d	1 188±33 ^d	0.53±0.01 ^d
SPS-B	1 632±25 ^c	1.21±0.01 ^c	1 311±25 ^c	1 238±24 ^c	0.58±0.02 ^c
SPS-E	1 721±24 ^b	1.38±0.04 ^b	1 434±31 ^b	1 345±31 ^b	0.62±0.01 ^b
SPS-BE	1 893±33 ^a	1.53±0.03 ^a	1 543±26 ^a	1 426±26 ^a	0.67±0.02 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

的直链淀粉含量低于 SPS-B、SPS-E 和 SPS-BE, 因此其具有更低的硬度。同时,经球磨和酶处理后,淀粉凝胶的弹性、黏性、回复性和咀嚼性均提高,这可能与淀粉凝胶性能的提高有关,直链淀粉含量增加,淀粉形成的凝胶网络更加完善。

2.5 拉伸强度

拉伸强度在一定程度上反映了粉丝的韧性,SPS、SPS-B、SPS-E 和 SPS-BE 的拉伸强度结果如图 5 所示。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图5 红薯粉丝的拉伸强度

Fig.5 Tensile strength of sweet potato vermicelli

由图 5 可知,SPS 的拉伸强度显著低于 SPS-B、SPS-E 和 SPS-BE,表明球磨和酶解处理均能够增强粉丝的拉伸强度。同时,SPS-BE 具有最高的拉伸强度,这表明球磨协同酶解处理能够更好地增强粉丝的韧性。粉丝拉伸强度的提高与淀粉的凝胶网络有关,球磨和酶解处理使淀粉中直链淀粉含量增加,提高了淀粉凝胶网络的韧性和强度,从而使粉丝具有更大的拉伸强度。球磨协同酶解处理后,SPS-BE 的拉伸强度为 SPS 的 1.35 倍。

2.6 蒸煮特性

红薯粉丝经过蒸煮后才能食用,因此,蒸煮特性对于评估粉丝的品质至关重要。断条率是评估粉丝品质好坏最直观的指标,断条率高则证明粉丝品质差。粉丝烹煮性越好,则断条率越低。红薯粉丝的蒸煮特性见表 4。

表4 红薯粉丝的蒸煮特性

Table 4 Cooking properties of sweet potato vermicelli

样品	断条率/%	蒸煮损失率/%
SPS	20.12±1.21 ^a	9.83±0.62 ^a
SPS-B	15.22±0.98 ^b	7.21±0.54 ^b
SPS-E	10.13±1.01 ^c	6.32±0.71 ^c
SPS-BE	7.56±0.99 ^d	5.12±0.42 ^d

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 4 可知,经球磨和酶解协同处理后,红薯粉丝的断条率降低了 12.56%,表明粉丝的耐煮性提高。粉丝耐煮性的提高与淀粉凝胶性能有关。由于直链淀粉含量的提高,在制备粉丝的过程中淀粉回生能够形成更加完善的凝胶网络,在加热复水过程中,粉丝的网络结构更加坚韧,从而使粉丝具有更强的耐煮性。而 SPS 直链淀粉含量低,在加热复水过程中,粉丝的网络结构容易被破坏,导致粉丝发生断裂。相比于球磨和酶解单一处理,两者协同作用能够更显著地增加直链淀粉含量,因此 SPS-BE 的断条率低于 SPS-B 和 SPS-E。石彬等^[30]同样发现,提高淀粉的直链淀粉含量能够降低粉丝的断条率。蒸煮损失率也是反映粉丝性质的重要指标。蒸煮损失率越高,则证明粉丝的质量损失率越高。淀粉糊化后,直链淀粉分子在氢键作用下发生有序重排^[31],形成致密的结构,抑制了淀粉的溶解和溶胀。因为 SPS-BE 直链淀粉含量最高,因此,其蒸煮损失率最低。综上,球磨协同酶解处理能够显著降低粉丝的断条率和蒸煮损失率。

2.7 感官评价

红薯粉丝的感官评价结果对于评估粉丝品质具有重要的现实意义,能够为粉丝生产提供更准确的要求。按照表 1 的评分标准对红薯粉丝进行了感官评价,结果见图 6。

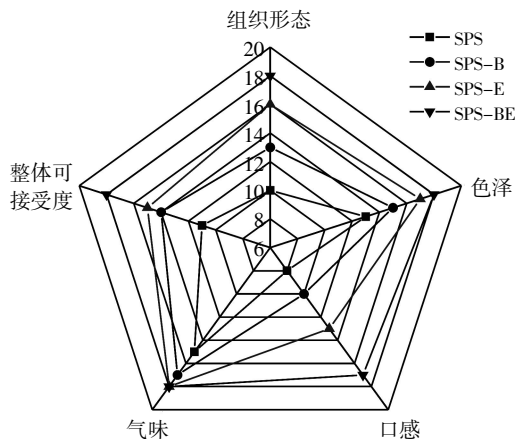


图6 红薯粉丝的感官评价

Fig.6 Sensory evaluation of sweet potato vermicelli

粉丝的口感是人们在消费时的首先关注点。由图6可知,SPS口感偏软且存在黏腻感,而经球磨或酶解处理后,粉丝口感明显改善。粉丝的硬度和弹性增强,且黏腻感降低。这可能是因为球磨或者酶解处理均提高了红薯淀粉的直链淀粉含量,SPS-B、SPS-E和SPS-BE能够形成更好的凝胶网络,且在直链淀粉晶种促进下回生速率更快,凝胶性能更好,因此其口感更好。在组织形态方面,红薯粉丝经酶解或球磨处理也发生显著改善,断条数量明显减少,且粉丝整体结构更为均一,这与断条率的结果一致。粉丝除了组织形态和口感得到改善以外,其色泽也变得更为透明。而球磨和酶解处理不会对粉丝的气味产生影响。

3 结论

本研究通过球磨和普鲁兰酶协同处理红薯淀粉,并以改性后的红薯淀粉为原料制备了红薯粉丝。经球磨和普鲁兰酶协同处理后,红薯淀粉直链淀粉含量显著提高。红薯淀粉的凝胶特性和回生特性增强。相比于球磨和普鲁兰酶单一处理,球磨协同普鲁兰酶处理能够更显著地改善红薯粉丝的口感、弹性和韧性,并有效减少了红薯粉丝的断条率。球磨协同普鲁兰酶处理具有效率高、绿色环保等特点,本研究对高品质红薯粉丝的生产具有指导意义。

参考文献:

- [1] 刘程玲,胡煜莹,王力翔,等.普鲁兰酶酶解处理红薯淀粉及其性质研究[J].中国粮油学报,2018,33(2):6-11.
LIU Chengling, HU Yuying, WANG Lixuan, et al. Pullulanase enzymatic treatment on sweet potato starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(2): 6-11.
- [2] CAO P P, WU G S, YAO Z J, et al. Effects of amylose and amylopectin molecular structures on starch electrospinning[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 296: 119959.
- [3] 金茂国,吴嘉根,吴旭初.粉丝生产用淀粉性质及其与粉丝品质关系的研究[J].无锡轻工业学院学报,1995,14(4):307-312.
JIN Maoguo, WU Jiagen, WU Xuchu. The properties of starches used for starch-noodle making and their relations with starch-noodle quality[J]. Journal of Wuxi University of Light Industry, 1995, 14(4): 307-312.
- [4] OTTENHOF M A, FARHAT I A. Starch retrogradation [J]. Biotechnology and Genetic Engineering Reviews, 2004, 21(1): 215-228.
- [5] 李敏,吴卫国,杨韵.无矾红薯粉丝加工工艺研究[J].农产品加工(学刊),2014(5):30-34.
LI Min, WU Weiguo, YANG Yun. Research on no alum sweet potato noodle processing[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(5): 30-34.
- [6] BAO J S, ZHOU X, HU Y Q, et al. Resistant starch content and physicochemical properties of non-waxy rice starches modified by pullulanase, heat-moisture treatment, and citric acid[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 105: 103472.
- [7] LI H, LI J H, XIAO Y, et al. *In vitro* digestibility of rice starch granules modified by β -amylase, transglucosidase and pullulanase[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 1228-1236.
- [8] BANGAR S P, SINGH A, ASHOGBO A O, et al. Ball-milling: A sustainable and green approach for starch modification[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 237: 124069.
- [9] HAO Z W, HAN S J, XU H J, et al. Insights into the rheological properties, multi-scale structure and *in vitro* digestibility changes of starch- β -glucan complex prepared by ball milling[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 224: 1313-1321.
- [10] 郎双静,李振江,武彦春,等.球磨微细化处理绿豆淀粉结构、理化及3D打印特性的变化[J].现代食品科技,2023,39(8):1-8.
LANG Shuangjing, LI Zhenjiang, WU Yanchun, et al. Changes in structural, physicochemical and 3D printing properties of mung bean starch after ball milling[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(8): 1-8.
- [11] ZHAI Y T, LI X X, BAI Y X, et al. Maltogenic α -amylase hydrolysis of wheat starch granules: Mechanism and relation to starch retrogradation[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107256.
- [12] TAN X Y, ZHANG B J, CHEN L, et al. Effect of planetary ball-milling on multi-scale structures and pasting properties of waxy and high-amylose cornstarches[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015, 30: 198-207.
- [13] LIU R, SUN W D, ZHANG Y J, et al. Development of a novel model dough based on mechanically activated cassava starch and gluten protein: Application in bread[J]. Food Chemistry, 2019, 300: 125196.
- [14] LU H, XIONG L, LI M, et al. Separation and characterization of linear glucans debranched from normal corn, potato and sweet potato starches[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 196-206.
- [15] VAN SOEST J J G, TOURNOIS H, DE WIT D, et al. Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy[J]. Carbohydrate Research, 1995, 279: 201-214.
- [16] FLORES-MORALES A, JIMÉNEZ-ESTRADA M, MORA-ESCOBEDO R. Determination of the structural changes by FT-IR, Raman, and CP/MAS ^{13}C NMR spectroscopy on retrograded starch of maize tortillas[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 61-68.
- [17] HAN N, FAN J L, CHEN N, et al. Effect of ball milling treatment on the structural, physicochemical and digestive properties of wheat starch, A- and B-type starch granules[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 104: 103439.
- [18] LU H, MA R R, CHANG R R, et al. Evaluation of starch retrogradation by infrared spectroscopy[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106975.
- [19] WANG Q L, TANG Z W, LI Z K, et al. Effects of octenyl succinylation on the properties of starches with distinct crystalline types and their Pickering emulsions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 230: 123183.
- [20] ZAIDUL I S M, NORULAINI N, OMAR A K M, et al. Correlations of the composition, minerals, and RVA pasting properties of various potato starches[J]. Starch-Stärke, 2007, 59(6): 269-276.
- [21] 潘自强,张琦,潘鑫,等.响应面法优化碱法提取藜麦淀粉及其性质研究[J].中国调味品,2023,48(5):57-64.
PAN Ziqiang, ZHANG Qi, PAN Xin, et al. Optimization of alkaline extraction of quinoa starch by response surface methodology and study on its properties[J]. China Condiment, 2023, 48(5): 57-64.
- [22] SUROJANAMETAKUL V, UDOMRATI S, SATMALEE P. Effects of liquid nitrogen deep freezing treatment on rice starch properties[J]. Starch-Stärke, 2022, 74(3/4): 2100137.

(下转第159页)

- [23] CHEN O, HONG Y, MA J H, et al. Screening lactic acid bacteria from pickle and cured meat as biocontrol agents of *Penicillium digitatum* on citrus fruit[J]. *Biological Control*, 2021, 158: 104606.
- [24] 吉莉莉, 魏艳, 何丹, 等. 发酵香肠中分离纯化的三株乳酸菌产酸特性研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(2): 36-39.
JI Lili, WEI Yan, HE Dan, et al. Study on acid production characteristics of three strains of lactic acid bacteria isolated and purified from fermented sausage[J]. *China Condiment*, 2020, 45(2): 36-39.
- [25] AMMOR M S, MAYO B. Selection criteria for lactic acid bacteria to be used as functional starter cultures in dry sausage production: An update[J]. *Meat Science*, 2007, 76(1): 138-146.
- [26] 胡美忠, 郁建生, 郁建平. 腌腊肉中优良乳酸菌的筛选鉴定及初步应用[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(8): 152-158.
HU Meizhong, YU Jiansheng, YU Jianping. Screening and identification of lactic acid bacteria from Chinese bacon and preliminary application[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(8): 152-158.
- [27] 李珊珊, 祝超智, 崔文明, 等. 发酵肉制品中微生物发酵剂分离筛选及应用研究进展[J]. *肉类研究*, 2019, 33(7): 61-66.
LI Shanshan, ZHU Chaozhi, CUI Wenming, et al. Recent progress in separation, screening and application of starter cultures for fermented meat products[J]. *Meat Research*, 2019, 33(7): 61-66.
- [28] 戴莹, 宋海勇, 吴曦, 等. 肉制品中生物胺的形成、检测和控制研究进展[J]. *肉类研究*, 2020, 34(11): 89-97.
DAI Ying, SONG Haiyong, WU Xi, et al. Recent progress in the formation, detection and control of biogenic amines in meat products[J]. *Meat Research*, 2020, 34(11): 89-97.
- [29] 张晓东. 发酵香肠菌种的筛选及对香肠理化性质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
ZHANG Xiaodong. Screening of bacteria in fermented sausage and its effects on physical and chemical properties of fermented sausage[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.
- 加工编辑: 张昱
收稿日期: 2022-07-30

(上接第38页)

- [23] LU Z H, SASAKI T, LI Y Y, 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.
- [24] 缪铭, 江波, 张涛. 淀粉的消化性能与 RVA 曲线特征值的相关性研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(5): 16-19.
MIAO Ming, JIANG Bo, ZHANG Tao. Correlation analysis between starch digestibility and rapid viscosity analyzer profile characteristics[J]. *Food Science*, 2009, 30(5): 16-19.
- [25] LI X X, YUE X R, HUANG Q L, et al. Effects of wet-media milling on multi-scale structures and in vitro digestion of tapioca starch and the structure-digestion relationship[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 284: 119176.
- [26] GENG D H, ZHANG X J, ZHU C Y, et al. Structural, physicochemical and digestive properties of rice starch modified by preheating and pullulanase treatments[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313: 120866.
- [27] TU D K, OU Y J, ZHENG Y X, et al. Effects of freeze-thaw treatment and pullulanase debranching on the structural properties and digestibility of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 177: 447-454.
- [28] ZHU B H, ZHAN J L, CHEN L, et al. Amylose crystal seeds: Preparation and their effect on starch retrogradation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105805.
- [29] SHANG L C, WU C L, WANG S S, et al. The influence of amylose and amylopectin on water retention capacity and texture properties of frozen-thawed konjac glucomannan gel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106521.
- [30] 石彬, 李咏富, 龙明秀, 等. 异淀粉酶增强红薯粉品质的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(16): 5706-5712.
SHI Bin, LI Yongfu, LONG Mingxiu, et al. Study on enhancing the quality of sweet potato powder by isomylase[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2020, 11(16): 5706-5712.
- [31] ZHANG Z J, ZHENG B, DU A L, et al. Insight into the retardation of retrogradation of chestnut starch by heat-moisture treatment with flavonoids[J]. *Food Chemistry*, 2023, 404: 134587.
- 加工编辑: 张岩蔚
收稿日期: 2023-06-12