

紫薯粉对小麦面团加工特性影响的研究进展

Research progress on the effect of purple sweet potato flour on the processing characteristics of wheat dough

胡 瀚^{1,2} 王娅殊² 周文化^{1,2}

HU Han^{1,2} WANG Ya-shu² ZHOU Wen-hua^{1,2}

张梦潇^{1,2} 谭玉珩^{1,2} 李良怡^{1,2}

ZHANG Meng-xiao^{1,2} TAN Yu-heng^{1,2} LI Liang-yi^{1,2}

(1. 特医食品加工湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;

2. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Special Medical Food Processing, Changsha, Hunan 410004, China; 2. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

摘要:综述了近年来对紫薯—小麦混合粉加工特性的研究,总结了紫薯粉对小麦面团在粉质、质构、拉伸、动态流变等流变特性影响的变化规律,重点对糊化、老化两个热力学特性影响的变化规律进行总结,在此基础上,分析了当前紫薯—小麦混合粉研究中存在的问题,并对其未来的研究方向进行了展望。

关键词:紫薯;小麦;混合粉;面团;流变学特性;热力学特性

Abstract: The research on the processing characteristics of purple potato-wheat mixed flour in recent years, and the changes of purple potato flour on the rheological properties of wheat dough in terms of silty, texture, stretching, dynamic rheology were summarized. The change law of the influence of gelatinization and aging on the thermodynamic properties was reviewed. Moreover, the existing problems in the current research on purple sweet potato-wheat mixed flour were analyzed, and the future research directions has been prospected.

Keywords: purple sweet potato; wheat; mixed powders; dough; rheological properties; thermodynamic properties

随着市场需求的提升,近年来各种小麦混合粉面制

品层出不穷。紫薯营养丰富^[1],色泽亮丽,所含花青素的生物价值和安全性高^[2-5],氨基酸组成全面,尤其是米面制品中相对缺乏的赖氨酸含量较高^[6],是极具价值的食品加工原料。将紫薯粉添加到小麦粉中不仅能提高面制品营养价值、丰富食品种类,且外源蛋白的加入在一定条件下能促进面团筋网络的形成^[7],提升面制品品质。

但紫薯粉中麦谷蛋白分子量较小、麦醇溶蛋白含量较低^[8],作为添加物改变了面团中各成分含量,改变了面团加工特性,易对生产应用产生不利影响。因此,在生产中依照紫薯—小麦混合粉加工特性的变化规律,科学地控制紫薯粉和小麦粉的配比,是提升紫薯面制品品质和实现紫薯面制品进一步应用的关键和基础。文章拟综述近年来对紫薯—小麦混合粉加工特性的研究,整理总结紫薯粉对小麦面团在粉质、质构、拉伸、动态流变等流变特性影响的变化规律,以及对糊化、老化两个热力学特性影响的变化规律,以期对紫薯—小麦混合粉的加工提供指导。

1 紫薯粉对面团流变学特性的影响

面团是制作面条、面包等面制品的基础原料,其品质决定了面制品的产品质量^[9-10]。流变学特性是衡量面团品质的重要指标,面团的粉质特性、质构特性、拉伸特性和动态流变特性是面团流变学特性中的重要特性^[11-14]。紫薯粉与小麦粉的成分差异巨大,用其替代部分小麦粉会改变面团的流变学特性,从而影响面团的加工生产。

1.1 粉质特性

紫薯粉或紫薯泥与小麦粉混配会在一定程度上影响

基金项目:长沙市自然科学基金资助项目(编号:kq 2014150);湖南省重点研发计划(编号:2020NK2020)

作者简介:胡瀚,男,中南林业科技大学在读硕士研究生。

通信作者:周文化(1969—),男,中南林业科技大学教授,博士生导师,博士。E-mail:1479674265@qq.com

收稿日期:2021-03-22

紫薯—小麦粉粉质特性,但与其他外源粉相比,紫薯粉对粉质特性的影响更小。不同外源粉质原料对小麦面团粉质特性的影响见表 1。由表 1 可知,不同外源粉对小麦粉质影响具有明显差异,比较紫薯—小麦粉混合面团与马铃薯、红薯、板栗、绿豆粉面团粉质特性差异发现,随添加量的上升,紫薯粉面团吸水率变化趋势及幅度与马铃薯粉面团相近,稳定时间与红薯、板栗粉面团相近,弱化度与绿豆粉面团相近。紫薯粉面团形成时间上升,与其他 4 种面团变化趋势相反。此外,随着添加量提升到 30%,紫薯面团粉质质量指数降低了 18,显著低于马铃薯、板栗、绿豆粉面团的下降程度,说明紫薯粉对面团粉质质量的影响低于其他 3 种粉^[15-19]。

外源粉基本组分的不同是影响混合粉面团粉质质量存在差异的主要原因。紫薯粉中的纤维素含量很高(2.7~6.5 g/100 g^[20]),纤维素含有大量的羟基,可通过氢键结合更多的水,具有很强的吸水能力,且紫薯粉本身的水分含量(4.26 g/100 g^[20])明显低于小麦粉(12.99~13.23 g/100 g^[20]),因此紫薯粉替代后混合粉面团的吸水量增加。而吸水量与粉质质量指数有着较好的线性相关性,如小麦粉吸水量与紫薯粉添加量的相关系数可达 0.999($P<0.01$)^[20]。因此将紫薯粉添加到小麦粉中,其粉质质量不会过度降低,甚至有助于提高面制品的出品率,改善蛋糕、面包、馒头、面条等面制品因失水而引起的

老化、脱水、龟裂、收缩等现象。由表 1 可知,马铃薯—小麦混合粉面团也表现出了极高的吸水率(30%添加量下为 103.0%),但其直链淀粉/支链淀粉比例仅为 0.14~0.31^[8],过低的直链淀粉比例使其淀粉吸水后膨润度过高,表现为面团弱化度高,面团易流变,加工处理性差,因此马铃薯粉对小麦面团粉质质量的趋劣影响也十分明显。

紫薯粉添加量对小麦面团粉质特性表现出明显差异。由表 2 可知,不同质量分数的紫薯粉添加到小麦粉中至其添加量达到 20%(以面粉质量分数计),面团吸水率随紫薯添加量呈递增趋势^[21-22],其原因在于纤维素和蛋白质在紫薯粉中占比较高,其分子中羟基基团能与水分子发生相互作用,从而使混合粉中水分含量较低,随着替代紫薯粉的增多,混合粉面团的吸水量也不断增大^[19],其体积也会随之增加;而添加紫薯的小麦面团形成时间和稳定时间分别降低 1~5,7~10 min,可能是由于外源紫薯粉的添加稀释了小麦面筋蛋白,使面筋网络结构损坏的同时降低了混合粉面团的稳定性,并随着替代紫薯粉的增多而逐渐明显;混合粉面团弱化度不断上升,当紫薯粉添加量高于 10%后,弱化度超过 100 FU,易造成加工困难;当紫薯粉添加量高于 10%后,粉质质量指数低于 50,加工适用性变差。Zhang 等^[15]将紫薯粉添加量提高到 50%,发现混合粉面团的吸水率仍呈不断上升的趋势

表 1 不同外源物添加量对小麦面团粉质特性的影响

Table 1 Effect of different exogenous additions on the flour quality of wheat dough

添加物	添加量/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度/FU	粉质质量指数
紫薯全粉 ^[15]	0	58.7	2.4	3.1	115	52
	10	67.8	2.5	2.1	266	38
	20	72.2	2.5	2.5	279	36
	30	87.5	4.2	1.2	240	34
马铃薯全粉 ^[16]	0	57.8	3.1	5.5	74	66
	10	75.0	2.5	2.2	275	43
	20	93.0	2.3	2.1	292	32
	30	103.0	2.1	1.4	309	25
红薯全粉 ^[17]	0	59.2	8.0	12.6	56	70
	10	65.6	6.5	10.2	110	60
板栗全粉 ^[18]	0	60.5	4.1	4.8	34	93
	10	61.3	3.5	3.9	58	72
	20	59.3	2.6	3.3	87	56
	30	58.7	2.5	3.1	97	41
绿豆全粉 ^[19]	0	61.5	5.4	8.2	33	98
	10	62.3	4.3	6.3	39	81
	20	61.3	3.7	3.4	98	55
	30	59.0	3.2	2.6	129	43

表 2 紫薯粉添加量对紫薯—小麦混合面团粉质特性的影响

Table 2 Effect of purple potato flour addition on the flour characteristic of purple potato-wheat mixed dough

研究者	添加量/%	吸水率/%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度/FU	粉质质量指数	备注
何兆位等 ^[21]	0	60.9	10.6	12.6	104		
	10	71.1	8.1	7.1	141		
	20	74.5	6.1	4.9	169		
单珊 ^[22]	0	60.6	3.3	18.0	37	92	
	10	63.6	2.2	10.6	59	59	
	20	64.0	2.0	8.6	101	41	
陈芳芳 ^[20]	0	65.0	8.4	4.5	31		
	10	77.6	13.4	8.2	144		高筋小麦粉
		12.6	5.0	3.7	113		
	0	57.1	2.1	3.0	145		低筋小麦粉
	10	67.3	8.4	4.5	206		
张梦潇等 ^[23]	0	62.3		4.1	120		
	15	69.0~69.9		3.1~3.4	134~139		9 种紫薯粉质范围
Zhang 等 ^[15]	0	58.7	2.4	3.1	115	52	
	10	67.8	2.5	2.1	266	38	
	20	72.2	2.5	2.5	279	36	
	30	87.5	4.2	1.2	240	34	
	40	93.6	4.2	1.2	255	24	
	50	103.2	5.8	1.1	257	39	

达到 103.2%；面团稳定时间下降了 2.0 min，最终为 1.1 min；面团弱化度呈先上升后下降，最大值为 279 FU；粉质质量指数不断下降后，在 40%~50%有上升；而面团形成时间由 2.4 min 不断上升到 5.8 min，与低添加量下的下降趋势不同。

同时紫薯种类也对紫薯—小麦粉面团粉质特性产生影响。张梦潇等^[23]研究了宁紫薯 1 号等 9 个紫薯—小麦粉混合粉质特性发现，不同种类的紫薯粉对面团的吸水率、形成时间、稳定时间影响差别分别达到 0.9%、1.61 min、5 FU，而对面团带宽、公差指数的影响差别较明显，最高可达 6.92、10.24 FU。这可能是因为不同种类的紫薯在水分、蛋白质、纤维素和花青素等物质含量存在显著性差异^[24]。

1.2 质构分析

紫薯粉的添加混配对紫薯—小麦粉面团质构特性产生一定影响。由表 3 可知，不同质量分数的紫薯粉添加到小麦粉中至其添加量达到 30%，面团凝胶硬度和胶黏性不断下降，凝胶弹性和内聚性先上升后下降（分别在 10%、20%处有最大值）。这是由于紫薯全粉中存在的花青素和多糖与淀粉分子发生交联，并通过氢键阻碍直链淀粉的再解离，使面团凝胶的质构特性趋劣变化，随着紫薯粉添加量的上升，这种趋劣变化也逐渐明显^[25]。

紫薯粉的添加亦对面制品的质构特性产生影响。Zhang 等^[15-23]发现，紫薯粉的添加明显提升了馒头硬度，降低了馒头胶黏性，对馒头弹性、内聚性影响不大；紫薯粉的添加对面条硬度、弹性、内聚性影响较小，对面条胶黏性的影响因紫薯种类的不同存在差异。

1.3 拉伸特性

拉伸特性体现面团配方和制作流程上的差异性，紫薯粉的添加对小麦面团拉伸特性产生不利影响。随着紫薯粉添加量的上升，面团拉伸能量、拉伸度、拉伸阻力、最大拉伸阻力、拉伸比例和最大拉伸比例均先增大后减小^[27]。面团良好的延展拉伸特性来源于小麦粉面筋蛋白中的麦谷蛋白和麦醇溶蛋白，紫薯粉较小麦粉弹性差、黏度大，且不含麦谷蛋白和麦醇溶蛋白，部分替代小麦粉共混会弱化面团的面筋网络，影响面团的拉伸特性。

将混合粉面团进一步加工为面条并煮熟，发现随着紫薯粉含量的增加，紫薯面条的剪切应力从 $(76.99 \pm 5.35) \text{ g/mm}^2$ 急剧下降到 $(29.17 \pm 4.82) \text{ g/mm}^2$ ，硬度由 $(5\ 161.84 \pm 90.22) \text{ g}$ 降至 $(3\ 448.13 \pm 83.97) \text{ g}$ ^[25]。在紫薯粉存在的情况下，煮熟面条的硬度和拉伸应力的降低归因于紫薯花青素在糊化过程中引起的 pH 降低效应。

1.4 动态流变学特征

紫薯粉的添加在一定程度上影响小麦粉混合面团动

表 3 紫薯粉添加量对小麦面团及其产品质构特性的影响

Table 3 Effect of purple potato flour addition on the texture characteristics of wheat dough and its products

研究者	添加量/%	硬度/g	胶黏性	弹性	内聚性	备注
Shan 等 ^[25]	0	53.667	25.028	0.850	0.471	
	10	45.219	20.968	0.953	0.481	
	20	35.680	19.878	0.860	0.491	
	30	19.845	15.936	0.831	0.403	
丁燕燕等 ^[26]	0	37.040	20.190	0.700	0.470	紫薯淀粉/小麦淀粉
	10	39.100	24.400	1.970	0.510	
Zhang 等 ^[15]	0	2 973.010	−15.240	0.320	0.760	紫薯馒头
	10	3 447.870	−17.320	0.410	0.760	
	20	4 166.750	−18.420	0.410	0.750	
	30	6 360.660	−34.450	0.380	0.720	
张梦潇等 ^[23]	0	4.752	167.254	82.335	0.655	紫薯面条
	15	4.146~5.464	119.603~235.055	78.484~90.475	0.597~0.686	

态流变学特征。在紫薯—小麦混合粉体系中,粒径较小的紫薯粉作为填充物进入面筋网络中,使其相对体积增大,从而对面筋网络结构的完整性及分子交互联接的程度产生影响^[28],最终使面团的弹性和黏性发生变化。将不同种类紫薯—小麦混合粉面团于流变仪中测定动态流变特性,发现其 $\tan\delta$ 均小于 1^[23],说明紫薯粉的添加赋予了小麦面团类似固体的性质,具有较好的弹性^[29]。将角频率 ω 升高,混合粉面团的损耗因子先迅速降低再略微升高,可能是由于外源紫薯粉的添加提升了面筋蛋白中高聚物的含量,面筋蛋白聚合程度增大,使得紫薯—小麦混合粉面团的弹性增加,面团的稳定性变好^[30]。

2 紫薯粉对面粉热力学性质的影响

淀粉是紫薯粉^[31]和小麦粉^[32]的主要成分,而淀粉的糊化和老化能直接影响以淀粉为原料的食品的加工特性和成品质量^[33-34]。其原因是由于已糊化的淀粉混合物随着时间的推移,其内在品质会发生一系列变化,如在温度约 65℃ 以下时,直链淀粉与支链淀粉会发生部分分离,老化现象更严重,从而使其营养价值和感官品质大大降低,如馒头干缩、面包变硬等均由淀粉老化作用产生^[35]。紫薯粉和小麦粉中的淀粉含量和组成不同,其糊化、老化的起始温度、终止温度、峰值温度及热焓值也不同,因此研究紫薯粉对小麦粉糊化和老化特性的影响十分必要。

2.1 糊化特性

紫薯粉及紫薯泥与小麦粉混配在一定程度上会影响紫薯—小麦粉糊化特性,且其对糊化特性的影响与其他外源粉未见明显差异。近年来相关研究对外源粉原料对小麦面团糊化特性的影响见表 4。由表 4 可知,通过比较紫薯—小麦粉混合面团与板栗、木薯、菊粉、糯小麦粉面

团糊化特性差异发现,随添加量的上升,紫薯粉面团在峰值黏度、谷值黏度、崩解值等 6 个糊化指标的变化趋势均与板栗粉、菊粉面团一致,且除糊化温度外(在 10% 添加量下,紫薯粉面团升高 15.03℃,板栗粉、菊粉面团分别为 1.12、1.75℃),其余指标变化量均无明显差异。紫薯粉面团与木薯粉、糯小麦粉面团相比,仅在崩解值、最终黏度、回生值 3 个指标有相同变化趋势^[15,18,36-38]。紫薯添加量对小麦面团糊化特性表现明显差异,具体如表 5 所示。

由表 5 可知,不同质量分数的紫薯粉添加到小麦粉中至其添加量达到 20%,面团峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度和回生值均呈递减趋势,糊化温度呈上升趋势。这是因为紫薯粉中直链淀粉含量较低,部分替代小麦粉参与糊化时易吸水膨胀,使其呈黏稠状,因此在一定的温度和浓度下,紫薯—小麦混合淀粉较小麦淀粉拥有更高的糊化黏度、崩解值和回生值,达到峰值黏度所需时间少,更容易膨润。在冷却回生过程中,混合粉回生值更高,是由于其分子粒度较小,直链淀粉中氢键的重新缔合更容易发生^[39]。但郭家宝等^[27]发现了不同的变化趋势,紫薯粉与藁优 2018 小麦粉制成混合粉,其峰值黏度、谷值黏度、最终黏度和峰值时间,随添加量的上升先增大后减小,淀粉崩解值先增大后减小再增大,淀粉回生值逐渐减小。

紫薯粉对小麦面团糊化特性的影响亦可用差示扫描量热仪表征,相关研究^[20]发现,随着替代紫薯粉的增多,紫薯—小麦混合粉面团的氧化温度、结晶峰温度和峰值温度逐渐上升,糊化焓不断增大,糊化温度范围则不断缩小。

2.2 老化特性

紫薯粉部分替代小麦粉亦对面团老化特性(也称凝

表 4 不同外源物添加量对小麦面团 RVA 糊化特性的影响

Table 4 Effects of different exogenous additions on RVA pasting properties of wheat dough

添加物	添加量/ %	峰值黏度/ RVU	谷值黏度/ RVU	崩解值/ RVU	最终黏度/ RVU	回生值/ RVU	糊化温度/ ℃	峰值时间/ min
紫薯全粉 ^[15]	0	225.42	149.39	76.03	278.25	128.23	72.30	
	10	183.42	110.92	72.50	231.03	120.11	87.33	
	20	144.00	93.08	50.92	185.94	92.86	86.40	
板栗全粉 ^[18]	0	220.12	136.26	83.86	273.02	127.64	65.52	
	10	199.02	120.54	78.48	229.40	118.88	66.64	
	20	186.36	130.23	56.15	199.13	110.74	66.95	
	30	165.66	114.78	50.88	189.87	98.28	69.63	
木薯全粉 ^[36]	0	116.03	74.06	145.97	41.97	71.92	88.75	6.00
	30	125.39	85.19	133.28	40.19	48.08	74.60	6.07
菊粉 ^[37]	0	249.42	157.08	92.33	274.08	117.00	86.30	
	10	175.17	113.42	61.75	202.42	89.00	88.05	
糯小麦全粉 ^[38]	0	204.15		35.05		239.38	73.55	5.70
	10	222.33		36.00		235.51		5.27
	20	269.10		46.51		231.00		5.27
	30	301.97		59.52		220.05		5.45

表 5 紫薯粉添加量对小麦面团 RVA 糊化特性的影响

Table 5 Effect of purple sweet potato flour addition on RVA pasting properties of wheat dough

研究者	添加量/ %	峰值黏度/ RVU	谷值黏度/ RVU	崩解值/ RVU	最终黏度/ RVU	回生值/ RVU	糊化温度/ ℃	峰值时间/ min	备注
何兆位等 ^[20]	0	225.42		76.03	278.25	128.23	72.30		
	10	183.42		72.50	231.03	120.11	87.33		
	20	144.00		50.92	185.94	92.86	86.40		
Shan 等 ^[25]	0	344.00	212.00	132.00	367.00	154.00			
	10	303.00	162.00	141.00	337.00	175.00			
	20	244.00	120.00	124.00	269.00	149.00			
郭家宝等 ^[27]	0	233.17	159.58	73.58	284.67	125.08	65.25	6.33	
	10	196.69	133.50	63.17	240.08	106.58	67.75	6.13	
张梦潇等 ^[29]	0	207.83	133.33	74.50	234.92	101.58	69.40		9 种紫薯 范围
	15	121.37~	73.83~	47.83~	142.33~	68.50~	86.45~		
		152.33	99.83	64.00	172.83	82.33	88.15		

胶化特性)产生一定程度的影响。不同质量分数的紫薯粉添加到小麦粉中至其添加量达到 30%，混合粉的凝胶硬度和黏着性均呈下降趋势，凝胶弹性于 0~10%范围内升高，随后单调下降^[22]。其原因主要是由于紫薯粉部分替代小麦粉组成混合粉面团后，紫薯中花色苷、纤维素等成分与小麦淀粉分子交联，阻碍了直链淀粉以氢键形式重新缔合，无法形成紧密的网络结构，使凝胶硬度下降。

添加紫薯粉后小麦粉老化特性的改变与淀粉微观结构的变化有关。紫薯淀粉、小麦淀粉及其混合淀粉凝胶

冻融后的微观结构均呈“蜂窝状结构”^[40]，但其蜂窝结构中孔的大小并不相同。纯小麦淀粉凝胶和纯紫薯淀粉凝胶表现出非常不均匀且疏松的网络结构，以大孔为主；紫薯—小麦混合淀粉凝胶中的蜂窝孔尺寸比小麦淀粉凝胶更小且更均匀，尤其是当添加的紫薯淀粉含量为 15%时，蜂窝孔尺寸最小，蜂窝状结构最为致密。因此，这些结构特征表明紫薯淀粉起到了填充物质的作用，能较好地分散在小麦淀粉凝胶中。此外，紫薯淀粉与小麦淀粉的相互作用影响了淀粉间的交联，限制了水分子的迁移，增强

了混合淀粉凝胶的持水能力,有助于保持微观结构^[41],从而小麦淀粉的凝胶网络结构更加致密。

3 结语与展望

国内外对小麦粉加工特性的研究已有较长历史,近年来对小麦混合粉的研究也已成为研究热点。紫薯以丰富的营养成分、独特的色泽、低廉的价格等优势,已成为特色面制品研发热点之一^[42-43]。目前市面上已出现广受消费者欢迎的紫薯特色面制品,如紫薯面条^[44]、紫薯面包、紫薯蛋糕、紫薯饼干^[45-46]等,但在生产保藏过程中,存在营养物质损失严重、色泽崩解严重、食品添加剂依赖过度等问题。进一步掌握紫薯—小麦混合粉加工特性规律,更深层解释紫薯—小麦混合粉加工现象,以解决紫薯特色面制品的行业难题,将带来巨大的经济效益。

文章综述的紫薯—小麦混合粉研究,聚焦点在紫薯粉添加量对面团的影响,意在通过归纳不同研究者的加工特性试验数据,总结紫薯粉与小麦粉的最佳比例,为今后的研究与生产作出指导。除此外,原料处理和加工工艺的优化也是面制品品质提升的重点,原料的预糊化^[47]、脱脂、灭酶和发酵处理,加工过程中品质改良剂的添加、和面与成型方式的优化等方法^[48-52],已被研究证实能极大提升混合粉面制品品质。但目前紫薯—小麦混合粉在这些方面的研究较为缺乏,需要今后更多的研究投入。

此外,目前对紫薯—小麦混合粉流变特性、热力学特性变化规律的解释,普遍集中在性状和品质的直观表达,如混合粉直链淀粉和支链淀粉比例和含量、蛋白质种类和含量、纤维素含量和生物活性物质含量等变化。添加紫薯粉后,紫薯淀粉对小麦淀粉颗粒产生的交联作用、紫薯蛋白及紫薯中游离氨基酸对小麦面筋蛋白结构的影响等因素,大多研究者只进行了推测,未进行针对性的量化研究。今后对紫薯—小麦混合粉加工特性的研究,需更微观、更深入,以期从机理层面有更多发现。

参考文献

- [1] LEBOT V. Tropical root and tuber crops: cassava, sweet potato, yams and aroids[M]. [S.l.]: CABI, 2009: 16.
- [2] 杨巍,黄洁琼,陈英,等.紫薯的营养价值与产品开发[J].农产品加工(学刊),2011(8): 41-43.
YANG Wei, HUANG Jie-qiong, CHEN Ying, et al. Nutritional value and product development of purple sweet potato[J]. Processing of agricultural products (Journal), 2011(8): 41-43.
- [3] OKI T, MASUDA M, FURUTA S, et al. Involvement of anthocyanins and other phenolic compounds in radical-scavenging activity of purple-fleshed sweet potato cultivars[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(5): 1 752-1 756.
- [4] STEED L E, TRUONG V D. Anthocyanin content, antioxidant activity, and selected physical properties of flowable purple-fleshed

- sweet potato purees[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(5): 215-221.
- [5] SUDA I N A R, OKI T, MASUDA M, et al. Physiological functionality of purple-fleshed sweet potatoes containing anthocyanins and their utilization in foods[J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2003, 37(3): 167-173.
- [6] 温桃勇,刘小强.紫色甘薯营养成分和药用价值研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(5): 1 954-1 956.
WEN Tao-yong, LIU Xiao-qiang. Research progress on nutritional components and medicinal value of purple sweet potato[J]. Anhui Agricultural Science, 2009, 37(5): 1 954-1 956.
- [7] 王凤,黄卫宁,刘若诗,等.采用 Mixolab 和 Rheometer 研究含外源蛋白燕麦面团的热机械学和动态流变学特性[J].食品科学,2009,30(13): 147-152.
WANG Feng, HUANG Wei-ning, LIU Ruo-shi, et al. Thermomechanical and dynamic rheological properties of oat dough containing exogenous protein were studied by Mixolab and Rheometer[J]. Food Science, 2009, 30(13): 147-152.
- [8] PEKSA A, KITA A, KULAKOWSKA K, et al. The quality of protein of coloured fleshed potatoes[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2 960-2 966.
- [9] LAMBRECHT M A, ROMBOUTS I, NIVELLE M A, et al. The impact of protein characteristics on the protein network in and properties of fresh and cooked wheat-based noodles[J]. Journal of Cereal Science, 2017(5): 234-242.
- [10] VERBAUWHEDE A E, LAMBRECHT M A, JEKLE M, et al. Microscopic investigation of the formation of a thermoset wheat gluten network in a model system relevant for bread making[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 55(2): 891-898.
- [11] LIU R, SOLAH V A, WEI Y, et al. Sensory evaluation of Chinese white salted noodles and steamed bread made with Australian and Chinese wheat flour[J]. Cereal Chemistry, 2019, 96(1): 66-75.
- [12] BOSMANS G M, LAGRAIN B, OOMS N, et al. Biopolymer Interactions, Water Dynamics, and Bread Crumb Firming[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(19): 4 646-4 654.
- [13] JOHANSSON E, MALIK A H, HUSSAIN A, et al. Wheat gluten polymer structures: The impact of genotype, environment, and processing on their functionality in various applications[J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(4): 367-376.
- [14] 潘治利,田萍萍,黄忠民,等.不同品种小麦粉的粉质特性对速冻熟制面条品质的影响[J].农业工程学报,2017,33(3): 307-314.
PAN Zhi-li, TIAN Ping-ping, HUANG Zhong-min, et al. The effect of flour quality characteristics of different varieties of wheat flour on the quality of fast-frozen cooked noodles[J]. Agricultural Engineering Journal, 2017, 33(3): 307-314.
- [15] ZHANG T, ZHANG F, CAO Y, et al. Effect of whole purple potato flour on dough properties and quality of steamed bread[J]. Journal of Food Research, 2019, 8(4): 122.

- [16] 郭祥想, 李雪琴, 张佳佳. 马铃薯全粉—小麦粉混合粉性质及其对面条品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 21-25.
- GUO Xiang-xiang, LI Xue-qin, ZHANG Jia-jia. Properties of potato flour-wheat flour mixed flour and its effect on noodle quality[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(6): 21-25.
- [17] 曹阳. 红薯粉对面包面团流变学特性的影响[J]. 农产品加工, 2013(1): 28-29, 42.
- CAO Yang. Effect of sweet potato flour on rheological properties of bread dough[J]. Processing of Agricultural Products, 2013(1): 28-29, 42.
- [18] 李勇, 周文化, 李彦, 等. 板栗—小麦混合粉的流变学和热力学特性[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 1-5.
- LI Yong, ZHOU Wen-hua, LI Yan, et al. Rheological and thermodynamic properties of chestnut-wheat mixed powder[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2020, 35(2): 1-5.
- [19] 庞慧敏, 陈芸, 赵思明, 等. 绿豆—小麦混合粉的流变学和热力学特性研究[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(9): 36-38.
- PANG Hui-min, CHEN Yun, ZHAO Si-ming, et al. Study on rheological and thermodynamic properties of mung bean-wheat mixed powder[J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2015, 30(9): 36-38.
- [20] 陈芳芳. 紫薯粉对面团烘焙特性的影响及其机理[D]. 上海: 华东理工大学, 2014: 12-13.
- CHEN Fang-fang. Effect of purple potato flour on dough baking characteristics and its mechanism[D]. Shanghai: East China University of Technology, 2014: 12-13.
- [21] 何兆位, 刘雄, 赵天天, 等. 紫薯粉对面包粉流变学及糊化特性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 6-9.
- HE Zhao-wei, LIU Xiong, ZHAO Tian-tian, et al. Effects of purple potato flour on rheological and pasting properties of bread flour[J]. Food & Machinery, 2017, 33(8): 6-9.
- [22] 单珊. 紫薯—小麦混合粉的性质及面条品质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 15.
- SHAN S. Study on the properties of purple sweet potato-wheat mixed flour and noodle quality [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012: 15.
- [23] 张梦潇, 周文化, 莫华, 等. 不同品种紫薯粉面团品质特性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 12-18.
- ZHANG Meng-xiao, ZHOU Wen-hua, MO Hua, et al. Dough quality characteristics of different varieties of purple sweet potato flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(2): 12-18.
- [24] 张梦潇, 周文化, 周虹, 等. 不同品种紫薯营养成分及聚类分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(1): 19-25.
- ZHANG Meng-xiao, ZHOU Wen-hua, ZHOU Hong, et al. Nutritional principal components and cluster analysis of different varieties of purple sweet potato[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(1): 19-25.
- [25] SHAN S, ZHU K X, ZHOU P M. Physicochemical properties and salted noodle-making quality of purple sweet potato flour and wheat flour blends [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2013, 37(5): 709-716.
- [26] 丁燕燕, 韦冬梅, 许莉, 等. 紫薯淀粉对小麦淀粉凝胶特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(5): 707-712.
- DING Yan-yan, WEI Dong-mei, XU Li, et al. The effect of purple potato starch on the gel properties of wheat starch[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2020, 47(5): 707-712.
- [27] 郭家宝, 刘彦军, 高振贤, 等. 添加紫薯粉对强筋小麦粉品质特性及面包加工品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2019(4): 14-17.
- GUO Jia-bao, LIU Yan-jun, GAO Zhen-xian, et al. Effects of adding purple potato flour on the quality characteristics of strong gluten wheat flour and bread processing quality[J]. Food and Feed Industry, 2019(4): 14-17.
- [28] IKEDA S, NISHINARI K. "Weak gel"-type rheological properties of aqueous dispersions of nonaggregated K-carrageenan helices[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(9): 4 436-4 441.
- [29] 赵保堂, 林娟, 吴晓庆, 等. 地达菜对藜麦面团流变学特性的影响[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(4): 34-39.
- ZHAO Bao-tang, LIN Juan, WU Xiao-qing, et al. Effect of Dida on the rheological properties of quinoa dough[J]. Food and Fermentation Technology, 2019, 55(4): 34-39.
- [30] 苏晓芳, 刘匀昀, 郭娟娟, 等. 紫薯淀粉与卡拉胶共混体系糊化及流变学特性的研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(9): 1 853-1 859.
- SU Xiao-fang, LIU Yun-yun, GUO Juan-juan, et al. Gelatinization and rheological properties of the blend system of purple sweet potato starch and carrageenan[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2014, 35(9): 1 853-1 859.
- [31] 孔霜霜. 紫薯熟粉的加工及其自发粉研制[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 35-36.
- KONG Shuang-shuang. The processing of purple sweet potato cooked powder and its self-raising powder[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 35-36.
- [32] 付奎. 小麦淀粉对于面粉品质、冷冻面团及馒头的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014: 4.
- FU Kui. The effect of wheat starch on flour quality, frozen dough and steamed bread [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014: 4.
- [33] 廖卢艳, 吴卫国. 不同淀粉糊化及凝胶特性与粉条品质的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 332-338.
- LIAO Lu-yan, WU Wei-guo. The relationship between different starch gelatinization and gel properties and vermicelli quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(15): 332-338.
- [34] 王林. 淀粉的糊化与凝胶特性及食用品质研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(2): 67-73.
- WANG Lin. Study on the gelatinization and gel properties and eating quality of starch[J]. Preservation and Processing, 2021, 21(2):

- 67-73.
- [35] 武爱群, 谢建华. 食品化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019: 61.
- WU Ai-qun, XIE Jian-hua. Food chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019: 61.
- [36] 卫萍, 王颖, 张雅媛, 等. 木薯全粉对木薯—小麦混合粉加工特性及馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 18-24.
- WEI Ping, WANG Ying, ZHANG Ya-yuan, et al. Effects of whole cassava flour on processing characteristics of cassava-wheat mixed flour and steamed bread quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 18-24.
- [37] 陈书攀, 何国庆, 谢卫忠, 等. 菊粉对面团流变性及面条质构的影响[J]. 中国食品学报, 2014, 14(7): 170-175.
- CHEN Shu-pan, HE Guo-qing, XIE Wei-zhong, et al. Effect of inulin on dough rheology and noodle texture[J]. Chinese Journal of Food Science, 2014, 14(7): 170-175.
- [38] 杨艳芳, 朱科学, 郭晓娜, 等. 糯小麦粉对混合粉性质及面团冻融稳定性的影响[J]. 现代面粉工业, 2014, 28(3): 23-28.
- YANG Yan-fang, ZHU Ke-xue, GUO Xiao-na, et al. The effect of glutinous wheat flour on the properties of mixed flour and dough freeze-thaw stability [J]. Modern Flour Industry, 2014, 28(3): 23-28.
- [39] 曹龙奎, 李凤林. 淀粉制品生产工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008: 9.
- CAO Long-kui, LI Feng-lin. Production technology of starch products[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2008: 9.
- [40] XIAO Y, LIU S, SHEN M, et al. Effect of different Mesona chinensis polysaccharides on pasting, gelation, structural properties and in vitro digestibility of tapioca starch-Mesona chinensis polysaccharides gels[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105327.
- [41] ZHU F, CAI Y, SUN M, et al. Effect of phytochemical extracts on the pasting, thermal, and gelling properties of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 919-923.
- [42] GREENE J L, BOVELL-BENJAMIN A C. Macroscopic and sensory evaluation of bread supplemented with sweet-potato flour[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(4): Q167-Q173.
- [43] QIAO F, HUANG L, XIA W. A study on microwave vacuum dried re-structured lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) mixed with purple sweet potato (*Ipomoea batatas*) snacks[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 90(4): 653-658.
- [44] 范会平, 李菲菲, 符锋, 等. 紫薯全粉面条的制备及其品质影响研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(5): 151-158.
- FAN Hui-ping, LI Fei-fei, FU Feng, et al. Preparation of purple sweet potato noodles and its quality effects[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(5): 151-158.
- [45] 孙玉清, 田文静, 朱建晨. 紫薯曲奇饼干品质和加工工艺研究[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(12): 29-33.
- SUN Yu-qing, TIAN Wen-jing, ZHU Jian-chen. Research on the quality and processing technology of purple sweet potato cookies[J]. China Food and Nutrition, 2019, 25(12): 29-33.
- [46] 曹诚, 申梦娜, 寇福兵, 等. 紫薯产品的开发研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2019(1): 32-35.
- CAO Cheng, SHEN Meng-na, KOU Fu-bing, et al. Development and research progress of purple sweet potato products[J]. Food and Feed Industry, 2019(1): 32-35.
- [47] 刘庆庆, 朱松明, 张洁, 等. 预糊化条件对萌芽糙米蒸煮质构特性及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 289-297.
- LIU Qing-qing, ZHU Song-ming, ZHANG Jie, et al. Effects of pregelatinization conditions on the texture and quality of germinated brown rice cooking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 289-297.
- [48] 刘兴丽, 赵双丽, 靳艳军, 等. 挤压膨化紫薯粉对小麦面团糊化特性和热机械学特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 106-111.
- LIU Xing-li, ZHAO Shuang-li, JIN Yan-jun, et al. The effect of extruded purple potato flour on the gelatinization and thermomechanical properties of wheat dough[J]. Food Science, 2019, 40(15): 106-111.
- [49] ORTOLAN F, STEEL C J. Protein characteristics that affect the quality of vital wheat gluten to be used in baking: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2017, 16(3): 369-381.
- [50] LIU X, MU T, YAMUL K D, et al. Evaluation of different hydrocolloids to improve dough rheological properties and bread quality of potato-wheat flour[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(6): 1 597-1 607.
- [51] 谢新华, 毋修远, 仵军红, 等. γ -聚谷氨酸对冻藏面团及馒头品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 22-27.
- XIE Xin-hua, WU Xiu-yuan, WU Jun-hong, et al. The effect of γ -polyglutamic acid on the quality of frozen dough and steamed bread[J]. Food Science, 2020, 41(22): 22-27.
- [52] 张莹莹, 郭兴凤, 王瑞红, 等. TSP 与 SPH 复合物对面团特性及面条品质的影响机制[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 37-42.
- ZHANG Ying-ying, GUO Xing-feng, WANG Rui-hong, et al. The effect mechanism of TSP and SPH compound on dough characteristics and noodle quality[J]. Food Science, 2020, 41(2): 37-42.