

冻融处理不同来源淀粉魔芋复合凝胶特性及其影响

田宸,廖卢艳,吴卫国*

(湖南农业大学 食品科学技术学院,湖南 长沙 410125)

摘要:为探究冻融处理不同来源淀粉对魔芋凝胶的影响,以6种不同的市售淀粉,按不同淀粉与魔芋粉的质量比来制备冷冻复合凝胶。基于各种不同来源淀粉理化性质,综合分析复合凝胶的质构特性和持水性差异,通过相关性分析探究不同来源淀粉对魔芋凝胶的影响。结果表明,不同来源淀粉间直链淀粉含量、糊化特性以及淀粉凝胶的流变特性存在差异,添加不同来源淀粉均可以改善冷冻复合凝胶的凝胶品质,降低凝胶硬度的同时提高弹性,淀粉与魔芋质量比(2:8)可提高复合凝胶的持水性。而不同来源淀粉的添加对凝胶品质影响存在差异性,其中小麦淀粉魔芋复合凝胶综合品质最优,与纯魔芋凝胶相比具有较好的弹性及内聚性。小麦淀粉与魔芋粉质量比为1:9时改善冷冻复合凝胶特性效果最佳。

关键词:魔芋凝胶;淀粉;凝胶特性;主成分分析;相关性分析

Effect of Different Sources of Starch and Properties of Konjac Gel under Freeze-Thaw Treatment

TIAN Chen, LIAO Luyan, WU Weiguo*

(School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410125, Hunan, China)

Abstract: In order to investigate the effect of freeze-thaw treatment on konjac gel from different sources of starch, the frozen composite gel was prepared by using 6 different kinds of starches on the market according to the mass ratio of different starches to konjac powder. Based on the physicochemical properties of various starches from different sources, the structural properties and water retention of composite gels were analyzed comprehensively, and the effects of different starches on konjac gels were investigated by correlation analysis. The results showed that the amylose content, gelatinization properties and rheological properties of starch gels from different sources were different. Addition of different starches could improve the gel quality, reduce the gel hardness and improve the elasticity of the gel, and the starch/konjac mass ratio (2:8) could improve the water retention of the gel. The addition of starch from different sources had different effects on the gel quality, among which wheat starch konjac composite gel had the best comprehensive quality and better elasticity and cohesiveness than pure konjac gel. When the mass ratio of wheat starch to konjac powder was 1:9, it was the best to improve the properties of frozen composite gel.

Key words: konjac gel; starch; gel properties; principal component analysis; correlation analysis

引文格式:

田宸,廖卢艳,吴卫国.冻融处理不同来源淀粉魔芋复合凝胶特性及其影响[J].食品研究与开发,2024,45(7):94-102.

TIAN Chen, LIAO Luyan, WU Weiguo. Effect of Different Sources of Starch and Properties of Konjac Gel under Freeze-Thaw Treatment[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 94-102.

魔芋在食品应用中占有重要的地位,如凝胶食品、仿生类食品等^[1-3]。冷冻是一种方便有效的长期储存

食物的方法,是调节魔芋凝胶特性的重要方式之一^[4]。冷冻处理后魔芋凝胶的凝胶强度增大,韧性提高,形成

基金项目:湖南省重点领域研发项目(2019NK2131);湖南创新型省份建设专项(2019NK2131)

作者简介:田宸(2000—),女(汉),硕士研究生,研究方向:粮食、油脂及植物蛋白工程。

*通信作者:吴卫国(1968—),男,博士研究生,研究方向:粮油加工。

独特的疏松多孔的结构,例如以雪魔芋为代表的凝胶产品,但现有的实际应用中发现纯魔芋凝胶存在弹性不足、冻融过程中严重脱水、凝胶颜色过深等缺点^[5]。提升魔芋凝胶品质特性可利用化学改性、物理改性等方法^[6-9]。物理改性是最直接且简便的方式,常见的有多糖共混、蛋白共混以及超声辅助等方式,可改善魔芋凝胶的部分特性^[10-13]。通过淀粉复合魔芋粉提升凝胶品质的方法是目前开发魔芋凝胶制品中常用的方法^[14-17]。有研究表明添加淀粉能改善魔芋凝胶的黏弹性和硬度^[18]。同时有研究发现通过添加淀粉代替部分魔芋粉可明显改善凝胶的持水性,调节色泽使其均一^[19-21]。不同种类的淀粉其直链淀粉和支链淀粉含量及淀粉结构存在差异,目前已有研究对比不同淀粉对淀粉/魔芋复合凝胶特性的影响^[22-24],结果表明淀粉以及不同种类变性淀粉代替魔芋粉形成复合凝胶存在差异^[25]。但关于冷冻条件下综合比较不同种类的淀粉对魔芋凝胶的品质影响及机理的研究鲜见。

因此,为满足对冷冻魔芋凝胶食品的需求,针对目前冷冻魔芋凝胶存在的持水能力和质构特性差的问题^[26],本研究探讨冷冻条件下不同淀粉对魔芋凝胶品质特性的影响,测定6种复合凝胶的持水性、质构特性,通过感官评价及相关性分析探究原料淀粉对复合凝胶的主要影响特征。利用主成分分析法筛选复合凝胶评价的关键指标并进行综合排序,得到复合凝胶最优的淀粉种类和添加质量比,以期采用淀粉改善魔芋凝胶提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

绿豆淀粉、玉米淀粉、马铃薯淀粉、豌豆淀粉:河南恩苗食品有限公司;小麦淀粉:盐城厨鹤粉业有限公司;木薯淀粉:广西农垦明阳淀粉发展有限公司;魔芋粉:云南楚雄嘉顺魔芋种植有限公司;氢氧化钙(食品级,纯度>95%):江苏沪中钛白科技有限公司。

1.2 仪器与设备

质构仪(TA-XT2i Plus):英国 Stable Micro Systems 公司;智能磁力搅拌器(ZNCL-B140×140):巩义市中天仪器科技有限公司;快速黏度分析仪(RVA-TEC-MASTER):瑞典 PERTEN 公司;旋转流变仪(Kinexus pro+):英国 Malvern 公司;超速离心机(OptinagXPN-100):美国 Beckman 公司;电热恒温水浴锅(DK-98-II):天津市泰斯特仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 淀粉原料成分测定

总淀粉含量参照 GB 5009.9—2016《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》中酸水解法测定;直链淀粉含量参照 GB/T 15683—2008《大米 直链淀粉含量的

测定》测定;水分含量参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》测定。

1.3.2 淀粉凝胶动态流变学特性测定

配制质量分数为5%的淀粉乳,经95℃水浴加热30 min后,放置于4℃环境中24 h。采用40 mm平板进行动态流变学测试,频率扫描测试条件为温度25℃,扫描应变1%,间隙1 mm,频率扫描范围0.1~100 Hz(在线性黏弹范围内)。

1.3.3 淀粉原料糊化特性的测定

参照苏键等^[27]的方法,采用快速黏度分析仪测定。

1.3.4 冻融复合凝胶的制备

参考徐聪等^[22]的方法并稍加修改,在40 g去离子水中加入2 g不同复配质量比(1:9、2:8、3:7、4:6、5:5)的魔芋粉和淀粉,在8 g去离子水中加入0.2 g氢氧化钙。充分搅拌使样品完全溶解后,加入氢氧化钙固体,在磁力搅拌器上以500 r/min的转速搅拌5 min后倒入模具中封口溶胀1.5 h。将溶胶于90℃水浴锅中水浴加热30 min形成凝胶。待凝胶冷却至室温后,放置于-18℃冰箱中冷冻18 h,随后于室温下解冻2 h,即制得经冻融处理的复合凝胶。

1.3.5 冻融复合凝胶的质构特性

参考韩扬等^[26]的方法将经冻融处理后的凝胶切成10 mm高的圆柱体(底面直径为25 mm),在质构仪中进行全质构分析。测试程序设定为采用P/25探头,压缩形变量50%,触发力5 g,测前速度2 mm/s,测中及测后速度1 mm/s,间隔时间5 s,测定冻融凝胶的质构特性。

1.3.6 冻融复合凝胶持水率的测定

持水率参照 Wang 等^[28]的方法并稍作修改,记录经冻融处理后的凝胶质量为 a (g),将凝胶置于超速离心机25℃环境下5 000 r/min离心15 min。擦去离心后凝胶表面水分,记录质量为 b (g)。持水率(K ,%)的计算公式如下。

$$K = \frac{b}{a} \times 100$$

1.3.7 冻融复合凝胶的感官评价

参考 NY/T 2981—2016《绿色食品 魔芋及其制品》中评价标准并适当修改,复合凝胶的感官品质评价标准见表1。由20名食品专业相关的人员组成评价小组,根据感官评价标准对冷冻后的复合凝胶进行感官评分。每个样品重复3次,计算平均值。

表1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

评定项目	感官评价	得分
色泽(30)	均匀黄白色有光泽	25~30
	较均匀黄白色	21~<25
	有明显不均匀颜色	0~<21

续表 1 感官评价标准

Continue table 1 Sensory evaluation criteria

评定项目	感官评价	得分
组织状态 (50)	外形光滑、整齐一致,富有弹性不软绵,极少汁液渗出	45~50
	外形较光滑、整齐一致,弹性低,软绵,较少汁液渗出	40~<45
	外形粗糙,无明显弹性,软绵,汁液渗出较多	0~<40
气味(20)	具有魔芋凝胶固有的气味,无异味	15~20
	具有魔芋凝胶固有气味,有异味	10~<15
	无魔芋凝胶固有气味,有明显刺激性气味	0~<10

1.4 数据处理

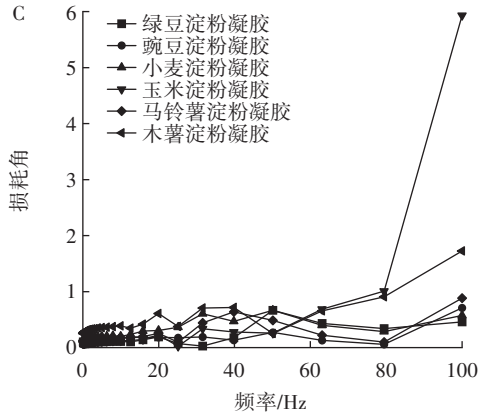
采用 Excel 软件对试验数据进行处理,结果以平均值±标准差的形式表示;用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行描述性分析、相关性分析和主成分分析。试验图用 Origin 2021 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同来源淀粉理化特性及凝胶特性分析

图 1 为不同淀粉凝胶的流变学特性结果。

由图 1 可知,在频率扫描过程中豌豆淀粉凝胶在频率小于 80 Hz 时呈现的弹性模量最高,损耗角变化趋势比较平缓,可知豌豆淀粉所形成的凝胶相较于其他淀粉凝胶弹性更好。绿豆淀粉凝胶弹性模量随频率



A. 不同来源淀粉弹性模量;B. 不同来源淀粉黏性模量;C. 不同来源淀粉损耗角。

图 1 不同来源淀粉凝胶流变特性

Fig.1 Rheological properties of starch gel of different sources

升高而升高且在 100 Hz 时损耗角最低,可见绿豆淀粉形成凝胶具有良好的稳定性。玉米淀粉凝胶黏性模量较大,并当频率达到 80 Hz 后损耗角值最大,可知玉米淀粉形成凝胶稳定性较差。

表 2 为不同来源淀粉基本理化性质结果。

表 2 不同来源淀粉基本理化性质

Table 2 Basic physicochemical properties of starch of different sources

组别	水分含量/%	直链淀粉含量/%	总淀粉含量/%	持水率/%
玉米淀粉	13.02±0.31 ^{cd}	28.25±3.72 ^e	79.25±0.08 ^d	98.63±0.85 ^a
小麦淀粉	14.48±0.15 ^b	48.75±0.61 ^c	80.56±0.05 ^c	99.64±2.57 ^a
绿豆淀粉	13.36±0.32 ^e	57.28±0.74 ^b	81.71±0.15 ^b	95.59±1.35 ^b
豌豆淀粉	12.31±0.31 ^d	63.55±1.32 ^a	83.82±0.70 ^a	93.21±3.08 ^c
马铃薯淀粉	16.89±0.17 ^a	23.45±1.19 ^f	80.90±0.31 ^e	99.38±1.24 ^a
木薯淀粉	13.19±0.69 ^{cd}	34.24±0.51 ^d	79.32±0.18 ^d	99.57±2.18 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

淀粉凝胶主要是由于直链分子在降温冷却过程中呈双螺旋缠绕,被破坏的氢键重新排列组合形成,而在冷藏储存过程中,由于直链淀粉的回生老化决定淀粉凝胶的硬度和弹性^[29]。由表 2 可知,6 种不同来源淀粉中,豆类淀粉(绿豆淀粉和豌豆淀粉)的直链淀粉含量较高,玉米淀粉、马铃薯淀粉的直链淀粉含量相对偏低。将不同淀粉糊化并经过冻融处理后,凝胶的持水率均在 90% 以上,相比之下豌豆淀粉的持水率偏低。

表 3 为不同来源淀粉糊化特性结果,表 4 为不同淀粉凝胶质构特性的结果。

由表 3 可知,小麦淀粉、玉米淀粉、绿豆淀粉的峰值黏度偏低,与其他淀粉存在显著性差异,其中马铃薯淀粉的峰值黏度达到 8 000.00 Pa·s。玉米淀粉、豌豆淀粉、木薯淀粉的回生值低,绿豆淀粉的回生值最高,

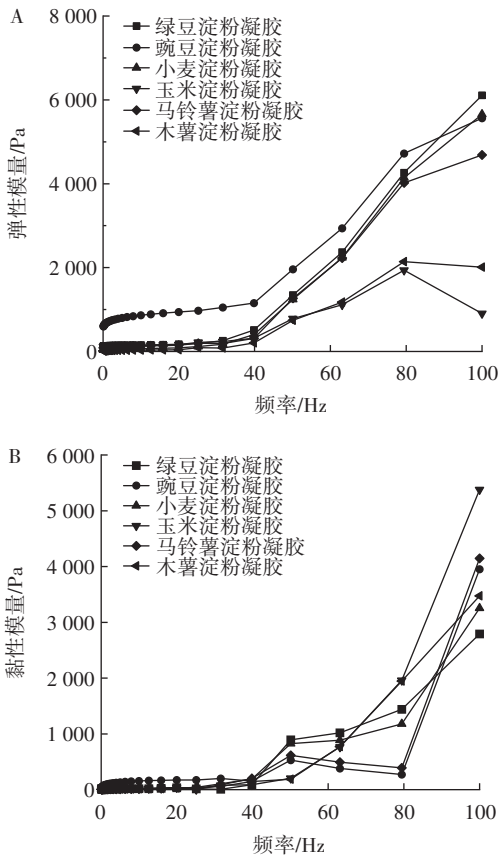


表3 不同来源淀粉糊化特性

Table 3 Gelatinization characteristics of starch of different sources

组别	峰值黏度/(Pa·s)	谷值黏度/(Pa·s)	衰减值/(Pa·s)	最终黏度/(Pa·s)	回生值/(Pa·s)	糊化时间/s	糊化温度/°C
玉米淀粉	2 930.00±3.61 ^e	2 300.00±57.66 ^e	630.00±60.25 ^e	3 301.00±37.32 ^d	1 001.00±94.78 ^d	5.60±0.04 ^b	78.60±0.48 ^b
小麦淀粉	2 629.00±37.98 ^f	1 941.00±84.33 ^d	688.00±86.52 ^e	3 186.00±74.80 ^d	1 246.00±32.32 ^c	6.80±0.12 ^a	84.00±0.83 ^a
绿豆淀粉	3 822.00±97.34 ^d	2 963.00±112.17 ^b	859.00±58.97 ^d	5 705.00±109.99 ^a	2 741.00±15.54 ^a	5.00±0.04 ^c	75.70±0.52 ^c
豌豆淀粉	4 847.00±36.01 ^e	1 882.00±45.91 ^d	2 965.00±37.81 ^b	2 895.00±122.01 ^e	1 013.00±97.62 ^d	4.00±0.00 ^e	70.90±0.03 ^e
马铃薯淀粉	8 000.00±0.00 ^a	1 585.00±94.45 ^e	6 414.00±94.45 ^a	3 968.00±80.99 ^e	2 383.00±13.50 ^b	3.10±0.07 ^f	68.20±0.39 ^f
木薯淀粉	5 724.00±121.17 ^b	3 418.00±82.72 ^a	2 305.00±38.59 ^e	4 517.00±63.00 ^b	1 099.00±123.41 ^d	4.70±0.08 ^d	72.90±0.41 ^d

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

表4 不同来源淀粉凝胶质构特性

Table 4 Texture characteristics of starch gel of different sources

组别	硬度/g	黏性/(g·s)	弹性	内聚性	胶着性/g	咀嚼性/(g·s)	回复性
玉米淀粉	10 462.00±7.07 ^b	1 889.68±6.36 ^a	0.26±0.00 ^d	0.13±0.04 ^f	1 357.96±21.92 ^d	348.98±7.07 ^d	0.03±0.12 ^e
小麦淀粉	4 029.01±42.43 ^e	1 916.81±77.78 ^a	0.27±0.01 ^d	0.16±0.00 ^e	639.29±12.73 ^e	173.67±7.07 ^e	0.04±0.00 ^d
绿豆淀粉	9 929.72±70.71 ^c	1 145.27±50.36 ^c	0.39±0.07 ^c	0.41±0.02 ^e	4 163.12±75.66 ^a	1 808.21±77.78 ^b	0.16±0.01 ^a
豌豆淀粉	4 248.40±134.35 ^d	769.89±7.07 ^d	0.98±0.04 ^a	0.54±0.01 ^a	2 458.18±148.49 ^e	2 404.68±72.83 ^a	0.09±0.13 ^b
马铃薯淀粉	12 829.20±91.92 ^a	1 929.48±71.42 ^a	0.37±0.01 ^c	0.25±0.01 ^d	3 209.10±77.07 ^b	1 165.58±77.78 ^c	0.08±0.23 ^b
木薯淀粉	1 085.46±1.41 ^f	1 441.17±59.40 ^b	0.59±0.02 ^b	0.49±0.01 ^b	528.07±14.14 ^e	319.89±7.79 ^d	0.08±0.12 ^e

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

马铃薯淀粉次之。在6种淀粉中小麦淀粉糊化温度最高,达到糊化的时间长。由表4可知,马铃薯淀粉凝胶呈现出良好的黏性,这与其糊化特性相符,但形成凝胶质地过硬。豌豆淀粉凝胶弹性最好,对比糊化过程中其回生值较低,可能在糊化过程中豌豆淀粉凝胶更不易老化回生,形成的凝胶具有良好的弹性。这与苏键

等^[27]的研究结果一致。

2.2 冷冻条件下复合凝胶质构特性、持水率和感官评价分析

表5为不同复合凝胶质构特性结果。

由表5可知,复合凝胶的硬度相较于纯魔芋凝胶会有所下降,随着淀粉添加量的变化,其硬度变化存在

表5 不同复合凝胶的质构特性

Table 5 Texture characteristics of different composite gels

组别	硬度/g	黏度/(g·s)	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性	回复性
绿豆:魔芋 1:9	743.900±23.048 ^d	-41.469±1.309 ^b	0.814±0.021 ^b	0.617±0.003 ^c	447.036±11.306 ^d	381.337±14.849 ^e	0.251±0.015 ^{bc}
豌豆:魔芋 1:9	740.380±69.605 ^d	-40.301±8.012 ^b	0.814±0.017 ^b	0.596±0.010 ^d	452.402±46.501 ^d	368.362±41.396 ^e	0.242±0.016 ^{bc}
小麦:魔芋 1:9	836.820±27.811 ^c	-129.478±26.462 ^c	0.850±0.025 ^a	0.671±0.007 ^a	561.717±17.477 ^c	472.520±32.078 ^{ab}	0.227±0.010 ^c
玉米:魔芋 1:9	894.917±11.760 ^{bc}	-26.563±2.165 ^{ab}	0.794±0.016 ^{bc}	0.616±0.010 ^c	551.550±7.651 ^c	437.893±10.519 ^b	0.269±0.002 ^b
马铃薯:魔芋 1:9	951.813±19.286 ^{ab}	-40.233±7.052 ^b	0.846±0.008 ^a	0.637±0.009 ^b	606.380±9.843 ^b	509.445±15.555 ^a	0.251±0.001 ^b
木薯:魔芋 1:9	746.837±44.802 ^d	-40.453±11.287 ^b	0.818±0.010 ^b	0.641±0.010 ^b	469.891±38.201 ^d	384.727±35.797 ^c	0.252±0.003 ^{bc}
魔芋	995.097±20.893 ^a	-16.140±2.661 ^a	0.778±0.003 ^c	0.612±0.014 ^c	656.137±19.643 ^a	497.848±6.875 ^a	0.300±0.034 ^a
绿豆:魔芋 2:8	622.357±16.949 ^{cd}	-36.714±2.266 ^b	0.827±0.006 ^b	0.652±0.015 ^a	405.485±2.728 ^c	335.315±4.779 ^c	0.273±0.007 ^{ab}
豌豆:魔芋 2:8	546.907±16.877 ^e	-49.128±1.919 ^c	0.817±0.020 ^{bc}	0.623±0.020 ^b	351.578±5.078 ^d	278.278±11.444 ^c	0.232±0.007 ^c
小麦:魔芋 2:8	688.317±31.377 ^b	-64.156±3.585 ^d	0.847±0.010 ^a	0.649±0.012 ^a	441.657±21.003 ^b	371.985±25.762 ^b	0.251±0.018 ^{bc}

续表5 不同复合凝胶的质构特性

Continue table 5 Texture characteristics of different composite gels

组别	硬度/g	黏度/(g·s)	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性	回复性
玉米:魔芋 2:8	669.837±20.619 ^b	-46.324±7.417 ^c	0.829±0.002 ^b	0.650±0.010 ^a	435.175±14.122 ^b	358.412±11.676 ^{bc}	0.258±0.004 ^{bc}
马铃薯:魔芋 2:8	619.280±33.504 ^d	-43.084±5.742 ^{bc}	0.800±0.006 ^c	0.617±0.006 ^b	356.123±21.449 ^d	306.868±23.018 ^d	0.244±0.005 ^{bc}
木薯:魔芋 2:8	658.827±28.153 ^{bc}	-49.614±6.896 ^c	0.848±0.015 ^a	0.660±0.013 ^a	428.636±19.257 ^{bc}	363.178±12.557 ^b	0.255±0.019 ^{bc}
魔芋	995.097±20.893 ^a	-16.140±2.661 ^a	0.778±0.003 ^d	0.612±0.014 ^b	656.137±19.643 ^a	497.848±6.875 ^a	0.300±0.034 ^a
绿豆:魔芋 3:7	612.540±30.933 ^{cd}	-53.529±10.795 ^d	0.897±0.007 ^a	0.645±0.004 ^a	426.373±14.747 ^{bc}	382.724±15.501 ^b	0.276±0.003 ^{ab}
豌豆:魔芋 3:7	621.090±28.039 ^{cd}	-30.847±2.691 ^{bc}	0.872±0.014 ^{bc}	0.662±0.012 ^a	410.652±12.291 ^{cd}	356.239±11.220 ^c	0.263±0.007 ^b
小麦:魔芋 3:7	637.603±5.649 ^{bc}	-50.230±5.490 ^d	0.890±0.020 ^{ab}	0.648±0.012 ^a	446.701±25.917 ^b	397.328±20.626 ^b	0.291±0.012 ^{ab}
玉米:魔芋 3:7	597.417±18.295 ^{cd}	-29.134±4.932 ^{bc}	0.843±0.005 ^d	0.627±0.005 ^b	381.218±11.182 ^d	321.543±10.986 ^d	0.279±0.005 ^{ab}
马铃薯:魔芋 3:7	594.647±3.743 ^d	-39.934±5.889 ^c	0.866±0.006 ^{cd}	0.647±0.010 ^a	384.643±8.495 ^d	338.119±4.024 ^{cd}	0.283±0.006 ^{ab}
木薯:魔芋 3:7	670.287±26.109 ^b	-28.777±2.813 ^b	0.895±0.015 ^a	0.649±0.003 ^a	435.157±15.388 ^{bc}	385.176±6.151 ^b	0.280±0.003 ^{ab}
魔芋	995.097±20.893 ^a	-16.140±2.661 ^a	0.778±0.003 ^c	0.612±0.014 ^b	656.137±19.643 ^a	497.848±6.875 ^a	0.300±0.034 ^a
绿豆:魔芋 4:6	433.320±10.352 ^b	-33.002±0.433 ^b	0.921±0.008 ^a	0.628±0.006 ^{abc}	255.430±15.504 ^{bcd}	233.712±10.548 ^b	0.326±0.010 ^a
豌豆:魔芋 4:6	388.163±8.008 ^c	-56.537±10.768 ^d	0.869±0.008 ^{cd}	0.608±0.007 ^c	236.241±7.565 ^d	205.188±5.268 ^c	0.250±0.004 ^c
小麦:魔芋 4:6	429.797±11.321 ^b	-48.552±4.014 ^c	0.858±0.002 ^d	0.613±0.017 ^{bc}	258.125±22.685 ^{bcd}	245.305±20.765 ^b	0.255±0.020 ^c
玉米:魔芋 4:6	420.287±12.100 ^b	-49.384±2.505 ^{cd}	0.879±0.014 ^{bc}	0.642±0.010 ^a	274.737±9.264 ^b	231.529±6.917 ^b	0.273±0.013 ^{bc}
马铃薯:魔芋 4:6	382.390±13.624 ^c	-44.281±3.085 ^c	0.913±0.016 ^a	0.632±0.016 ^{ab}	260.930±8.532 ^{bc}	237.740±7.063 ^b	0.310±0.020 ^a
木薯:魔芋 4:6	379.310±10.111 ^c	-50.605±3.098 ^{cd}	0.886±0.015 ^b	0.633±0.008 ^{ab}	240.232±6.689 ^{cd}	212.783±2.265 ^c	0.244±0.010 ^c
魔芋	995.097±20.893 ^a	-16.140±2.661 ^a	0.778±0.003 ^e	0.612±0.014 ^{bc}	656.137±19.643 ^a	497.848±6.875 ^a	0.300±0.034 ^{ab}
绿豆:魔芋 5:5	296.630±5.179 ^d	-28.001±1.863 ^c	0.920±0.004 ^{ab}	0.659±0.018 ^a	195.400±2.074 ^c	179.434±1.828 ^e	0.298±0.009 ^a
豌豆:魔芋 5:5	342.707±11.707 ^c	-39.763±3.292 ^f	0.920±0.008 ^{ab}	0.673±0.021 ^a	217.272±4.628 ^{bc}	199.810±3.845 ^{cd}	0.292±0.023 ^a
小麦:魔芋 5:5	382.697±18.620 ^b	-37.758±1.339 ^{cd}	0.894±0.012 ^c	0.650±0.021 ^{ab}	236.069±24.890 ^b	234.603±22.801 ^b	0.296±0.010 ^a
玉米:魔芋 5:5	304.523±3.701 ^d	-22.246±1.761 ^b	0.921±0.012 ^a	0.655±0.012 ^{ab}	201.900±3.742 ^c	185.127±5.513 ^{de}	0.288±0.004 ^a
马铃薯:魔芋 5:5	354.373±17.771 ^c	-31.565±1.551 ^d	0.923±0.007 ^a	0.677±0.015 ^a	226.285±17.950 ^b	208.137±17.538 ^c	0.317±0.005 ^a
木薯:魔芋 5:5	348.057±9.802 ^c	-35.780±2.217 ^c	0.907±0.004 ^b	0.627±0.015 ^{bc}	218.428±11.074 ^{bc}	197.112±11.740 ^{cdc}	0.280±0.004 ^a
魔芋	995.097±20.893 ^a	-16.140±2.661 ^a	0.778±0.003 ^d	0.612±0.014 ^c	656.137±19.643 ^a	497.848±6.875 ^a	0.300±0.034 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

差异,可能是因为魔芋凝胶形成过程中的碱液对淀粉性质产生了不同程度的影响^[29]。相较于纯魔芋凝胶,复合凝胶的弹性有一定程度的提高,当复配比例为5:5

时,整体上呈现出良好的弹性效果,随着淀粉添加量的减少,弹性相对下降,绿豆淀粉:魔芋质量比5:5、4:6形成的凝胶弹性较好,小麦淀粉与魔芋质量比1:9时

形成的凝胶弹性优于其他淀粉形成的复合凝胶。马铃薯淀粉与魔芋质量比在 1:9 条件下形成凝胶具有良好的咀嚼性优于纯魔芋凝胶。在 2:8 和 3:7 的质量比下,复合凝胶展现出优于纯魔芋凝胶的内聚性,说明通过添加淀粉可能对魔芋在碱性条件下形成的空间网络结构有一定填充,使凝胶结构更致密^[30]。

图 2 为不同复合凝胶持水性结果。

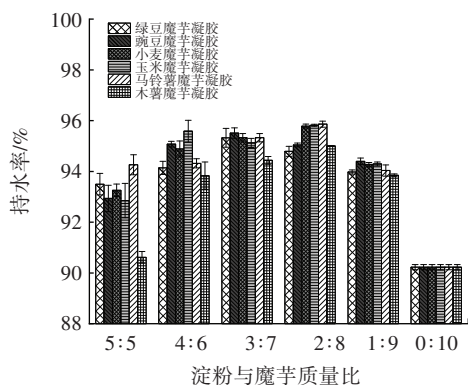


图 2 不同复合凝胶的持水性

Fig.2 Water holding capacity of different composite gels

由图 2 可知,当淀粉与魔芋质量比为 5:5 时,所形成的凝胶持水率较低,其中添加木薯淀粉所形成的凝胶其持水率在 5:5 的比例下最差。通过由淀粉代替部分魔芋粉形成复合凝胶的持水性存在一定程度的提升,这可能是淀粉具有良好的润胀力,有效吸收了凝胶冻融过程中析出的水分^[5]。

图 3 为不同复合凝胶感官评价结果。

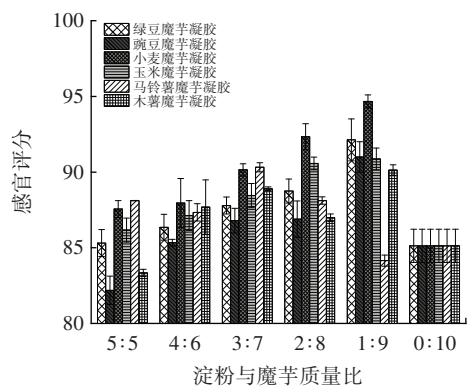


图 3 不同复合凝胶的感官评价

Fig.3 Sensory evaluation of different composite gels

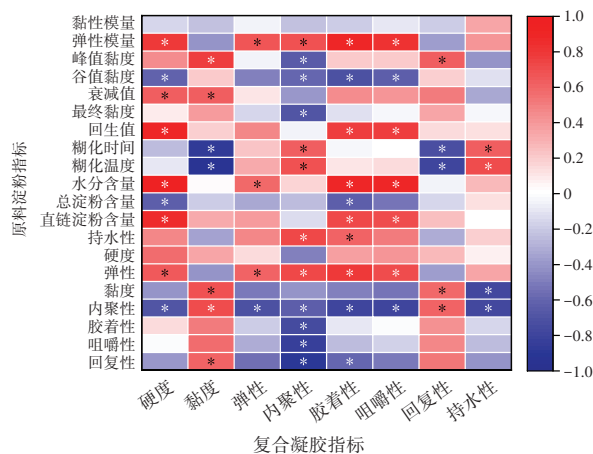
由图 3 可知,通过对凝胶进行感官评价,绿豆/魔芋凝胶组织结构紧密,未出现凝胶松散浑汤现象,质地较硬,色泽均匀,气味和谐,可能是因为绿豆淀粉回生值较高,凝胶硬度较强。豌豆淀粉/魔芋凝胶、木薯淀粉/魔芋凝胶质地较软,且木薯淀粉/魔芋凝胶在质量比 5:5 时出现组织结构不稳定、析水情况明显的问题。通过评分结果显示,小麦淀粉/魔芋凝胶品质较好,在

同一比例下相较于其他淀粉凝胶感官评分高。

6 种不同来源淀粉形成的复合凝胶在质构特性、持水性、感官品质中存在差异性,可以说明不同来源淀粉由于本身性质存在差异对魔芋凝胶品质产生不同程度的影响。

2.3 淀粉的基本品质特征与复合凝胶凝胶特性相关性分析

图 4 为淀粉的基本品质特征与复合凝胶凝胶特性相关性分析结果。



*表示相关性显著, $p < 0.05$ 。

图 4 不同来源淀粉基本理化特性与复配凝胶特性相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between basic physicochemical properties of starch of different sources and properties of composite gel

由图 4 可知,复配凝胶的品质(硬度、胶着性、咀嚼性)与淀粉的直链淀粉含量、回生值呈显著正相关($p < 0.05$),因此可以通过调控其添加淀粉原料的直链淀粉含量提升复配凝胶的品质^[16]。原料淀粉凝胶的持水性与复配凝胶的内聚性呈显著正相关($p < 0.05$),可见淀粉原料的持水性特征对复配凝胶的品质存在积极影响^[28]。淀粉原料的糊化特性中糊化温度、糊化时间与复合凝胶的持水性呈显著正相关,可见在复合凝胶形成过程中凝胶的加热温度对凝胶品质存在一定影响,调控凝胶形成温度对提升复合凝胶品质有重要的作用。淀粉凝胶品质中黏度、内聚性与复合凝胶的黏度及回复性呈显著正相关($p < 0.05$),与复合凝胶持水性呈显著负相关($p < 0.05$)。这是因为淀粉与魔芋相互作用形成凝胶时分子结构的相互作用会改变复合凝胶品质特性^[20]。

2.4 淀粉/魔芋复合凝胶品质主要影响因素主成分分析

表 6 为复合凝胶品质的相关性分析。

由表 6 可知,回复性与其他指标相关性最好,受 6 个指标影响,其中与弹性呈极显著正相关($p < 0.01$);硬度、弹性、胶着性、咀嚼性及持水性与其他指标相关

表6 复合凝胶品质的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of the quality of composite gel

	硬度	黏度	弹性	内聚性	胶着性	咀嚼性	回复性	持水性
硬度	1							
黏度	0.145	1						
弹性	-0.777**	-0.052	1					
黏着性	-0.226	0.209	0.519**	1				
胶着性	0.991**	0.177	-0.724**	-0.150	1			
咀嚼性	0.977**	0.213	-0.660**	-0.098	0.990**	1		
回复性	-0.404*	-0.536**	0.597**	0.262	-0.370*	-0.356*	1	
持水性	0.600**	0.236	-0.591**	-0.207	0.591**	0.577**	-0.459**	1

注:*表示相关性显著, $p<0.05$;**表示相关性极显著, $p<0.01$ 。

性较好,受到5个指标的影响;黏度受到1个指标的影响。可知,各指标之间均存在不同程度的相关性,从而导致各指标所提供的信息发生相互重叠,因此有必要选取具有代表性的评价指标。

表7为复合凝胶品质主成分分析特征值、贡献率及指标权重结果。图5为主成分分析碎石图。表8为复配凝胶主成分得分、综合得分及综合得分排名结果。

对6种不同来源淀粉的不同质量比复配魔芋凝胶的凝胶品质指标进行主成分分析。结合表7和图5,

表7 主成分的特征值、贡献率及指标权重

Table 7 Eigenvalues, contribution rates, and indicator weights of principal components

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	4.473	55.913	55.913
2	1.367	17.088	73.001
3	1.171	14.640	87.641
4	0.506	6.325	93.966
5	0.333	4.158	98.124
6	0.139	1.738	99.861
7	0.007	0.084	99.945
8	0.004	0.055	100

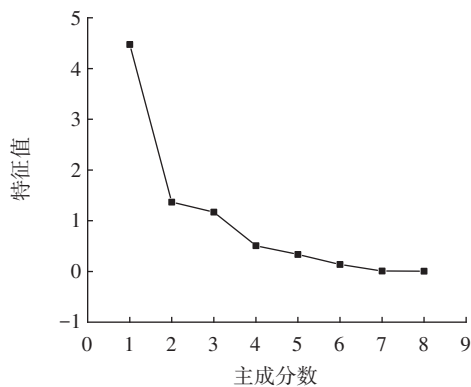


图5 主成分分析碎石图

Fig.5 Gravel plot of principal component analysis

表8 复配凝胶主成分得分、综合得分及综合得分排名

Table 8 Principal component score, comprehensive score and comprehensive score ranking of composite gel

凝胶种类	主成分1	主成分2	主成分3	综合得分	综合排名
A1	-1.142	-0.624	0.672	-64.690	28
A2	-0.654	-1.257	0.157	-55.810	24
A3	0.390	0.157	0.807	36.320	10
A4	0.475	-0.180	0.129	25.370	13
A5	0.602	0.203	-1.125	20.650	14
B1	-1.023	-0.262	1.368	-41.660	21
B2	-1.360	1.108	-1.462	-78.530	30
B3	0.481	-0.195	0.696	33.770	11
B4	-0.377	1.142	-1.368	-21.590	19
B5	0.410	0.338	-1.978	-0.260	16
C1	-0.960	-0.669	0.591	-56.440	25
C2	-1.009	0.675	-1.324	-64.240	27
C3	0.652	-0.284	1.008	46.360	7
C4	0.501	1.056	0.430	52.340	5
C5	1.148	3.493	2.091	154.490	1
D1	-1.188	-0.678	0.429	-71.740	29
D2	-0.753	0.457	-0.041	-34.890	20
D3	0.156	-0.645	-0.628	-11.490	17
D4	0.570	0.377	0.138	40.30	9
D5	1.487	-0.817	-1.082	53.350	4
E1	-0.881	-1.158	1.757	-43.340	22
E2	-0.838	-0.591	0.216	-53.760	23
E3	0.282	-0.332	0.389	15.770	15
E4	-0.083	0.601	-1.555	-17.160	18
E5	1.812	-0.119	0.234	102.700	2
F1	-1.649	-0.676	-0.222	-106.970	31
F2	-1.287	1.002	-0.542	-62.770	26
F3	0.613	-0.825	0.738	30.980	12
F4	0.560	0.573	0.617	50.120	6
F5	0.824	0.203	-0.259	45.750	8
G	2.242	-2.073	-0.88038	77.060	3

注:A为绿豆;B为豌豆;C为小麦;D为玉米;E为马铃薯;F为木薯;G为纯魔芋凝胶;1~5为淀粉与魔芋质量比5:5、4:6、3:7、2:8、1:9。

根据碎石图中较陡峭的折点数且特征值大于1的条件,可提取出3个主成分,第一主成分、第二主成分、第三主成分的特征值分别为4.473、1.367、1.171,其累积方差贡献率分别为55.913、73.001、87.641(表7)。说明前3个主成分能够综合复配凝胶品质指标的绝大部分信息,因此可以使用这3个主成分代替上述8个品质指标对淀粉/魔芋凝胶品质进行评价。通过分析可知,表8中为各个样品对应的3个主成分的得分(F1、F2、F3),根据综合得分对6种不同复配比例凝胶品质进行综合排序(表8),得出凝胶综合品质优劣顺序为C5(小麦1:9)>E5(马铃薯1:9)>G(纯魔芋凝胶)>D5(玉米1:9)>C4(小麦2:8)>F4(木薯2:8)>C3(小麦3:7)>F5(木薯1:9)>D4(玉米2:8)>A3(绿豆3:7)。

虽然纯魔芋凝胶综合评分较高,但是通过感官评价可知纯魔芋凝胶色泽偏重,凝胶保持弹性的同时其硬度较高,凝胶质地较硬基本不具有弹性。但在淀粉/魔芋复合凝胶中,在降低其硬度的基础上,使其弹性有所提升,经冷冻处理后其内聚性也有相应程度的提高。结合主成分分析与感官评价的结果,表明小麦淀粉、马铃薯淀粉、玉米淀粉代替部分魔芋粉形成凝胶在比例为1:9复合质量比下呈现良好的凝胶状态,其软硬程度、弹性和色泽均有明显的改善,其凝胶的持水能力相较于纯魔芋凝胶也有一定的提升。

3 结论

本文研究不同来源淀粉/魔芋凝胶在冻融条件下凝胶品质特性,并通过主成分分析以及相关分析,筛选出对魔芋凝胶凝胶特性有积极影响的淀粉种类及适宜的添加比例,分析探究其淀粉的品质特性对复配凝胶品质的影响因素。结果表明,小麦淀粉代替部分魔芋粉形成的复合凝胶具有更好的凝胶品质和持水性能,小麦淀粉/魔芋凝胶在添加质量比为1:9、2:8和3:7所形成的凝胶品质综合评分均较好,马铃薯、玉米淀粉的复合凝胶次之。说明不同来源淀粉对复合凝胶凝胶特性影响不同。同时,试验结果证明通过添加淀粉能提高复合凝胶的黏弹性,在硬度降低的同时提高了弹性品质,其内聚性也有相应的提高。因此添加淀粉制备复合凝胶在一定程度上能够解决魔芋凝胶现存问题并对魔芋凝胶产品的开发与应用提供理论依据。在后续的研究中可以进一步探究淀粉对魔芋凝胶形成品质的影响机制。

参考文献:

[1] 李晶. 冷冻影响脱乙酰魔芋葡甘聚糖凝胶的机制与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
LI Jing. The impact mechanism of freezing process on deacetylated konjac glucomannan gel and its application[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.

[2] 王元. 魔芋葡甘聚糖的结构及保健功能研究[J]. 现代食品, 2021(7): 113-115.
WANG Yuan. Study on the structure and health function of konjac glucomannan[J]. Modern Food, 2021(7): 113-115.

[3] BEHERA S S, RAY R C. Konjac glucomannan, a promising polysaccharide of *Amorphophallus konjac* K. Koch in health care[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 942-956.

[4] 严竟, 王亚楠, 胡梅, 等. 解冻方式对冷冻魔芋葡甘聚糖凝胶特性和结构的影响[J/OL]. 食品与发酵工业(2023-01-20) [2023-09-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034493>.
YAN Jing, WANG Yanan, HU Mei, et al. Effect of thawing method on gel characteristics and structure of frozen konjac glucomannan gel[J/OL]. Food and Fermentation Industry (2023-01-20) [2023-09-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034493>.

[5] 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.

[6] 邱诗波, 邓鹏鹏, 钱虹, 等. 魔芋葡甘聚糖凝胶的研究进展[J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44(4): 355-362.
QIU Shibo, DENG Pengpeng, QIAN Hong, et al. Research progress in konjac glucomannan gel[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2022, 44(4): 355-362.

[7] 王思念, 伍娟, 李莹芳, 等. 马铃薯/乳清蛋白复合凝胶的性质和微观结构[J]. 精细化工, 2022, 39(12): 2541-2549.
WANG Sinian, WU Juan, LI Kunfang, et al. Properties and microstructure of potato/whey protein mixed gels[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(12): 2541-2549.

[8] SU X L, CUI W, ZHANG Z, et al. Effects of L-lysine and L-arginine on the structure and gel properties of konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108404.

[9] WU D, YU S M, LIANG H S, et al. The influence of deacetylation degree of konjac glucomannan on rheological and gel properties of konjac glucomannan/ κ -carrageenan mixed system[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105523.

[10] 贺隆基, 李世奇, 陈志刚. 红薯淀粉和大豆分离蛋白对魔芋凝胶特性的影响及复合凝胶的制备[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 58-67.
HE Longji, LI Shiqi, CHEN Zhigang. Effects of sweet potato starch and soybean protein isolate on konjac gel properties and preparation of composite gels[J]. Food Science, 2023, 44(24): 58-67.

[11] OUYANG H, KILCAWLEY K N, MIAO S, et al. Effect of konjac glucomannan and soy soluble polysaccharides on the rheological, microstructural and synergetic properties of rennet gels[J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 168: 113905.

[12] YANG X, LI A Q, LI D, et al. Improved physical properties of konjac glucomannan gels by co-incubating composite konjac glucomannan/xanthan systems under alkaline conditions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105870.

[13] LAI R, LIU Y W, LIU J. Properties of the konjac glucomannan and zein composite gel with or without freeze-thaw treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106700.

[14] 望运滔, 陈曦, 梁晴, 等. 魔芋胶与卡拉胶复配对热诱导大豆分离蛋白乳液凝胶特性的影响[J]. 轻工学报, 2023, 38(5): 17-25.
WANG Yuntao, CHEN Xi, LIANG Qing, et al. Effects of different proportions of konjac gum and carrageenan on heat induced gel properties of soybean protein isolate emulsion gel[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(5): 17-25.

[15] 李振宇. 阿拉伯胶对魔芋葡甘聚糖凝胶性质的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

- LI Zhenyu. Effect of gum Arabic on konjac glucomannan gel properties[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [16] ZOU J H, LI Y, WANG F, et al. Relationship between structure and functional properties of starch from different cassava (*Manihot esculenta* Crantz) and yam (*Dioscorea opposita* Thunb) cultivars used for food and industrial processing[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114261.
- [17] 杨少湘. 魔芋葡甘聚糖纯化及其与淀粉复配协同作用研究[D]. 福州:福建农林大学, 2013.
YANG Shaoxiang. Study on purification of KGM and its cooperative effect with starches blend gels[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [18] LI J H, ZHU M, GU L P, et al. Freeze-thaw stability of konjac glucomannan hydrogels supplemented with natural tapioca/corn starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182: 114841.
- [19] 王鑫, 黄瑾, 吴瑀婕, 等. 瓜尔豆胶与魔芋胶复配联合超声处理改善鸡血豆腐的品质[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 145-151.
WANG Xin, HUANG Jin, WU Yujie, et al. Improved quality of chicken blood tofu by addition of guar bean gum and konjac gum combined with ultrasonic treatment[J]. Food Science, 2021, 42(23): 145-151.
- [20] 吴楚云, 陈慧敏, 吴颖, 等. 临界熔融协同冻融处理对木薯淀粉/魔芋胶复配物理化及结构特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 47-55.
WU Chuyun, CHEN Huimin, WU Ying, et al. Effect of critical melting combined with freeze-thawing treatment on physicochemical and structural properties of cassava starch/konjac gum composite[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 47-55.
- [21] 焦晓佳, 邓坤鑫, 魏慧婷, 等. 精制对魔芋葡甘聚糖及其与κ-卡拉胶复配凝胶性质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 81-89.
JIAO Xiaojia, DENG Kunxin, WEI Huiting, et al. Effects of refining on konjac glucomannan and gel properties of its blend with κ-carrageenan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 81-89.
- [22] 徐聪, 栗俊广, 张旭玥, 等. 不同木薯淀粉对冻融魔芋葡甘聚糖凝胶特性的比较分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 145-151.
XU Cong, LI Janguang, ZHANG Xuyue, et al. Comparative analysis of gel properties of different cassava starch to freeze-thaw konjac glucomannan gels[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 145-151.
- [23] LI L, ZHANG L, HAN Y, et al. Effect of the addition of mung bean, corn, and sweet potato starch on the properties of konjac gel[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(12): 3094-3101.
- [24] ZHANG Q, YAN S C, ZHOU R, et al. Effect of blending ratio on the compatibility and stability of konjac glucomannan/starch composite systems[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109213.
- [25] 徐兵. 脱支淀粉-魔芋复合凝胶的制备及特性研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2021.
XU Bing. Preparation and characterization of debranched starch-konjac composite gel[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [26] 韩扬, 宗绪岩, 赵海锋, 等. 绿豆淀粉魔芋凝胶基体的制备及性能表征[J]. 现代食品科技, 2022, 38(6): 191-197, 279.
HAN Yang, ZONG Xuyan, ZHAO Haifeng, et al. Preparation and characterization of konjac gel with added mung bean starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(6): 191-197, 279.
- [27] 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, 56.
SU Jian, LI Zhenyu. Study on hydration and gelatinization properties of starch from different sources[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(8): 43-46, 56.
- [28] WANG H, ZENG J, GAO H Y, et al. Freezing and regeneration characteristics of incompletely gelatinized potato starch gels[J]. International Journal of Food Engineering, 2023, 19(6): 247-255.
- [29] 缪文慧, 鲁佩杰, 王明辉, 等. 基于淀粉回生处理的淀粉凝胶食品品质评价研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 365-373.
MIAO Wenhui, LU Peijie, WANG Minghui, et al. Research on quality evaluation of starch gel foods based on starch retrogradation[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 365-373.
- [30] RAN X L, YANG H S. Promoted strain-hardening and crystallinity of a soy protein-konjac glucomannan complex gel by konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107959.

加工编辑:孟琬星
收稿日期:2023-12-08