

小麦淀粉与马铃薯淀粉、豌豆淀粉 共混物的糊化与凝胶特性

李淑月, 林江涛*, 岳清华*, 郑雁, 李心灵, 曾佳
(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 研究了小麦淀粉分别与马铃薯淀粉、豌豆淀粉以不同比例混合后淀粉混合物的糊化特性、流变学特性和凝胶特性等。结果表明: 小麦淀粉的峰值黏度 (2 430.50 Pa·s) 等糊化特性参数低于马铃薯淀粉 (9 001.02 Pa·s) 和豌豆淀粉 (2 644.50 Pa·s), 而糊化温度 (90.70 °C) 高于马铃薯淀粉 (67.05 °C) 和豌豆淀粉 (73.95 °C)。两种混合淀粉体系的糊化特性值在小麦淀粉和马铃薯淀粉、小麦淀粉和豌豆淀粉的值之间发生变化。凝胶的质构和水分子状态等参数有相似的特性变化规律。小麦淀粉的模量 (G' 为 4 770.85 Pa、 G'' 为 453.80 Pa) 高于马铃薯淀粉 (G' 为 1 392.46 Pa、 G'' 为 175.65 Pa) 和豌豆淀粉 (G' 为 3 256.89 Pa、 G'' 为 275.36 Pa), 两种混合淀粉体系的储能模量和损耗模量在小麦淀粉和马铃薯淀粉、小麦淀粉和豌豆淀粉的值之间发生变化。马铃薯淀粉 (7.84 J/g) 和豌豆淀粉 (8.18 J/g) 的热焓值小于小麦淀粉 (13.06 J/g), 小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉热焓值降低。综上所述, 小麦淀粉分别与马铃薯淀粉和豌豆淀粉混合使得混合淀粉的性质发生不同程度的改变, 可为淀粉的天然改性提供一定的理论依据。

关键词: 小麦淀粉; 马铃薯淀粉; 豌豆淀粉; 糊化; 凝胶

文章编号: 1673-9078(2024)05-181-188

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0649

Gelatinization and Gelling Properties of Blends of Wheat Starch and Potato Starch or Pea Starch

LI Shuyue, LIN Jiangtao*, YUE Qinghua*, ZHENG Yan, LI Xinling, ZENG Jia

(College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The gelatinization, rheological and gel properties of the starch mixtures obtained through mixing wheat starch with potato starch or pea starch in different proportions were studied. The results show that the gelatinization characteristic parameters such as the peak viscosity of wheat starch (2 430.50 Pa·s) were lower than those of potato starch (9 001.02 Pa·s) and pea starch (2 644.50 Pa·s), whereas, the gelatinization temperature of wheat starch (90.70 °C) was higher than those of potato starch (67.05 °C) and pea starch (73.95 °C). The gelatinization characteristic values of the two mixed starch systems

引文格式:

李淑月, 林江涛, 岳清华, 等. 小麦淀粉与马铃薯淀粉、豌豆淀粉共混物的糊化与凝胶特性[J]. 现代食品科技, 2024, 40(5): 181-188.

LI Shuyue, LIN Jiangtao, YUE Qinghua, et al. Gelatinization and gelling properties of blends of wheat starch and potato starch or pea starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 181-188.

收稿日期: 2023-05-31

基金项目: 河南省重大科技专项项目 (221100110700); 青年科学基金项目 (32101985)

作者简介: 李淑月 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 谷物加工技术与品质, E-mail: 850904795@qq.com

通讯作者: 林江涛 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物加工技术与品质, E-mail: hautlin@126.com; 共同通讯作者: 岳清华 (1988-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 谷物科学与加工技术, E-mail: yqhlst1208@126.com

varied between the values of the wheat starch and potato starch, and those of the wheat starch and pea starch. Parameters such as the texture of the gel and the state of water molecules exhibited similar characteristics. The moduli of wheat starch (G' , 4 770.85 Pa; G'' , 453.80 Pa) were higher than those of potato starch (G' , 1 392.46 Pa; G'' , 175.65 Pa) and pea starch (G' , 3 256.89 Pa; G'' , 275.36 Pa). The storage modulus and loss modulus of the two mixed starch systems varied between the values of wheat starch-potato starch and wheat starch-pea starch. The enthalpy values of potato starch (7.84 J/g) and pea starch (8.18 J/g) were lower than that of wheat starch (13.06 J/g), with the enthalpy values of wheat starch-potato starch and wheat starch-pea starch being reduced. In summary, mixing wheat starch with potato starch or pea starch could change the properties of the mixed starch to different extents, which can provide a certain theoretical basis for the natural modification of starch.

Key words: wheat starch; potato starch; pea starch; gelatinization; gel properties

淀粉是植物的重要储能物质，不同来源的淀粉因其颗粒形态如颗粒大小、结晶度等和分子结构不同导致物理和化学性质存在显著差异。在实际应用中，单一淀粉因为不能耐酸和高温、稳定性较差、抗剪切能力较低，凝胶能力不强等不满足工厂需求^[1]。随着现代社会的发展，人们越来越重视食品的健康安全，按一定的比例混合不同来源的淀粉，可以得到与化学改性淀粉相似的性质^[2]，同时保持了未改性淀粉的安全性和天然性。淀粉可应用于食品加工中作为增稠剂、稳定剂和脂肪替代品，也可应用于纺织、造纸、化妆品等工业^[3]。Liu等^[4]将小麦淀粉和大米淀粉共混后发现在DSC研究中观察到小麦和大米淀粉混合物的两个糊化峰。先溶胀崩解的淀粉会利用体系中的水分，使得后糊化崩解的淀粉颗粒可利用的水分减少。罗会芳等^[5]将玉米淀粉与马铃薯淀粉按不同比例混合后，发现混合物的大部分相关特性参数在两种纯淀粉对应参数值之间但不呈对应关系，两种纯淀粉分子间发生相互作用使得淀粉性质发生改变。Zhu等^[6]研究发现，红薯淀粉与小麦淀粉复配体系中共混物的直链淀粉浸出程度、糊化和凝胶特性都发生了不同的变化。在本研究中，为了解释混合淀粉的整体糊化和凝胶特性，小麦淀粉（WS）被选为固定淀粉组分，而马铃薯淀粉（PS）、豌豆淀粉（WD）被选为淀粉对应物。研究了小麦淀粉与马铃薯淀粉、豌豆淀粉按100:0、75:25、50:50、25:75和0:100的质量比共混淀粉的糊化特性、流变特性、凝胶特性等。

1 材料与方法

1.1 材料

小麦淀粉，河南新乡良润全谷物食品有限公司；马铃薯淀粉，哈尔滨鑫永耀食品有限公司；豌豆淀

粉，宿州市皖神面制品有限公司。

1.2 仪器与设备

RVA-TM型快速黏度分析仪，瑞典PERTEN公司；差示扫描量热仪，美国Perkin Elmer有限公司；MARS60哈克流变仪，美国Thermo Fisher Scientific公司；TZ-XT Plus型质构仪，德国Stable Micro Systems公司；变温型核磁共振食品农业成像分析仪，上海纽迈电子科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 糊化特性测试

小麦淀粉与马铃薯淀粉、小麦淀粉与豌豆淀粉按质量比为100:0、75:25、50:50、25:75和0:100混合均匀。在特制的RVA铝盒中分别加入3 g样品和25 g蒸馏水，并用旋浆将其上下搅拌几次，放入快速黏度仪（RVA）中测试，在50℃下保持60 s，随后加热至150℃保持150 s，再冷却至50℃保持60 s。加热和冷却速率为0.2℃/s。测得小麦淀粉和两种不同来源淀粉混合的糊化特性。

1.3.2 热特性分析

参照罗会芳等^[5]方法，在差示扫描量热仪专用铝盒中分别添加不同质量比的小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉3 mg和6 μL蒸馏水密封，随后在室温下平衡水分24 h进行DSC测试，充入氮气的流量为60 mL/min，升温速率为10℃/min，温度测定范围为20~100℃。

1.3.3 流变学特性分析

参照张丹丹等^[7]方法，称取0.3 g不同质量比的小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉和5 mL蒸馏水混合均匀于烧杯中，先在45℃水浴中进行搅拌30 min，随后放置于95℃恒温水浴30 min，

最后冷却至室温。将制成的淀粉糊放置于流变仪中进行测试,样品间距 1 000 μm ,测试温度 25 $^{\circ}\text{C}$,应变为 2%,频率扫描范围 1~10 Hz。

1.3.4 淀粉凝胶的制备

称取 3 g 不同质量比的小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉和 25 g 蒸馏水混合均匀放置于烧杯中。将混合后的淀粉悬浮液于 45 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中搅拌 30 min,再将其放入 95 $^{\circ}\text{C}$ 的水浴 15 min,取出烧杯用保鲜膜覆盖冷却至室温,再将样品放置在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下 24 h。用于凝胶质构测定和水分子状态测定。

1.3.5 质构分析

取出 1.3.4 所制备的凝胶样品使其恢复到室温,将样品切成圆柱体,放于质构仪上进行质构测试,测试探头型号为 P/0.5 R,测前、中、后速率为 1、1、10 mm/s,压缩距离 1.0 cm,触发力 5 g。

1.3.6 水分子状态分析

参照丁燕燕等^[8]方法利用低场核磁共振技术分析淀粉凝胶中的水分子状态。将 1.3.4 所制成的凝胶样品精确称取 2 g 移至到 15 mm 核磁管中进行低场核磁共振实验。利用多脉冲回波序列 (CPMG) 进行横向弛豫时间 (T_2) 的测定。

1.4 数据处理

采用 Origin 2018 进行图表绘制,运用数据分析软件 SPSS 对数据进行显著性分析。每次实验重复 3 次,采用平均值 \pm 标准差表示。

2 结果与分析

2.1 糊化特性

小麦淀粉和两种不同来源淀粉及其混合物的糊化特性如图 1 所示。从图中可以看到,马铃薯淀粉糊化特征曲线为尖峰状曲线,这可能是马铃薯淀粉颗粒较大在加热时容易膨胀崩解。温度下降阶段,崩解溢出的直链淀粉分子重新缠结环绕形成三维网络结构而引起黏度迅速增加^[9]。这与罗会芳等^[5]研究马铃薯淀粉与玉米淀粉共混糊化曲线趋势变化相似。小麦淀粉和豌豆淀粉的糊化特征曲线为较低的宽峰曲线,这可能是由于小麦淀粉和豌豆淀粉颗粒大小不一,在加热糊化时大颗粒淀粉首先膨胀崩解,小颗粒淀粉糊化温度较高与大颗粒淀粉不能同时溶胀崩解导致黏度增加较为平缓^[10]。淀粉混合物糊化的峰值黏度在马铃薯淀粉和小麦淀粉之间,最终黏

度比马铃薯淀粉和小麦淀粉高。WS/WD 混合体系糊化行为曲线不同于 WS/PS 混合体系,淀粉混合物的峰值黏度均低于小麦淀粉和豌豆淀粉,最终黏度处于小麦淀粉和豌豆淀粉之间。

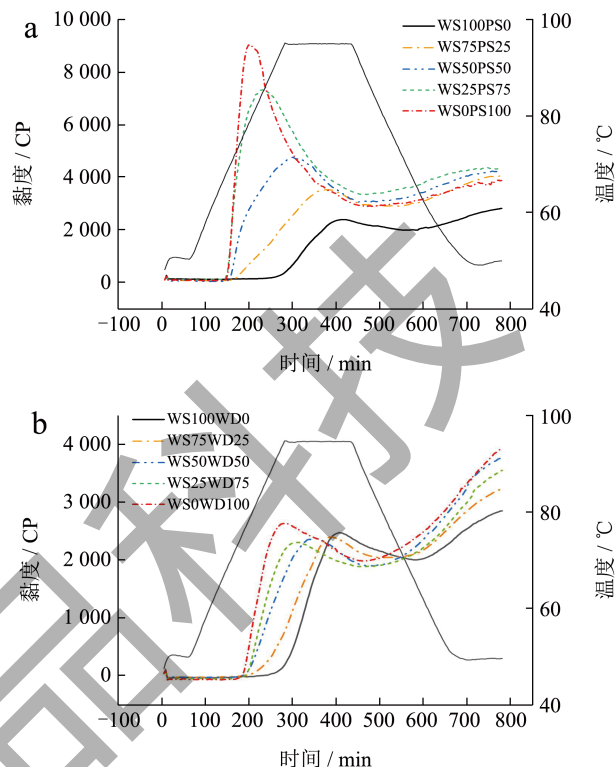


图 1 不同比例小麦与马铃薯混合淀粉 (a)、小麦与豌豆混合淀粉 (b) 糊化特性 (RVA)

Fig.1 Different proportions of wheat and potato starch (a), wheat and pea starch (b) gelatinization characteristics (RVA)

淀粉混合体系的糊化特性参数如表 1 所示。马铃薯淀粉峰值黏度、最低黏度、和回生值等糊化特性参数比小麦淀粉高,峰值时间和糊化温度比小麦淀粉低。原因是马铃薯淀粉颗粒比小麦淀粉颗粒在加热糊化时更容易发生崩解、破裂。且马铃薯淀粉具有带电的磷酸基团,可以使淀粉在糊化时具有较高的黏度^[11]。豌豆淀粉比小麦淀粉拥有更低的糊化温度和更短的峰值时间。但峰值黏度、最低黏度和回生值等糊化特性参数均高于小麦淀粉。WS/PS 混合体系中,随着马铃薯比例的增加,淀粉混合物的峰值黏度呈现上升趋势。说明混合淀粉体系在糊化过程中,其淀粉颗粒在彻底破裂前膨胀的最大程度增大,与水结合的能力逐渐提高^[12]。混合淀粉体系的崩解值介于小麦淀粉和马铃薯淀粉之间呈现逐渐增大的趋势,表明在糊化过程中小麦淀粉与马铃薯淀粉存在着一种相互作用,使得淀粉混合体系黏度增加,淀粉颗粒受到的剪切力增大,淀粉更容易溶

胀破裂，从而导致崩解值增大。混合淀粉体系比小麦淀粉和马铃薯淀粉具有更高的最低黏度和最终黏度，回生值介于两种淀粉之间，且都随着添加马铃薯淀粉比例的增加而增加^[13]。研究发现由于淀粉糊在冷却过程中淀粉分子间发生了氢键的重新结合，分子间聚集程度增大，使得三维网状结构更加稳定从而提高了最终黏度和回生值^[14]。WS/WD 混合体系中，其峰值黏度、崩解值呈下降趋势且小于单一淀粉的值。原因是由于豌豆淀粉直链淀粉含量较大，随着豌豆淀粉比例的增加，在淀粉结晶区会有直链

淀粉与支链淀粉相互缠结进入其中；直链淀粉会限制支链淀粉的扩展从而对淀粉糊化产生了抑制作用，导致峰值粘度降低^[15]。同时豌豆淀粉和小麦淀粉混合能够使淀粉颗粒在加热和剪切力作用下保持完整性使得崩解值降低^[16]。其最低黏度、最终黏度、回生值等糊化特征参数在小麦淀粉和豌豆淀粉之间且呈现先增高后降低的趋势。两种混合淀粉体系的峰值时间和糊化温度都随着两种不同来源淀粉添加比例的增加而降低，说明添加这两种不同来源的淀粉使混合淀粉体系较易糊化。

表 1 不同比例小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉糊化特性参数

Table 1 Gelatinization characteristics of mixed starch of wheat and potato and mixed starch of wheat and pea in different proportions

样品	峰值黏度	最低黏度	崩解值	最终黏度	回生值	峰值时间/h	糊化温度/℃
WS100PS0	2 430.50 ± 68.59 ^e	1 861.05 ± 21.92 ^b	546.50 ± 8.68 ^c	2 735.56 ± 102.53 ^c	874.53 ± 8.61 ^c	6.98 ± 0.23 ^a	90.70 ± 0.57 ^a
WS75PS25	3 540.03 ± 24.04 ^d	3 053.50 ± 23.91 ^{ab}	597.03 ± 9.59 ^c	4 100.53 ± 83.43 ^a	1 099.05 ± 61.52 ^{ab}	6.58 ± 0.28 ^a	70.98 ± 0.035 ^b
WS50PS50	4 710.05 ± 67.88 ^c	3 032.50 ± 9.19 ^{ab}	1 677.52 ± 58.69 ^c	4 169.52 ± 74.24 ^a	1 137.60 ± 65.05 ^b	4.95 ± 0.04 ^b	68.20 ± 1.13 ^c
WS25PS75	7 019.16 ± 42.90 ^b	3 335.08 ± 84.85 ^a	3 712.51 ± 38.53 ^b	4 175.57 ± 177.48 ^a	1 152.03 ± 62.93 ^b	3.95 ± 0.14 ^c	67.03 ± 1.13 ^c
WS0PS100	9 001.02 ± 45.25 ^a	2 128.07 ± 107.38 ^{ab}	6 873.06 ± 102.81 ^a	3 750.06 ± 166.88 ^b	1 622.15 ± 96.51 ^a	3.29 ± 0.05 ^d	67.05 ± 0.07 ^c
WS100WD0	2 430.50 ± 68.59 ^b	1 861.50 ± 21.92 ^c	546.50 ± 8.69 ^b	2 735.57 ± 102.53 ^d	874.63 ± 8.61 ^d	6.98 ± 0.05 ^a	90.70 ± 0.57 ^a
WS75WD25	2 408.05 ± 31.11 ^{bc}	2 028.07 ± 60.81 ^a	353.53 ± 7.78 ^d	3 220.32 ± 72.12 ^c	1 199.57 ± 1.41 ^c	6.49 ± 0.04 ^b	81.22 ± 0.33 ^b
WS50WD50	2 385.50 ± 27.58 ^{bc}	1 913.50 ± 21.92 ^{bc}	472.02 ± 5.66 ^c	3 790.52 ± 40.31 ^a	1 877.26 ± 18.38 ^a	5.82 ± 0.05 ^c	75.43 ± 1.59 ^c
WS25WD75	2 321.50 ± 21.92 ^c	1 896.53 ± 28.99 ^{bc}	414.50 ± 7.78 ^{cd}	3 548.34 ± 45.25 ^b	1 645.28 ± 25.46 ^b	5.11 ± 0.11 ^d	76.15 ± 0.78 ^c
WS0PS100	2 644.50 ± 30.41 ^a	1 984.56 ± 44.55 ^b	644.53 ± 7.78 ^a	3 931.56 ± 51.62 ^a	1 929.37 ± 32.53 ^a	4.66 ± 0.09 ^e	73.95 ± 0.49 ^c

注：同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)；WS 为小麦淀粉，PS 为马铃薯淀粉，WD 为豌豆淀粉。下同。

表 2 不同比例小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉热特性参数

Table 2 Thermal characteristics of mixed starch of wheat and potato and mixed starch of wheat and pea in different proportions

样品	起始温度 $T_0/℃$	峰值温度 $T_p/℃$	终止温度 $T_c/℃$	焓变 $\Delta H/(J/g)$
WS100PS0	53.51 ± 0.03 ^b	62.07 ± 0.11 ^b	69.43 ± 0.16 ^c	13.06 ± 0.02 ^d
WS75PS25	53.82 ± 0.06 ^b	63.05 ± 0.13 ^{ab}	73.07 ± 0.21 ^{ab}	11.97 ± 0.05 ^c
WS50PS50	53.97 ± 0.14 ^b	64.94 ± 0.09 ^a	73.12 ± 0.21 ^a	11.85 ± 0.08 ^b
WS25PS75	56.02 ± 0.05 ^a	64.96 ± 0.12 ^a	73.15 ± 0.23 ^a	9.28 ± 0.13 ^b
WS0PS100	56.85 ± 0.16 ^a	65.23 ± 0.15 ^a	74.51 ± 0.24 ^{ab}	7.84 ± 0.19 ^a
WS100WD0	53.51 ± 0.03 ^b	62.07 ± 0.11 ^b	69.43 ± 0.16 ^b	13.06 ± 0.02 ^b
WS75WD25	52.23 ± 0.06 ^c	62.52 ± 0.15 ^c	73.22 ± 0.26 ^b	10.93 ± 0.06 ^b
WS50WD50	53.28 ± 0.11 ^b	62.57 ± 0.24 ^b	75.57 ± 0.16 ^{ab}	10.77 ± 0.13 ^{ab}
WS25WD75	55.29 ± 0.07 ^b	65.45 ± 0.16 ^a	79.73 ± 0.28 ^a	9.95 ± 0.12 ^{ab}
WS0WD100	56.62 ± 0.08 ^a	68.37 ± 0.14 ^a	80.96 ± 0.23 ^a	8.18 ± 0.12 ^a

2.2 热特性

小麦淀粉与马铃薯淀粉，豌豆淀粉共混体系的起始温度 T_0 、终止温度 T_C 、峰值温度 T_p 、糊化焓 ΔH 如表所示。淀粉在加热糊化的过程中原本有序的淀粉结构变成了无序结构。马铃薯淀粉和豌豆淀粉的起始温度 T_0 、终止温度 T_C 、峰值温度 T_p 均高于小麦淀粉而糊化焓 ΔH 低于小麦淀粉。样品 WS75PS25 和样品 WS25WD75 起始温度 (T_0) 在混合体系中达到最大，说明此时所需的糊化温度最高，表明在糊化过程中淀粉之间的相互作用使得淀粉颗粒的分子结构变得更加稳定，糊化过程受到阻碍作用，糊化温度升高^[9]。随着马铃薯淀粉和豌豆淀粉

的添加，淀粉混合体系的峰值温度 (T_p) 整体呈现上升趋势，这与高嘉星等^[17]研究荞麦淀粉与小麦淀粉以 30% 和 70% 混合发现混配淀粉的热特性值升高结果相当。可能是由于不同淀粉颗粒之间竞争水分阻碍了温度升高过程中淀粉的膨胀。淀粉混合体系的终止温度 (T_C) 呈现逐渐升高的趋势，样品 WS25PS75 和样品 WS25WD75 达到最大。淀粉混合体系糊化焓 ΔH 分别从 11.97 J/g 降至 9.28 J/g 和从 10.93 J/g 降至 9.95 J/g。这可能由于马铃薯淀粉和豌豆淀粉的添加降低了 WS/PS 和 WS added 混合体系水的可用性，淀粉吸水膨胀受到抑制，淀粉结晶区不能完全糊化，导致淀粉混合体系糊化焓 ΔH 降低^[18]。

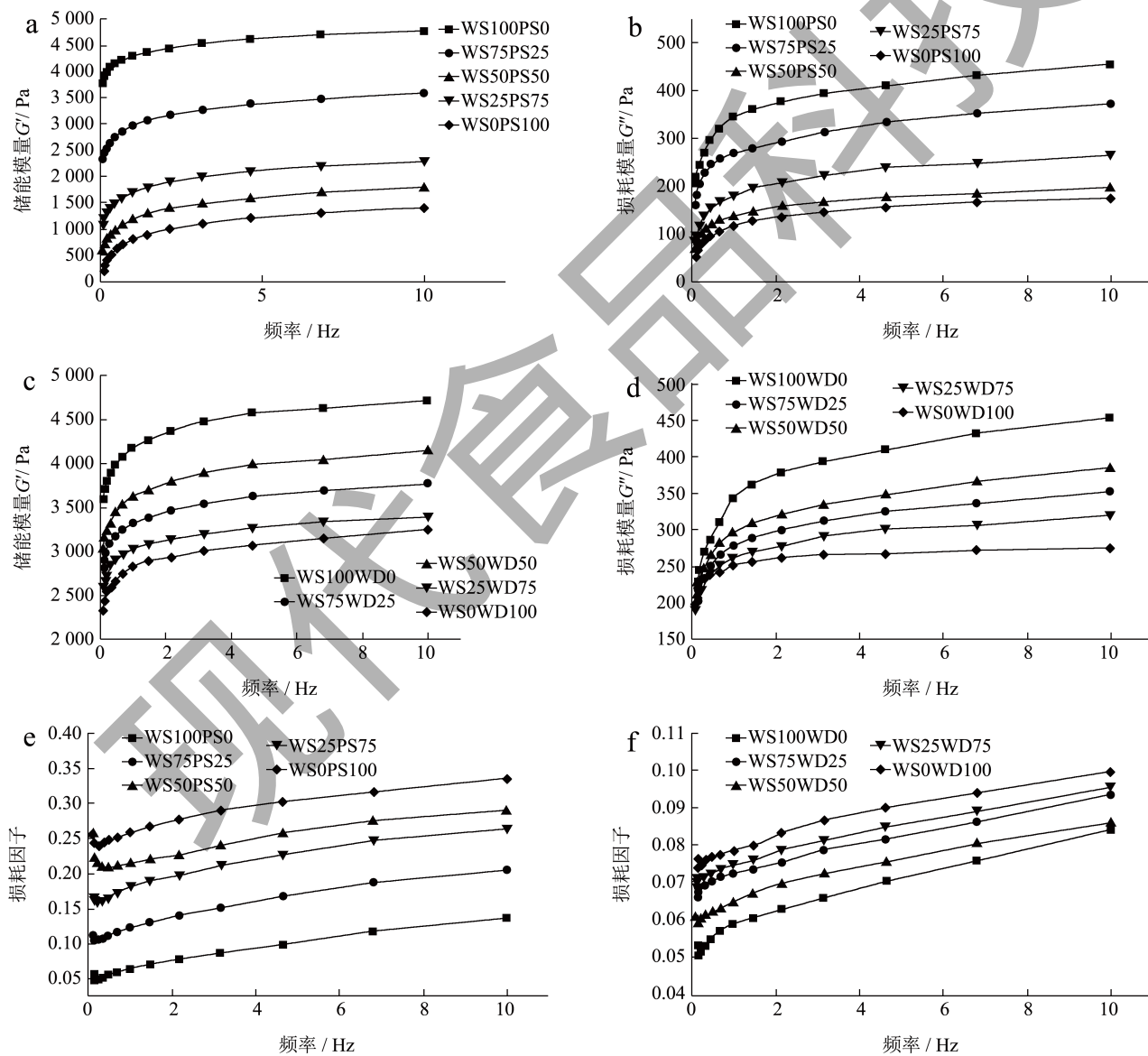


图 2 不同比例小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉频扫曲线

Fig.2 Frequency sweep curves of mixed starch of wheat and potato and mixed starch of wheat and pea in different proportions

注：WS 为小麦淀粉，PS 为马铃薯淀粉，WD 为豌豆淀粉。a、c、e 分别为小麦和马铃薯混合淀粉储能模量、损耗模量、损耗因子的频扫曲线；b、d、f 分别为小麦和豌豆混合淀粉储能模量、损耗模量、损耗因子的频扫曲线。

表 3 不同比例小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉的凝胶质构参数

Table 3 Gel texture parameters of mixed starch of wheat and potato and mixed starch of wheat and pea in different proportions

样品	硬度	弹性	内聚性	胶黏性
WS100PS0	95.21 ± 1.29 ^b	0.45 ± 0.04 ^b	0.45 ± 0.04 ^a	42.88 ± 3.19 ^c
WS75PS25	310.16 ± 7.64 ^a	0.91 ± 0.01 ^a	0.48 ± 0.05 ^a	173.35 ± 8.44 ^{bc}
WS50PS50	384.75 ± 8.98 ^a	0.96 ± 0.04 ^a	0.53 ± 0.02 ^a	208.35 ± 9.50 ^{ab}
WS25PS75	434.16 ± 9.58 ^a	0.99 ± 0.01 ^a	0.78 ± 0.03 ^a	237.18 ± 7.16 ^a
WS0PS100	342.25 ± 7.55 ^a	0.98 ± 0.01 ^a	0.82 ± 0.02 ^a	280.44 ± 10.10 ^{ab}
WS100WD0	95.21 ± 1.29 ^d	0.45 ± 0.04 ^c	0.45 ± 0.04 ^a	42.88 ± 3.19 ^b
WS75WD25	399.79 ± 8.29 ^{cd}	0.91 ± 0.04 ^b	0.32 ± 0.07 ^a	129.03 ± 9.76 ^{ab}
WS50WD50	622.27 ± 9.47 ^{bc}	0.91 ± 0.06 ^b	0.38 ± 0.04 ^a	111.69 ± 8.47 ^{ab}
WS25WD75	734.28 ± 9.88 ^b	0.90 ± 0.06 ^b	0.30 ± 0.02 ^a	223.57 ± 10.15 ^{ab}
WS0WD100	1 430.55 ± 7.54 ^a	1.64 ± 0.26 ^a	0.24 ± 0.05 ^a	285.75 ± 9.52 ^a

表 4 不同比例小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉凝胶不同状态水分子相对含量

Table 4 The relative content of water molecules in different states of mixed starch gel of wheat and potato and mixed starch gel of wheat and pea in different proportions

样品	T ₂₁	T ₂₂	T ₂₃	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃
WS100PS0	0.52 ± 0.01 ^b	11.34 ± 0.55 ^b	259.69 ± 8.56 ^c	5.08 ± 0.06 ^a	2.17 ± 0.07 ^a	92.36 ± 0.42 ^b
WS75PS25	0.61 ± 0.05 ^b	13.94 ± 0.35 ^b	371.71 ± 15.78 ^b	3.99 ± 0.05 ^{ab}	2.76 ± 0.07 ^a	92.69 ± 0.43 ^{ab}
WS50PS50	0.72 ± 0.06 ^b	34.37 ± 0.85 ^a	548.56 ± 13.15 ^a	4.25 ± 0.06 ^{bc}	2.94 ± 0.03 ^a	93.42 ± 0.46 ^{ab}
WS25PS75	1.37 ± 0.04 ^a	32.48 ± 0.17 ^a	622.95 ± 13.61 ^a	2.96 ± 0.09 ^{bc}	2.74 ± 0.07 ^a	94.55 ± 0.48 ^{ab}
WS0PS100	1.59 ± 0.06 ^a	40.72 ± 0.57 ^a	693.63 ± 15.40 ^a	1.93 ± 0.05 ^c	2.83 ± 0.03 ^a	94.91 ± 0.45 ^b
WS100WD0	0.46 ± 0.02 ^b	9.25 ± 0.88 ^b	290.03 ± 13.07 ^c	4.64 ± 0.03 ^a	2.33 ± 0.06 ^{ab}	93.37 ± 0.45 ^a
WS75WD25	0.95 ± 0.02 ^a	14.24 ± 0.56 ^{ab}	314.46 ± 15.36 ^c	4.05 ± 0.06 ^a	2.46 ± 0.04 ^a	93.48 ± 0.22 ^a
WS50WD50	0.72 ± 0.03 ^{ab}	15.37 ± 0.78 ^{ab}	314.46 ± 12.36 ^c	4.04 ± 0.09 ^a	2.35 ± 0.06 ^{ab}	93.37 ± 0.47 ^a
WS25WD75	0.43 ± 0.01 ^b	17.34 ± 0.58 ^a	461.67 ± 9.02 ^b	4.37 ± 0.05 ^a	1.80 ± 0.08 ^b	92.66 ± 0.66 ^a
WS0WD100	0.46 ± 0.03 ^b	20.44 ± 0.21 ^a	529.77 ± 17.93 ^a	3.50 ± 0.02 ^a	1.76 ± 0.09 ^b	81.62 ± 0.56 ^b

2.3 动态流变

动态流变特性参数中储能模量 (G') 是发生弹性形变弹性分子储存在物质内部的能量。损耗模量 (G'') 是发生黏性形变黏性分子在物质中耗散的能量^[19]。图 2 为小麦淀粉和马铃薯淀粉、豌豆淀粉和混合淀粉糊的动态频扫流变曲线。小麦淀粉和马铃薯淀粉混合体系中, 随着频率的增加, 其储能模量 G' 和损耗模量 G'' 均在小麦淀粉和马铃薯淀粉之间呈现上升趋势, 且 G' 明显大于 G'' 说明混合淀粉体系均表现为弱凝胶的特性^[20]。样品 WS75PS25 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 曲线较高, 说明在此淀粉比例下凝胶具有较好的弹性和黏性。在小麦淀粉和豌豆淀粉混合体系中, 随着频率的增加, 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 曲线逐渐升高。并且 G' 的幅度总是高于 G'' , 表明样品均显示出典型的弱凝胶体系^[18]。

在混合体系曲线中, 样品 WS50WD50 储能模量 G' 和损耗模量 G'' 曲线较高, 说明在此浓度比下混合淀粉凝胶体系弹性较强, 三维网状凝胶结构变得更加致密^[21]。损耗因子是表征淀粉糊流变特性的另一参数 ($\tan\delta = G''/G'$)。损耗因子越大表示淀粉混合体系粘性越大, 损耗因子越小表示淀粉混合体系弹性越大^[22]。从图 2 中可以看出在小麦淀粉和马铃薯淀粉混合体系中, 淀粉混合体系 $\tan\delta$ 值随着频率的增加呈现逐渐升高趋势, 且 $\tan\delta$ 均小于 1, 表明小麦淀粉和马铃薯淀粉混合体系淀粉形成的凝胶弹性更大。小麦淀粉与豌豆淀粉混合体系的 $\tan\delta$ 值均小于 1, 混合体系均表现为弹性行为。随着频率的增加, 损耗因子逐渐增加, 这可能是由于混合淀粉体系中直链淀粉分子在加热糊化过程中产生运动, 通过氢键重新排列组合, 小麦淀粉和豌豆淀粉形成

了更加致密的混合淀粉三维网状凝胶结构^[23]。

2.4 质构特征

小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉凝胶质构参数如表3所示。硬度表示在受到压力下淀粉凝胶的强度，小麦淀粉和两种不同来源淀粉混合凝胶的硬度随着添加淀粉比例的增加呈现升高的趋势，说明小麦淀粉和马铃薯淀粉、豌豆淀粉混合后，淀粉混合体系的凝胶强度增强^[24]。弹性表示淀粉凝胶的粘弹性能，从表中数据发现小麦淀粉和马铃薯淀粉混合淀粉凝胶的弹性随着马铃薯比例增加而增大，说明马铃薯淀粉与小麦淀粉发生相互作用，使得混合淀粉凝胶结构增强，弹性增加^[8]。小麦淀粉和豌豆淀粉的混合淀粉凝胶弹性都在一定的值较稳定但比小麦淀粉弹性值大。内聚性表示淀粉凝胶内部分子之间结合力的大小^[25]。小麦淀粉和马铃薯淀粉的混合淀粉内聚性呈现逐渐上升的趋势。说明小麦淀粉和马铃薯淀粉混合后可加快混合淀粉中直链淀粉的浸出，浸出的直链淀粉会重新排列组合形成更加致密的凝胶网络结构^[26]。小麦淀粉和豌豆淀粉的混合淀粉体系内聚性呈现逐渐降低趋势，可能原因与豌豆淀粉的内聚性较低有关。胶黏性取决于内聚力和粘合力的相互作用^[27]。随着马铃薯淀粉添加比例的增加，混合淀粉的胶黏性逐渐增大。小麦淀粉和豌豆淀粉混合淀粉的胶黏性随着添加豌豆淀粉的比例增加呈现先降低后增加的趋势。Puncha等^[9]研究了美人蕉淀粉和马铃薯淀粉混合后凝胶质构特性的变化，本实验结果与其结果趋势相一致。

2.5 凝胶水分子状态

低场核磁测试凝胶可以反应水与凝胶结合情况，其中用纵向弛豫时间(T_1)和横向弛豫时间(T_2)参数表示^[8]。本实验用横向弛豫时间(T_2)来反映凝胶水分子状态。由表4得出混合淀粉凝胶水分分布情况，其中 T_{21} 表示这部分水为强结合水，小麦淀粉、马铃薯淀粉和淀粉混合物凝胶弛豫时间范围在0~2 ms；小麦淀粉、豌豆淀粉和淀粉混合物凝胶弛豫时间范围在0~1 ms； T_{22} 表示这部分水为弱结合水，小麦淀粉、马铃薯淀粉和淀粉混合物凝胶弛豫时间范围在10~50 ms；小麦淀粉、豌豆淀粉和淀粉混合物凝胶弛豫时间范围在9~30 ms； T_{23} 表示这部分水为自由水。小麦淀粉、马铃薯淀粉和淀

粉混合物凝胶弛豫时间范围在20~1 000 ms；小麦淀粉、豌豆淀粉和淀粉混合物凝胶弛豫时间范围在20~1 000 ms；从表中可以看出随着马铃薯淀粉和豌豆淀粉添加淀粉混合体系中 T_{21} 和 T_{22} 均无明显变化，但 T_{23} 的数值有所升高， A_{21} 呈下降趋势， A_{22} 无明显变化， A_{23} 呈上升趋势。表明淀粉混合体系强结合水含量降低，弱结合水含量不变，自由水含量升高^[8]。由于马铃薯淀粉中具有带电的磷酸基团，其能与水分子发生较强的作用力。马铃薯淀粉的加入增加了小麦淀粉凝胶中水分子的迁移，导致结合水和束缚水与淀粉分子的结合较少，更容易作为自由水扩散，从而导致凝胶中自由水含量升高^[8]。随着豌豆淀粉的加入， A_{21} 无明显变化， A_{22} 和 A_{23} 呈下降趋势，这说明豌豆淀粉与小麦淀粉发生相互作用，提高了淀粉分子与水的结合能力，使得凝胶形成更加致密的三维网状结构，导致弱结合水和自由水含量降低^[28]。

3 结论

小麦淀粉、马铃薯淀粉和豌豆淀粉具有显著不同的糊化、凝胶和流变学特性。将小麦淀粉分别与马铃薯淀粉、豌豆淀粉混合后，混合淀粉的糊化、流变学、热力学和凝胶质构特性都发生不同程度的改变。小麦淀粉的峰值黏度(2 430.50 Pa·s)等糊化特性参数比马铃薯淀粉(9 001.02 Pa·s)和豌豆淀粉(2 644.50 Pa·s)低，而糊化温度(90.70 °C)高于马铃薯淀粉(67.05 °C)和豌豆淀粉(73.95 °C)。两种混合淀粉体系的糊化特性值均介于单一种类淀粉对应特性值之间，但不呈线性关系。小麦淀粉的储能模量(G' 为4 770.85 Pa)和损耗模量(G'' 为453.80 Pa)比马铃薯淀粉(G' 为1 392.46 Pa、 G'' 为175.65 Pa)和豌豆淀粉(G' 为3 256.89 Pa、 G'' 为275.36 Pa)的值高，两种混合淀粉体系的储能模量和损耗模量均介于单一种类淀粉对应特性值之间且表现为弱凝胶行为。DSC测试结果表明马铃薯淀粉(7.84 J/g)和豌豆淀粉(8.18 J/g)的热焓值小于小麦淀粉(13.06 J/g)，小麦与马铃薯混合淀粉、小麦与豌豆混合淀粉热焓值降低。通过小麦淀粉与马铃薯淀粉、豌豆淀粉的混合可以使淀粉的性质发生不同程度的改变，今后可以进一步利用混合淀粉改变淀粉的性质这一优势扩大淀粉的应用，减少对化学改性淀粉的使用。

参考文献

- [1] 李新华,宋利艳,卢春晓.不同淀粉复配参数的优选及应用性质变化研究[J].食品工业科技,2010(7):125-127,131.
- [2] SUN D, YOO B. Effect of tapioca starch addition on rheological, thermal, and gelling properties of rice starch [J]. Food Science & Technology, 2015, 64(1): 205-211.
- [3] 项丰娟,苏磊,张秀南,等.小麦淀粉的研究现状[J].食品研究与开发,2021,42(16):212-219.
- [4] LIU H, LELIEVRE J. A differential scanning calorimetry study of melting transitions in aqueous suspensions containing blends of wheat and rice starch [J]. Carbohydrate Polymer, 1992, 17(5): 145-149.
- [5] 罗芳会,刘传菊,聂荣祖,等.玉米淀粉和马铃薯淀粉共混糊化及凝胶特性的研究[J].中国粮油学报,2022, 37(8):159-165.
- [6] ZHU F, CORKE H. Gelatinizing, pasting, and gelling properties of potato and amaranth starch mixtures [J]. Cereal Chemistry, 2011, 88(3): 302-309.
- [7] 张丹丹,刘晓康,马丽苹,等.红薯/玉米淀粉共混物糊、流变及热力学性质研究[J].食品与机械,2019,35(4):31-36.
- [8] 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.
- [9] PUNCHA-ARNON S, PATHIOANAWAT 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.
- [10] 张正茂,王志华,颜永斌,等.马铃薯淀粉和豌豆淀粉复配体系的流变与凝胶特性研究[J].食品工业科技,2016,37(6):170-173.
- [11] 李鑫,王鹏程,王紫雯,等.马铃薯淀粉理化特性对糊化特性的影响[J].食品科技,2021,46(6): 238-244.
- [12] BAJAJ R, SINGH N, KAUR A. Effect of native and gelatinized starches from various sources on sponge cake making characteristics of wheat flour [J]. J Food Sci Technol, 2019, 56(2): 1046-1055.
- [13] DING Y, SHEN M, WEI D, et al. Study on compatible characteristics of wheat and purple sweet potato starches [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105961.
- [14] GUPTA M, BAWA A S, SEMWAL A D. Morphological, thermal, pasting, and rheological properties of barley starch and their blends [J]. International Journal of Food Properties, 2009, 12(3): 587-604.
- [15] FONSECA-FLORIDO H A, CASTRO-ROSAS J, HERNANDEZ-HERNANDEZ E, et al. Structural properties of waxy corn and potato starch blends in excess water [J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): S353-S365.
- [16] SANDHU K S, KAUR M, MUKESH. Studies on noodle quality of potato and rice starches and their blends in relation to their physicochemical, pasting and gel textural properties [J]. Food Science & Technology, 2010, 43(8): 1289-1293.
- [17] 高嘉星,张国权,方丝云,等.荞麦淀粉-小麦淀粉混配体系理化特性的研究[J].食品研究与开发,2017,38(20):25-30.
- [18] HAGENIMANA A, PU P, DING X. Study on thermal and rheological properties of native rice starches and their corresponding mixtures [J]. Food Research International, 2005, 38(3): 257-266.
- [19] FUNAMI T, KATAOKA Y, OMOTO T, et al. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(1): 1-13.
- [20] 周婧琦,黄琴,秦令祥,等.山药淀粉与燕麦 β -葡聚糖共混体系理化及消化性能研究[J].食品工业科技,2022,43(18):114-121.
- [21] HUSSAIN S, ALAMRI M S, MOHAMED A A, et al. Rheological, thermal and textural properties of starch blends prepared from wheat and turkish bean starches [J]. Food Science and Technology Research, 2013, 19(6): 1141-1147.
- [22] MA Y S, PAN Y, XIE Q T, et al. Evaluation studies on effects of pectin with different concentrations on the pasting, rheological and digestibility properties of corn starch [J]. Food Chem, 2019, 274: 319-323.
- [23] PARK E Y, KIM H, KIM J, et al. Pasting properties of potato starch and waxy maize starch mixtures [J]. Die Stärke, 2009, 61(6): 352-357.
- [24] 胡文轩,陈洁,许飞,等.不同糯米/粳米共混体系凝胶化行为及年糕品质[J].食品科学,2019,40(17):85-95.
- [25] WANG H, ZHU Q, WU T, et al. Glass transition temperature, rheological, and gelatinization properties of high amylose corn starch and waxy cassava starch blends [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): 1-9.
- [26] SEETAPAN N, LIMPARYOON N, GAMONPILAS C, et al. Effect of cryogenic freezing on textural properties and microstructure of rice flour/tapioca starch blend gel [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 151: 51-59.
- [27] SUJKA M, CIESLA K, JAMROZ J. Structure and selected functional properties of gamma-irradiated potato starch [J]. Die Stärke, 2015, 67(11-12): 1002-1010.
- [28] WATERSCHOOT J, GOMAND S V, DELCOUR J A. Impact of swelling power and granule size on pasting of blends of potato, waxy rice and maize starches [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 69-77.