

小麦淀粉颗粒理化特性差异分析

张浩, 林江涛*, 岳清华*, 张晴晴, 袁梦, 刘晓倩, 何馨怡
(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 以五得利(WDL)、金苑(JY)、金像(JX)、思丰(SF)四种市售小麦粉为原料, 通过提取分离得到总淀粉、A淀粉和B淀粉。分别对淀粉组成、直链淀粉含量、粒度分布、透明度、糊化特性、热特性、动态流变学特性等进行差异分析。研究结果表明: 四种小麦粉A、B淀粉分离度良好, 淀粉的理化组成与小麦淀粉的颗粒类型直接相关, A淀粉具有较高的直链淀粉含量(31.92%~35.27%), 较低的蛋白质(0.25%~0.27%)、灰分(0.10%~0.13%)以及破损淀粉含量(18.15%~20.85%); B淀粉的糊化温度(68.90~71.55 ℃)及范围较高。在四种品牌小麦粉总淀粉间, 粒度分布范围大小为SF>JX>WDL>JY, 同时JY有着较高的直链淀粉含量(31.91%)、初始糊化温度(54.78 ℃)以及糊化焓(10.33 J/g), WDL回生值(303.50 cP)较低。动态流变学分析表明B淀粉对频率的依赖性较高, SF总淀粉具有较高的弹性模量和粘性模量。综合可得, JY和SF总淀粉的特性差异最为显著, JY具有更高的结晶性和热阻, SF总淀粉更易糊化且凝胶具有较好的粘弹特性。研究结果可为小麦淀粉多尺度分析提供一定理论指导。

关键词: 小麦淀粉; 淀粉颗粒; 颗粒类型; 理化特性

文章编号: 1673-9078(2025)12-61-70 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1313

Physicochemical Properties of Wheat Starch Granules

ZHANG Hao, LIN Jiangtao*, YUE Qinghua*, ZHANG Qingqing, YUAN Meng, LIU Xiaoqian, HE Xinyi
(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Four types of commercially available wheat flour, Wudeli (WDL), Jinyuan (JY), Jinxiang (JX), and Sifeng (SF), were used as raw materials for starch extraction and characterization. Total starch, A starch, and B starch samples were obtained through extraction and separation. Differences in the starch compositions, amylose contents, particle sizes, transparency, pasting characteristics, thermal characteristics, and dynamic rheological properties were analyzed. The A and B starches from the four wheat flours were effectively isolated, with their physicochemical compositions showing a direct correlation with the granule type. Specifically, A starch exhibited a higher amylose content (31.92%~35.27%), lower levels of protein (0.25%~0.27%), ash (0.10%~0.13%), and damaged starch (18.15%~20.85%); whereas B starch exhibited a higher pasting temperature (68.90~71.55 ℃) and range. In terms of the total starch content among the four types of wheat flour, the size distribution range was in the following order: SF>JX>WDL>JY. Notably, JY exhibited a higher amylose content (31.91%), an initial pasting temperature of 54.78 ℃, and an enthalpy of pasting of 10.33 J/g. In contrast, WDL demonstrated a lower regrowth viscosity, at 303.50 cP. Dynamic rheological analysis revealed a high frequency dependence of B starch, as well as high elastic and viscous moduli of SF total starch. The most

引文格式:

张浩,林江涛,岳清华,等.小麦淀粉颗粒理化特性差异分析[J].现代食品科技,2025,41(12):61-70.

ZHANG Hao, LIN Jiangtao, YUE Qinghua, et al. Physicochemical properties of wheat starch granules [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 61-70.

收稿日期: 2024-09-03 ; 修回日期: 2024-12-06 ; 接受日期: 2024-12-09
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32101985); 河南省重大科技专项 (231100110300 ; 221100110700); 河南工业大学博士基金项目 (2023BS107)
作者简介: 张浩 (1999-), 男, 硕士, 研究方向: 谷物加工与装备, E-mail: haozhang_haut@163.com
通讯作者: 林江涛 (1973-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 谷物加工与装备, 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

notable differences were in the properties of the JY and SF total starches. Specifically, JY exhibited higher crystallinity and thermal resistance, and SF total starch greater gelatinizability and superior viscoelastic properties. The results provide theoretical guidance for multi-scale analysis of wheat starch.

Key words: wheat starch; starch granule; granule type; physicochemical property

淀粉是小麦胚乳中的主要碳水化合物，在食品以及非食品工业占据着重要地位，尤其是淀粉的糊化、凝胶、回生特性等^[1,2]。在成熟的小麦籽粒中，小麦淀粉中主要有两种类型的颗粒群：颗粒相对较大的A淀粉（直径 $>10\ \mu\text{m}$ ），呈圆盘或圆饼状；颗粒相对较小的B淀粉（直径 $<10\ \mu\text{m}$ ），呈球形或者不规则形^[3]。

小麦淀粉的链长分布、直链淀粉含量和支链淀粉含量等特性均对淀粉性质、面粉及面制品有着重要影响，直链淀粉可以增强淀粉凝胶的稳定性与抗变形能力^[4]。支链淀粉会影响淀粉颗粒的糊化、回生、酶水解、流变等特性^[5]。安迪等^[6]发现小麦淀粉中小颗粒淀粉显著影响面条的感官及品质，随着小颗粒淀粉含量的增加，面条的蒸煮损失率下降。孔雁等^[7]研究结果表明小麦淀粉的崩解值和峰值黏度对兰州拉面制作过程影响较大。

探究A、B淀粉特性差异对于食品工业具有重要意义。研究表明A、B淀粉的组成、链结构、理化特性等受到小麦淀粉颗粒大小和形状的影响存在较大差异^[8-10]。与A淀粉相比，B淀粉具有更小的颗粒体积平均直径、更大的比表面积、更高的糊化温度和脂质含量，而A淀粉具有更高的直链淀粉含量、更高的峰值粘度和膨胀性^[11,12]。Edwards等^[13]表明小麦B淀粉结合水的能力较强，会对面团的弹性产生有利影响，且在发酵过程中会削减面团的流动性，使得面团结构更稳定。

系统了解A、B淀粉颗粒特性差异对分析总淀粉特性以及提升淀粉基食品品质有着重要作用，分析不同市售小麦粉间淀粉特性差异对整体小麦粉品质的影响也同样重要。国内外主要集中在单一或特定品种小麦粉上，研究A、B淀粉间特性差异居多，但对不同面粉企业生产的小麦粉中淀粉特性研究较为有限。本研究选取不同地区（郑州、新乡、蛇口）四种具有代表性的市售中筋小麦粉，分别为WDL、JY、JX和SF，制备总淀粉，同时分离出A、B淀粉颗粒。通过不同地区品牌市售小麦粉中淀粉的对比分析，结合A、B淀粉颗粒基础组成和理化特性差异，系统探讨了小麦淀粉不同颗粒类型对总淀粉特性的影响，有助于深入理解小麦淀粉在食品加工中的作用机理，为小麦淀

粉多尺度结构分析以及食品工业中的面粉品质改良提供了一定的理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

五得利小麦粉，五得利集团新乡面粉有限公司；金苑小麦粉，河南（郑州）金苑粮油有限公司；金像小麦粉，蛇口南顺面粉有限公司；思丰小麦粉，新乡市思丰粉业有限公司。

无水乙醇、氢氧化钠，郑州派尼化学试剂厂；硫酸、硫酸铜，西陇化工股份有限公司；硫酸钾，天津市凯通化学试剂有限公司；以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

MASTERSIZER 3000 激光粒度仪，英国马尔文仪器公司；QUANTA 250FEG 扫描电子显微镜，美国FEI公司；DSC 250 差示扫描量热仪，美国TA仪器公司；HAAKE RS6000 流变仪，美国Thermo Fisher Haake公司。

1.3 方法

1.3.1 小麦淀粉的制备

将面粉按粉质吸水率的80%加水 and 成面团，用保鲜膜包裹，于35℃醒发20 min。将面团在蒸馏水中反复揉洗出淀粉浆，淀粉浆经100目筛过滤两次，去除残留麸皮及胚乳细胞壁等杂质。将筛下淀粉浆于4℃冰箱静置12 h后，3 500 r/min离心15 min，弃去上清液及最上一层淡黄色物质。重复加水、离心、去除色素层的步骤三次，纯化淀粉。收集最下层白色物质并加入三倍体积的无水乙醇充分混合后，洗涤、抽滤、冷冻干燥、研磨过80目筛，得到小麦淀粉样品。

1.3.2 A、B淀粉的分离

参考Shang等^[12]和Liang等^[14]的方法并做修改：将180 g淀粉分散于1 800 mL蒸馏水中，室温（25℃）静置70 min，倾出700 mL上清液，补充700 mL蒸馏水，再次分散静置，重复此步骤9次。合并上清液，4 500 r/min离心15 min，得到B淀粉。沉淀物采用同样方法离心，得到A淀粉。将A、B淀粉分别于40℃烘干、研磨过80目筛备用。

表 1 四种小麦粉A、B、总淀粉粒径分布差异

Table 1 Differences in particle size distribution of A-type, B-type, and total starches among four wheat flour brands					
项目		WDL	JY	JX	SF
$D_{10}/\mu\text{m}$	A 淀粉	$12.30 \pm 0.00^{\text{aA}}$	$9.86 \pm 0.02^{\text{dA}}$	$11.20 \pm 0.00^{\text{cA}}$	$12.23 \pm 0.06^{\text{bA}}$
	B 淀粉	$3.86 \pm 0.02^{\text{bC}}$	$3.90 \pm 0.02^{\text{aC}}$	$3.63 \pm 0.01^{\text{cC}}$	$3.05 \pm 0.01^{\text{d}}$
	总淀粉	$7.77 \pm 0.01^{\text{bB}}$	$8.28 \pm 0.01^{\text{aB}}$	$6.41 \pm 0.00^{\text{cB}}$	$5.98 \pm 0.01^{\text{dB}}$
$D_{50}/\mu\text{m}$	A 淀粉	$19.00 \pm 0.00^{\text{bA}}$	$18.50 \pm 0.00^{\text{cA}}$	$18.37 \pm 0.06^{\text{cA}}$	$20.67 \pm 0.15^{\text{aA}}$
	B 淀粉	$6.81 \pm 0.04^{\text{bC}}$	$7.04 \pm 0.05^{\text{aC}}$	$7.14 \pm 0.06^{\text{aC}}$	$6.04 \pm 0.09^{\text{cC}}$
	总淀粉	$18.50 \pm 0.00^{\text{aB}}$	$16.57 \pm 0.06^{\text{dB}}$	$17.40 \pm 0.00^{\text{cB}}$	$18.00 \pm 0.00^{\text{bB}}$
$D_{90}/\mu\text{m}$	A 淀粉	$28.67 \pm 0.06^{\text{bB}}$	$26.67 \pm 0.06^{\text{bB}}$	$29.80 \pm 0.10^{\text{bB}}$	$55.73 \pm 21.91^{\text{aA}}$
	B 淀粉	$12.17 \pm 0.21^{\text{cC}}$	$12.90 \pm 0.26^{\text{cC}}$	$17.47 \pm 0.60^{\text{aC}}$	$14.40 \pm 1.35^{\text{bB}}$
	总淀粉	$31.40 \pm 0.00^{\text{bA}}$	$31.20 \pm 0.00^{\text{cA}}$	$30.77 \pm 0.06^{\text{dA}}$	$31.90 \pm 0.00^{\text{aAB}}$
$D_{[4,3]}/\mu\text{m}$	A 淀粉	$19.80 \pm 0.00^{\text{bA}}$	$19.20 \pm 0.00^{\text{bA}}$	$19.53 \pm 0.06^{\text{bA}}$	$32.27 \pm 1.52^{\text{aA}}$
	B 淀粉	$7.51 \pm 0.07^{\text{bC}}$	$7.83 \pm 0.09^{\text{bC}}$	$10.03 \pm 0.25^{\text{aC}}$	$9.72 \pm 0.93^{\text{aC}}$
	总淀粉	$19.20 \pm 0.00^{\text{aB}}$	$17.50 \pm 0.00^{\text{dB}}$	$18.20 \pm 0.00^{\text{cB}}$	$18.70 \pm 0.10^{\text{bB}}$
比表面积/ (cm^2/mL)	A 淀粉	$319.20 \pm 0.30^{\text{cC}}$	$376.20 \pm 0.70^{\text{aC}}$	$335.17 \pm 0.65^{\text{bC}}$	$287.10 \pm 2.86^{\text{dC}}$
	B 淀粉	$917.97 \pm 2.87^{\text{bA}}$	$895.33 \pm 3.16^{\text{cA}}$	$890.27 \pm 7.27^{\text{cA}}$	$1\ 051.00 \pm 15.72^{\text{aA}}$
	总淀粉	$422.53 \pm 0.12^{\text{cB}}$	$415.43 \pm 0.06^{\text{dB}}$	$460.10 \pm 0.00^{\text{bB}}$	$465.97 \pm 0.15^{\text{aB}}$

注：表中不同小写字母表示同行不同样品间存在显著性差异 ($P<0.05$)，不同大写字母表示同列不同颗粒类型间存在显著性差异 ($P<0.05$)，下同。

1.3.3 淀粉粒度的测定

将淀粉样品分散于蒸馏水中，震荡混匀制成淀粉乳，利用激光光散射法测定分析，水和淀粉的折射率参数为 1.33 和 1.53，折光率设置上下限为 10% 和 5%。

1.3.4 淀粉基本理化指标的测定

水分含量的测定参照 GB 5009.3-2016；灰分含量的测定参照 GB/T 24872-2010；蛋白质含量的测定参照 GB 5009.5-2016；破损淀粉含量的测定参照 GB/T 9826-2008；直链淀粉含量的测定参照 GB/T 15683-2008。

1.3.5 淀粉的微观结构的测定

使用扫描电子显微镜 (SEM) 对淀粉样品进行微观结构观察。将淀粉样品均匀涂布于粘有导电胶的样品载物台上，喷镀导电层后进行观察，选择具有代表性的区域拍照。

1.3.6 淀粉糊透明度的测定

参考王轶等^[15]的方法，取 0.5 g 样品加入蒸馏水配置为 1% 的淀粉乳液，沸水浴 15 min，取出冷却至室温。以蒸馏水做相同处理作为对照，在 620 nm 波长下校正蒸馏水的透过率为 100%，进行样品透过率的测定。

1.3.7 淀粉糊化特性的测定

参照 GB/T 24853-2010 测定小麦淀粉的糊化特性。

1.3.8 淀粉热特性的测定

称取 3.0 mg (干基) 淀粉样品置于铝坩埚中，加入 9.0 μL 去离子水混合均匀并密封。样品在 4 $^{\circ}\text{C}$ 平衡 24 h 后，

使用差示扫描量热仪 (DSC) 进行测定，以空白坩埚作为对照。测试条件：10~110 $^{\circ}\text{C}$ ，升温速率 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

1.3.9 淀粉凝胶动态流变学特性的测定

称取淀粉样品 3.0 g (干基)，加入 27.0 mL 去离子水，搅拌均匀，沸水浴 20 min，得到淀粉糊。取适量于流变仪载物台上选择 35 mm 探头，平行板间隙 1 mm。在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下进行测试：在 0.1%~100% 范围内进行应变扫描，频率为 10 rad/s，确定最佳线性粘弹性区间，最终选择应变为 2%，频率范围为 0.1~10 Hz。得到淀粉凝胶的弹性模量 (G')、粘性模量 (G'')，并由公式得到损耗因子正切值 ($\tan \delta$)。

1.4 数据处理与分析

使用 SPSS 26.0 对数据进行显著性 ($P<0.05$) 分析，使用 Origin 2021 绘制图表。每组实验进行 3 组平行，结果以“平均值 $\pm$ 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 淀粉粒度分析

小麦淀粉的粒度分布影响着淀粉的理化性质、小麦粉以及面团的品质，从而影响淀粉在食品和非食品工业中的应用^[16]。表 1 是四种小麦粉的 A、B 和总淀粉的粒径分布结果， D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90} 分别表示淀粉颗粒分布值达到对应百分比时的淀粉粒径大小。 $D[4,3]$ 表示淀粉颗粒体积加权平均直径。

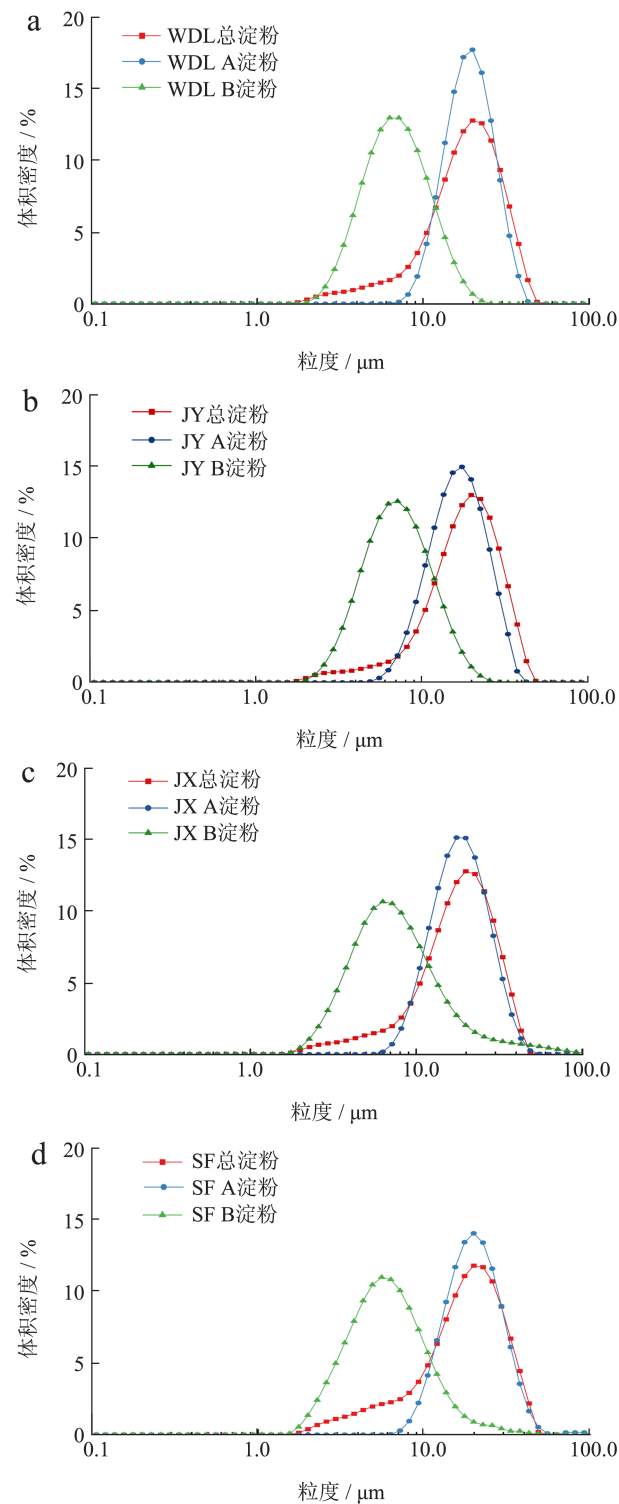


图 1 四种小麦粉 A、B、总淀粉粒度分级曲线图

Fig.1 Particle size grading curves for A starch, B starch, and total starch in four wheat flour brands

注: a-WDL ; b-JY ; c-JX ; d-SF。

由表 1 可知，随着淀粉颗粒分布值百分比的增大淀粉颗粒体积平均直径也随之增大，B 淀粉颗粒体积平均直径在 7.51~10.03 μm；A 淀粉颗粒体积平均直径均大于 10 μm，为 19.20~32.27 μm；总淀粉的颗粒体积平均直径介于两者之间，为 17.50~19.20 μm。B 淀

粉具有较大的比表面积（890.27~1 051.00 cm²/mL），接近 A 淀粉比表面积（287.10~376.20 cm²/mL）的 3~4 倍。在四种小麦粉中，SF 小麦粉的 A 淀粉具有最大的 D_{90} （55.73 μm），B 淀粉拥有最小的 D_{10} （3.05 μm），因此 SF 总淀粉具有较宽的粒度分布范围，同时具有显著最大的比表面积（465.97 μm）；而 JY 总淀粉具有较窄的粒度分布范围、最小的比表面积（415.43 μm）。小麦总淀粉含有 A、B 淀粉呈现双峰分布^[17-19]，由图 1 可知，四种小麦粉的 A、B 淀粉粒度分布图均为单峰图。B 淀粉的峰图在 10 μm 之前，A 淀粉的峰图在 10 μm 之后，总淀粉呈现与 A、B 淀粉单峰不同的峰型。综合可得，A、B 淀粉分离度良好，且不同品牌小麦粉间淀粉的粒径分布存在显著性差异。

2.2 淀粉基本理化指标分析

四种品牌小麦淀粉的基础理化指标如表 2 所示。在颗粒类型之间，B 淀粉的蛋白质（0.32%~0.38%）、破损淀粉含量（24.55%~25.70%）显著高于 A 淀粉和总淀粉，灰分（0.18%~0.21%）显著高于 A 淀粉灰分（0.10%~0.13%）。可能是 B 淀粉颗粒小数量多，采用悬浮法分离时，一些较轻的蛋白和细小麸皮碎片以及大多破损淀粉由于相对密度较低易富集在 B 淀粉颗粒中，造成 B 淀粉的蛋白质、灰分和破损淀粉含量增大，而 A 淀粉较低^[20]；四种小麦淀粉 A 淀粉的直链淀粉含量均最高，JY、JX、SF 的 B 淀粉的直链淀粉含量均显著低于 A 淀粉。Peng 等^[21]研究发现淀粉的直链淀粉含量与淀粉的颗粒大小和成熟度成正相关。同时有研究得到 A 淀粉颗粒比 B 淀粉颗粒更早合成，随着淀粉成熟度的提高，直链淀粉含量也随之增大^[22]。因此造成 A 淀粉的直链淀粉含量高于 B 淀粉。

在小麦粉品牌之间，总淀粉的直链淀粉含量为 JY>SF>JX>WDL，但四种淀粉之间差异不显著。SF 总淀粉具有最低的灰分、最高的蛋白质含量，破损淀粉含量显著低于 WDL 和 JX。最高的蛋白质含量可能与其较高的比表面积有关，Zhang 等^[17]表明具有较大的比表面积更易与蛋白质等非淀粉物质形成复合物，更难去除。由表 1 可知，在不同品牌间，SF 的 B 淀粉（1 051.00 cm²/mL）、总淀粉（465.97 cm²/mL）比表面积显著大于其余三种小麦粉的 B 淀粉和总淀粉的比表面积。由于 JX 的 A、B 淀粉均高于其余品牌同一类型淀粉的破损淀粉含量，因此在不同品牌间 JX 总淀粉具有显著最高破损淀粉含量；同理，由于 JY 的 A、B 淀粉的破损淀粉含量在同一类型中显著最低，因此造成 JY 总淀粉的破损淀粉含量较低。与此同时，JY 的 A、B 淀粉间的灰分含量最为接近、差值最小，总淀粉的直链淀粉含量最高。

表 2 四种小麦粉A、B、总淀粉基本理化指标

Table 2 Basic physicochemical indicators of total, A-type, and B-type starches among four wheat flour brands					
项目		WDL	JY	JX	SF
水分/%	A 淀粉	9.49 ± 0.03 ^{bcA}	10.54 ± 0.07 ^{aA}	9.43 ± 0.03 ^{cA}	9.59 ± 0.05 ^{bA}
	B 淀粉	6.50 ± 0.02 ^{aB}	6.51 ± 0.04 ^{aB}	6.32 ± 0.02 ^{bB}	6.50 ± 0.02 ^{aB}
	总淀粉	4.61 ± 0.00 ^{aC}	4.12 ± 0.07 ^{bC}	3.93 ± 0.04 ^{cC}	4.65 ± 0.06 ^{aC}
灰分/%	A 淀粉	0.13 ± 0.00 ^{aC}	0.13 ± 0.00 ^{aC}	0.10 ± 0.01 ^{bB}	0.12 ± 0.01 ^{aB}
	B 淀粉	0.20 ± 0.01 ^{abA}	0.18 ± 0.00 ^{cA}	0.21 ± 0.01 ^{aA}	0.19 ± 0.01 ^{bcA}
	总淀粉	0.16 ± 0.01 ^{bB}	0.16 ± 0.01 ^{bB}	0.20 ± 0.00 ^{aA}	0.15 ± 0.02 ^{bAB}
蛋白质/%	A 淀粉	0.25 ± 0.01 ^{abB}	0.25 ± 0.00 ^{bC}	0.26 ± 0.00 ^{abB}	0.27 ± 0.00 ^{aC}
	B 淀粉	0.35 ± 0.00 ^{bA}	0.35 ± 0.00 ^{bA}	0.32 ± 0.00 ^{cA}	0.38 ± 0.01 ^{aA}
	总淀粉	0.29 ± 0.02 ^{bB}	0.27 ± 0.00 ^{bcB}	0.26 ± 0.00 ^{cB}	0.34 ± 0.01 ^{aB}
破损淀粉/UCD	A 淀粉	19.20 ± 0.00 ^{cC}	18.15 ± 0.07 ^{dC}	20.85 ± 0.07 ^{aC}	19.55 ± 0.07 ^{bB}
	B 淀粉	25.40 ± 0.00 ^{abA}	24.55 ± 0.21 ^{cA}	25.70 ± 0.14 ^{aA}	25.10 ± 0.00 ^{bA}
	总淀粉	20.30 ± 0.14 ^{bB}	19.45 ± 0.21 ^{cB}	21.65 ± 0.21 ^{aB}	19.55 ± 0.21 ^{cB}
直链淀粉/%	A 淀粉	31.92 ± 2.42 ^{aA}	32.43 ± 1.27 ^{aA}	35.27 ± 0.86 ^{aA}	33.64 ± 0.42 ^{aA}
	B 淀粉	28.06 ± 0.55 ^{aA}	25.93 ± 1.80 ^{aB}	23.58 ± 2.62 ^{aB}	26.27 ± 1.76 ^{aB}
	总淀粉	28.71 ± 0.93 ^{aA}	31.91 ± 2.05 ^{aA}	30.60 ± 2.77 ^{aAB}	31.46 ± 0.36 ^{aA}

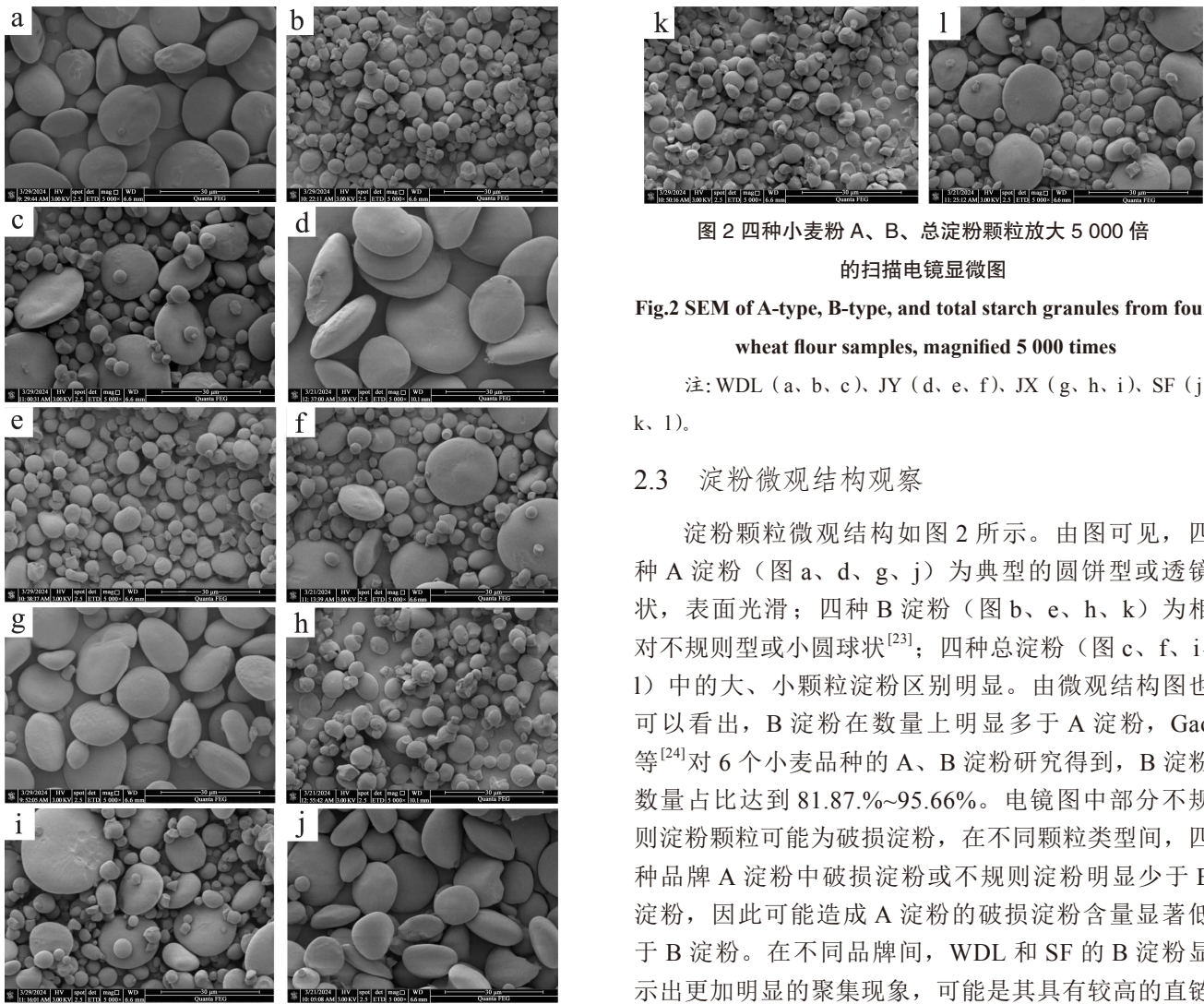


图 2 四种小麦粉 A、B、总淀粉颗粒放大 5 000 倍的扫描电镜显微镜

Fig.2 SEM of A-type, B-type, and total starch granules from four wheat flour samples, magnified 5 000 times

注:WDL (a、b、c)、JY (d、e、f)、JX (g、h、i)、SF (j、k、l)。

2.3 淀粉微观结构观察

淀粉颗粒微观结构如图 2 所示。由图可见，四种 A 淀粉（图 a、d、g、j）为典型的圆饼型或透镜状，表面光滑；四种 B 淀粉（图 b、e、h、k）为相对不规则型或小圆球状^[23]；四种总淀粉（图 c、f、i、l）中的大、小颗粒淀粉区别明显。由微观结构图也可以看出，B 淀粉在数量上明显多于 A 淀粉，Gao 等^[24]对 6 个小麦品种的 A、B 淀粉研究得到，B 淀粉数量占比达到 81.87%~95.66%。电镜图中部分不规则淀粉颗粒可能为破损淀粉，在不同颗粒类型间，四种品牌 A 淀粉中破损淀粉或不规则淀粉明显少于 B 淀粉，因此可能造成 A 淀粉的破损淀粉含量显著低于 B 淀粉。在不同品牌间，WDL 和 SF 的 B 淀粉显示出更加明显的聚集现象，可能是其具有较高的直链

淀粉含量,造成直链淀粉-蛋白质-脂质复合物聚集的结果^[17]。图2e中JY的B淀粉不规则颗粒明显较少,这与表2中JY的B淀粉和总淀粉破损淀粉含量最低的结果相一致。

2.4 淀粉透明度分析

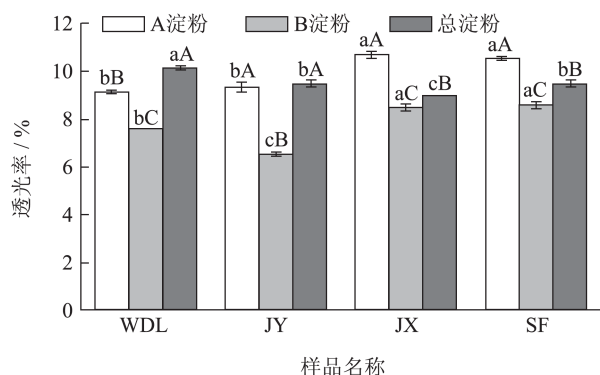


图3 四种小麦粉A、B、总淀粉的糊化透光率差异

Fig.3 Differences in the gelatinization transmittance of A-type, B-type, and total starch among four wheat flour brands

注: 图中不同小写字母表示同颗粒类型不同样品间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同样品不同颗粒类型间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

淀粉糊样品的透明度用透光率表示,透光率的值越大则淀粉糊的透明度越高。淀粉透明度的差异与直支链淀粉的溶出、膨胀淀粉残留物、支链链长分布、分子量、蛋白质含量以及淀粉颗粒大小等因素有关^[25]。图3为四种小麦粉各类淀粉糊的透光率,B淀粉糊的透光率(6.55%~8.60%)显著低于A淀粉糊(9.15%~10.55%)和总淀粉糊(9.00%~10.15%)。Singh等^[26]研究得到淀粉糊的透光率是糊状物中折射光的膨胀淀粉颗粒数的函数,膨胀的淀粉粒数量越多则透光率越低。同时B淀粉中较多的蛋白质、灰分等杂质对光的高折射降低了淀粉糊的透过程,导致四种B淀粉颗粒的透明度低于A淀粉,其中WDL、JY的B淀粉显著低于JX和SF,JY最低;在总淀粉中可能JX具有显著最高的灰分,造成JX的透明度最低。

另一方面,直链淀粉含量会影响淀粉糊透光率,在糊化过程中,淀粉颗粒吸水膨胀,结构变得无序,冷却后,直链淀粉分子更倾向于重新排列和聚集,更易回生^[27],因此可能造成淀粉糊透明度降低。因此在不同品牌间,WDL总淀粉具有相对较低的直链淀粉含量(28.71%),可能造成其具有较高的透明度;JY总淀粉(31.91%)和SF总淀粉(31.46%)直链淀粉含

量最为接近,造成透明度无显著性差异。但相比于直链淀粉对透明度的影响,颗粒尺寸大小可能占据更加主要的影响作用。有研究表明具有较大尺寸颗粒淀粉或者较大尺寸颗粒淀粉体积占比较高时,淀粉糊化后的残留物较少,同时大颗粒淀粉对抗水热处理与机械处理的能力较弱,当光线透过淀粉糊时较少的发生折射或反射,使淀粉糊的透光率更高^[28,29]。因此A淀粉糊和总淀粉糊的透光率高于B淀粉糊。

2.5 淀粉糊化特性分析

淀粉糊化过程中,随着温度的升高,淀粉颗粒开始逐渐吸水膨胀,淀粉分子有向溶液浸出的趋势,淀粉分子由有序转变为无序,悬浮液体系的粘度逐渐增大^[30]。有研究表明,直链淀粉含量、支链淀粉链长分布、淀粉结合蛋白质和脂质等指标均是影响淀粉糊化特性的重要因素^[18]。

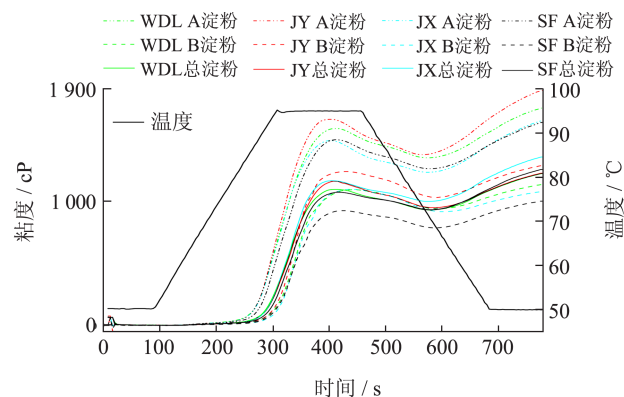


图4 四种小麦粉A、B和总淀粉的糊化曲线

Fig.4 Pasting curves of A-starch, B-starch, and total starch from four wheat flours

图4为四种小麦粉A、B和总淀粉的糊化特性曲线。表3为糊化特性参数值,由表可以看出不同颗粒类型的淀粉具有不同的糊化表现。三类淀粉中,总淀粉的糊化温度显著最高(77.65~78.15℃),A淀粉颗粒糊化温度最低(66.55~68.88℃),除JY外,其他小麦粉B淀粉颗粒的糊化温度显著高于A淀粉颗粒,这可能与B淀粉中较高的蛋白质含量有关,蛋白质会抑制淀粉溶胀,减少直链淀粉分子浸出到溶液体系中,造成B淀粉的糊化温度升高^[12]。不同品牌小麦粉间,可能由于四种品牌小麦粉淀粉间直链淀粉含量差异较小,只有SF的A淀粉表现出显著性。淀粉拥有较高的糊化温度,说明其具有较好的抗膨胀和抗破裂能力^[31]。因此,B淀粉表现出先对较好的抗膨胀和抗破裂能力。

表 3 四种小麦粉A、B和总淀粉的糊化特性差异

Table 3 Differences in the pasting characteristics of A starch, B starch and total starches among four wheat flour brands

项目		WDL	JY	JX	SF
糊化温度/℃	A 淀粉	66.55 ± 0.28 ^{bA}	67.48 ± 0.25 ^{bB}	67.58 ± 0.18 ^{abC}	68.88 ± 0.53 ^{cC}
	B 淀粉	71.55 ± 1.41 ^{aB}	68.90 ± 0.64 ^{aB}	69.30 ± 0.21 ^{aB}	71.25 ± 0.07 ^{aB}
	总淀粉	78.15 ± 0.21 ^{aA}	78.00 ± 0.00 ^{aA}	77.65 ± 0.35 ^{aA}	77.75 ± 0.00 ^{aA}
峰值粘度/cP	A 淀粉	1 558.00 ± 35.36 ^{abA}	1 684.00 ± 38.18 ^{aA}	1 504.50 ± 26.16 ^{bA}	1 516.00 ± 32.53 ^{bA}
	B 淀粉	1 068.50 ± 16.26 ^{bB}	1 251.50 ± 23.33 ^{aB}	1 096.50 ± 19.09 ^{bB}	910.00 ± 18.38 ^{cC}
	总淀粉	1 113.00 ± 28.28 ^{aB}	1 146.00 ± 19.80 ^{aB}	1 136.00 ± 38.18 ^{aB}	1 069.50 ± 2.12 ^{aB}
最终粘度/cP	A 淀粉	1 709.50 ± 53.03 ^{bA}	1 902.00 ± 19.80 ^{aA}	1 677.00 ± 45.25 ^{bA}	1 635.50 ± 4.95 ^{bA}
	B 淀粉	1 136.00 ± 5.66 ^{abB}	1 301.50 ± 24.75 ^{aB}	1 137.00 ± 86.27 ^{abB}	1 011.00 ± 16.97 ^{bC}
	总淀粉	1 240.00 ± 28.28 ^{aB}	1 237.00 ± 18.38 ^{aB}	1 325.50 ± 40.31 ^{aB}	1 263.50 ± 13.44 ^{aB}
最低粘度/cP	A 淀粉	1 334.00 ± 19.80 ^{aA}	1 382.00 ± 12.73 ^{aA}	1 289.50 ± 82.73 ^{aA}	1 272.00 ± 16.97 ^{aA}
	B 淀粉	849.50 ± 13.44 ^{bB}	1 018.50 ± 12.02 ^{aB}	827.50 ± 16.26 ^{bB}	745.50 ± 10.61 ^{cC}
	总淀粉	909.00 ± 26.87 ^{aB}	924.50 ± 31.82 ^{aC}	969.50 ± 38.89 ^{aB}	913.50 ± 14.85 ^{aB}
崩解值/cP	A 淀粉	217.50 ± 24.75 ^{bA}	302.00 ± 25.46 ^{aA}	265.00 ± 14.14 ^{abA}	244.00 ± 15.56 ^{abA}
	B 淀粉	219.00 ± 2.83 ^{abA}	233.00 ± 11.31 ^{abAB}	256.50 ± 14.85 ^{aA}	164.50 ± 28.99 ^{bA}
	总淀粉	172.50 ± 10.61 ^{bA}	221.50 ± 12.02 ^{aB}	166.50 ± 0.71 ^{bB}	156.00 ± 16.97 ^{bA}
回生值/cP	A 淀粉	389.50 ± 13.44 ^{bA}	520.00 ± 7.07 ^{aA}	437.50 ± 33.23 ^{bA}	363.50 ± 12.02 ^{bA}
	B 淀粉	286.50 ± 19.09 ^{aB}	283.00 ± 12.73 ^{aB}	264.00 ± 5.66 ^{aC}	265.50 ± 6.36 ^{aB}
	总淀粉	303.50 ± 16.26 ^{aB}	312.50 ± 30.20 ^{aB}	356.00 ± 1.41 ^{aB}	350.00 ± 1.41 ^{aA}

表 4 四种小麦粉A、B和总淀粉的热特性差异

Table 4 Differences in the thermal properties of A starch, B starch, and total starch among four wheat flour brands

项目		WDL	JY	JX	SF
$T_0/^\circ\text{C}$	A 淀粉	56.13 ± 0.05 ^{bA}	56.79 ± 0.11 ^{aA}	55.77 ± 0.01 ^{cA}	55.70 ± 0.08 ^{cA}
	B 淀粉	53.37 ± 0.07 ^{aC}	53.45 ± 0.08 ^{aC}	53.22 ± 0.26 ^{aC}	53.26 ± 0.01 ^{aC}
	总淀粉	54.20 ± 0.01 ^{bB}	54.78 ± 0.13 ^{aB}	54.05 ± 0.02 ^{bB}	54.21 ± 0.06 ^{bB}
$T_p/^\circ\text{C}$	A 淀粉	61.04 ± 0.07 ^{abA}	61.34 ± 0.18 ^{bA}	60.76 ± 0.13 ^{aA}	61.12 ± 0.02 ^{aA}
	B 淀粉	60.93 ± 0.21 ^{aA}	60.75 ± 0.02 ^{aB}	60.52 ± 0.24 ^{aA}	60.48 ± 0.12 ^{aC}
	总淀粉	60.51 ± 0.66 ^{aA}	60.99 ± 0.10 ^{aAB}	60.45 ± 0.11 ^{aA}	60.73 ± 0.04 ^{aB}
$T_c/^\circ\text{C}$	A 淀粉	65.07 ± 0.01 ^{cA}	66.27 ± 0.01 ^{aB}	65.50 ± 0.21 ^{bB}	66.05 ± 0.11 ^{aB}
	B 淀粉	67.00 ± 0.01 ^{aA}	66.90 ± 0.21 ^{abA}	66.56 ± 0.12 ^{bA}	66.64 ± 0.05 ^{bA}
	总淀粉	66.69 ± 0.08 ^{aB}	66.33 ± 0.07 ^{bB}	66.18 ± 0.06 ^{bA}	66.38 ± 0.13 ^{bA}
$T_c-T_0/^\circ\text{C}$	A 淀粉	8.95 ± 0.06 ^{cC}	9.48 ± 0.11 ^{bC}	9.74 ± 0.21 ^{bC}	10.35 ± 0.03 ^{aC}
	B 淀粉	13.63 ± 0.08 ^{aA}	13.45 ± 0.29 ^{aA}	13.34 ± 0.14 ^{aA}	13.38 ± 0.04 ^{aA}
	总淀粉	12.49 ± 0.06 ^{aB}	11.55 ± 0.20 ^{cB}	12.13 ± 0.08 ^{bB}	12.18 ± 0.06 ^{abB}
$\Delta H/(\text{J/g})$	A 淀粉	10.14 ± 0.07 ^{bcA}	10.98 ± 0.09 ^{aA}	9.88 ± 0.21 ^{cA}	10.23 ± 0.03 ^{bA}
	B 淀粉	9.45 ± 0.06 ^{aC}	8.14 ± 0.07 ^{cC}	7.92 ± 0.05 ^{dB}	8.76 ± 0.04 ^{bC}
	总淀粉	9.91 ± 0.06 ^{bB}	10.33 ± 0.09 ^{aB}	9.73 ± 0.08 ^{bA}	9.31 ± 0.01 ^{cB}

四种小麦粉中 A 淀粉的峰值粘度、最终粘度、最低粘度和回生值均显著高于 B 淀粉，其原因可能是 A 淀粉具有较高的直链淀粉含量。Hong 等^[32]表明具有较高直链淀粉含量的淀粉表现出较高的糊化粘度。本研究表 2 中 A 淀粉的直链淀粉含量为 31.92%~35.27%，B 淀粉的直链淀粉含量为 23.58%~28.06% 的结果与此结论保持一致。Li 等^[29]报道了相比于 B 淀粉，A 淀粉的颗粒尺寸较大表现出较大的膨胀力，占据了更大的糊状物体积分数，使体系粘度增大。不同品牌小麦粉总淀粉间，SF 总淀粉具有最低的峰值粘度（1 069.50 cP），可能是 SF 具有显著较高的蛋白质含量（0.34%），淀粉糊中的蛋白质可以保护淀粉颗粒的完整性，抑制淀粉颗粒的溶胀，造成峰值粘度降低。回生值反映了淀粉的稳定性和老化能力，B 淀粉的回生值显著低于 A 淀粉，相对不易老化。四个品牌小麦粉 A 淀粉的回生值中，JY（520.00 cP）显著最高；总淀粉中 WDL 回生值最低，在老化性方面相对具有优势。

2.6 淀粉热特性分析

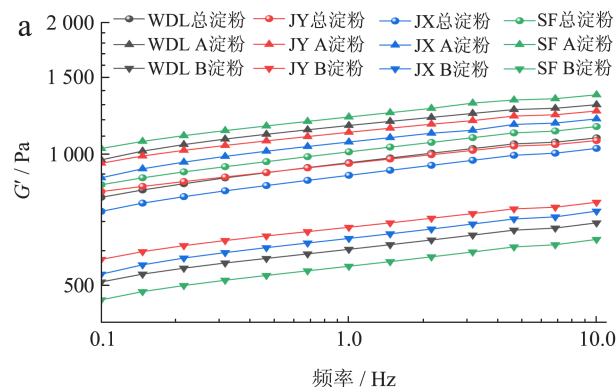
使用差示扫描量热仪对四种小麦粉 A、B 和总淀粉进行热特性测定，结果如表 4 所示。四种小麦粉的 A 淀粉均具有显著最高的峰值糊化温度（ T_p ）、糊化焓（ ΔH ）和初始糊化温度（ T_0 ），同时具有最低的最终糊化温度（ T_c ），因此具有较小的糊化温度范围（ T_c-T_0 ），B 淀粉与之相反。较高的 T_0 反映了淀粉具有较高的结晶性和热阻^[33]，四种 A 颗粒淀粉的 T_0 （55.70~56.79 °C）显著大于 B 颗粒淀粉 T_0 （53.22~53.45 °C）；不同品牌小麦粉总淀粉间，JY 总淀粉和 A 淀粉的 T_0 显著高于其他三种小麦淀粉。可得到在 A、B 淀粉间，A 淀粉具有较高的结晶性和热阻。糊化温度范围（ T_c-T_0 ）反映了淀粉中晶体结构的异质性^[34]，由表可知，四种 B 颗粒淀粉的异质性显著大于 A 颗粒淀粉和总淀粉；在不同品牌总淀粉中，JY 的异质性显著小于 WDL、JX、SF。糊化焓（ ΔH ）是指淀粉在水中加热时双螺旋解旋时所需的能量，与颗粒的整体结晶度有关^[18,35]。Fredriksson 等^[36]研究指出直链淀粉对淀粉糊化具有重要影响，直链淀粉和直链淀粉-脂质复合物等在一定程度上抑制淀粉溶胀，提高了淀粉的 ΔH ，因此淀粉直链淀粉含量越高时，淀粉的 ΔH 越高。四种小麦粉 A 淀粉颗粒的 ΔH 显著高于 B 淀粉颗粒和总淀粉，B 淀粉颗粒最低，这与本研究中直链淀粉含量保持一致；在四种小麦粉总淀粉中，可能由于 JY 具有较高的直链淀粉含量，因此具有较高的 ΔH 。

2.7 淀粉凝胶动态流变学特性分析

在线性粘弹性区间内选择 2% 的应变对淀粉凝胶

样品进行频率扫描，得到其动态振荡流变特性：弹性模量（ G' ）、粘性模量（ G'' ）和损耗因子正切值（ $\tan \delta$ ）。弹性模量（ G' ）表示淀粉凝胶储存变形能量的能力，粘性模量（ G'' ）表示淀粉凝胶流动所消耗的变形能量， $\tan \delta$ 表示淀粉凝胶的粘弹特性^[37]。如图 4a、4b 所示，四种小麦淀粉的 G' 和 G'' 均随频率增加而增大，且 G' 明显大于 G'' ，现出典型的弱凝胶特征。在相同频率下，四种小麦淀粉的 G' 和 G'' 均表现为 A 淀粉 > 总淀粉 > B 淀粉，这也与糊化特性中的峰值粘度结果保持一致，说明 A 淀粉具有较高的粘性和弹性，B 淀粉的粘弹性最低。这可能与 A 淀粉和总淀粉具有相对较高的直链淀粉含量有关，其更易形成致密的凝胶网络结构，从而具有较高的 G' 和 G'' 。Zhang 等^[38]的研究也表明 A 淀粉具有较高的粘度和较强的剪切稀化行为。同时，与 B 淀粉相比，A 淀粉和总淀粉 G' 、 G'' 的数值更为接近，表明 A 淀粉对总淀粉的弹性模量、粘性模量贡献更大。在四种小麦粉品牌中，SF 的 A 淀粉和总淀粉的 G' 和 G'' 相对较高，JY 和 WDL 的 G'' 更为接近，而 SF 的 B 淀粉的 G' 和 G'' 相对较低。说明与其余三种淀粉相比，SF 的 A、B 淀粉颗粒间的粘弹性差异更大。

四种品牌小麦粉的 A、B 和总淀粉在相同频率下均表现为 $G'' < G'$ ，因此 $\tan \delta < 1$ ，淀粉凝胶主要表现为弹性，具有类似固体的行为。图 4c 所示，所有淀粉样品的 $\tan \delta$ 随频率增加均呈现先略微下降后上升的趋势，其中 A 淀粉和总淀粉变化趋势相似，而 B 淀粉的上升趋势更加明显。在整个扫描区域（0.1~10 Hz）中，低频扫描区域下 B 淀粉的 $\tan \delta$ 低于 A 淀粉和总淀粉，弹性比例较大。在高频下 B 淀粉的 $\tan \delta$ 高于 A 淀粉和总淀粉，此时粘性比例较大，说明，随着频率的增加 B 淀粉的 G'' 增长更快，体系流动性增加。总体来说，相比于 A 淀粉和总淀粉，B 淀粉对频率依赖性较高，在较大的变形下 B 淀粉的粘性行为变化更加显著；在四种总淀粉中，随着频率的增加，JX 的 $\tan \delta$ 增长的更快，表明随着剪切速率的增加，JX 的粘性变化更加明显。



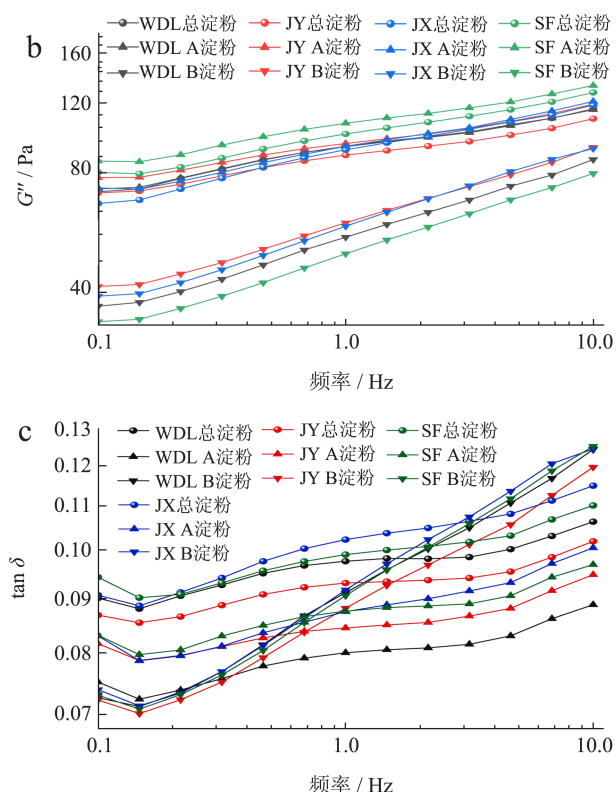


图5 四种小麦粉A、B、总淀粉的动态流变学差异

Fig.5 Differences in dynamic rheology of A starch, B starch, and total starch among four different brands of wheat flour

注: a-弹性模量; b-粘性模量; c-损耗因子正切值。

3 结论

WDL、JY、JX、SF 四种小麦粉各淀粉分离度良好,不同品牌淀粉的组成和理化性质存在显著性差异($P<0.05$)。从粒径分布范围来看,JY 总淀粉最窄 JY 总淀粉的粒径分布范围最窄,SF 最宽。从淀粉组成来看,A 淀粉的直链淀粉含量(31.92%~35.27%)显著高于 B 淀粉(23.58%~28.06%),而蛋白质、灰分、破损淀粉含量显著低于 B 淀粉,JY 总淀粉的直链淀粉含量(31.91%)最高,但与 WDL、JX 和 SF 间无显著性差异。受颗粒大小与直链淀粉的影响,A 淀粉的透明度显著高于 B 淀粉,JY 的 A、B 淀粉间透明度差值最大。

热力学和糊化特性表明,在不同颗粒类型中,与 B 淀粉相比,A 淀粉具有较窄的糊化温度范围,较高的糊化焓和糊化粘度,但回生值较高,较易老化;在四种小麦淀粉中,受直链淀粉的影响,JY 的总淀粉具有较高的初始糊化温度(54.78 °C)以及糊化焓(10.33 J/g),表现出相对较高的结晶性和热阻。WDL 的回生值(303.50 cP)最低,具有相对较好的老化特性。而 JX、SF 的糊化温度最低,更易糊化。

动态流变学特性结果表明,在不同颗粒类型中,

A 淀粉糊具有较高的弹性模量和粘性模量,B 淀粉对频率具有较高的依赖性,在较高频率下,B 淀粉凝胶具有更高的体系流动性;在四种小麦淀粉中,SF 的总淀粉具有较高的弹性模量、粘性模量,SF 的 A、B 淀粉间的粘、弹性模量差异最大。

本研究选取四种小麦粉样品,对不同颗粒类型的 A、B 淀粉以及不同品牌同颗粒类型淀粉理化特性进行差异分析,以期对淀粉特性的多尺度分析以及 A、B 淀粉对面制品特性的影响分析提供一定的理论指导。

参考文献

- [1] Sissons M, Egan N. Effect of variation in starch B-granule content in durum wheat on technological properties and *in vitro* starch digestion of spaghetti [J]. Cereal Chemistry, 2023, 100(4): 873-886.
- [2] Subaric D, Babic J, Lalic A, et al. Isolation and characterisation of starch from different barley and oat varieties [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2011, 29(4): 354-360.
- [3] Karlsson R, Olered R, Eliasson A C. Changes in starch granule size distribution and starch gelatinization properties during development and maturation of wheat, barley and rye [J]. Starch-Stärke, 1983, 35(10): 335-340.
- [4] Blazek J, Salman H, Rubio A L, et al. Structural characterization of wheat starch granules differing in amylose content and functional characteristics [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(4): 705-711.
- [5] Cai L, Shi Y C. Structure and digestibility of crystalline short-chain amylose from debranched waxy wheat, waxy maize, and waxy potato starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(4): 1117-1123.
- [6] 安迪,郑学玲.市售小麦淀粉特性及其对面条品质的影响[J].粮食与油脂,2018,31(12):58-63.
- [7] 孔雁,张影全,邢亚楠,等.小麦粉淀粉特性对兰州拉面质量的影响研究[J].现代食品科技,2017,33(1):206-211.
- [8] Ellis R P, Cochrane M P, Dale M F B, et al. Starch production and industrial use [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1998, 77(3): 289-311.
- [9] Ming Z, Tang X, Liu J, et al. Advancements in research on constructing physiological and pathological liver models and their applications utilizing bioprinting technology [J]. Molecules, 2023, 28(9): 3683.
- [10] Li M, Daygon V D, Solah V, et al. Starch granule size: Does it matter? [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(19): 3683-3703.
- [11] Li W, Shan Y, Xiao X, et al. Physicochemical properties of A- and B-starch granules isolated from hard red and soft red winter wheat [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(26): 6477-6484.
- [12] Shang J, Li L, Zhao B, et al. Comparative studies on physicochemical properties of total, A- and B-type starch from soft and hard wheat varieties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 714-723.

- [13] EDWARDS N, DEXTER J, SCANLON M. Starch participation in durum dough linear viscoelastic properties [J]. Cereal Chemistry, 2002, 79(6): 850-856.
- [14] LIANG W, SUN C Y, SHEN H S, et al. Adequately increasing the wheat B-starch ratio can improve the structure-properties of dough during freeze-thaw cycles: Mechanisms and conformational relations [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129481.
- [15] 王轶,郑学玲.前、中、后路小麦淀粉精制前后组成及特性差异性分析[J].食品科学,2024,45(11):84-90.
- [16] SUN X, SUN Z, SALEH A S, et al. Understanding the granule, growth ring, blocklets, crystalline and molecular structure of normal and waxy wheat A-and B-starch granules [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107034.
- [17] ZHANG K, ZHAO D, HUANG Q, et al. Physicochemical, structural properties and *in vitro* digestibility of A-and B-type granules isolated from green wheat and mature wheat starch [J]. Starch-Stärke, 2021, 73(9-10): 2100065.
- [18] LI W, WU G, LUO Q, et al. Effects of removal of surface proteins on physicochemical and structural properties of A-and B-starch isolated from normal and waxy wheat [J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53: 2673-2685.
- [19] YANG Z, YU W, XU D, et al. Impact of frozen storage on whole wheat starch and its A-Type and B-Type granules isolated from frozen dough [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 223: 115142.
- [20] ZHANG K, LU Q Y. Physicochemical properties of A-and B-type granules of wheat starch and effects on the quality of wheat-based noodle [J]. International Journal of Food Engineering, 2017, 13(7): 20160437.
- [21] PENG M, GAO M, ABDEL-AAL E S, et al. Separation and characterization of A-and B-type starch granules in wheat endosperm [J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(3): 375-379.
- [22] WATANABE S, NISHITSUJI Y, HAYAKAWA K, et al. Pasting properties of A-and B-type wheat starch granules and annealed starches in relation to swelling and solubility [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129738.
- [23] ZHANG B, ZHAO K, SU C, et al. Comparing the multi-scale structure, physicochemical properties and digestibility of wheat A-and B-starch with repeated versus continuous heat-moisture treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 519-528.
- [24] GAO X, TONG J, GUO L, et al. Influence of gluten and starch granules interactions on dough mixing properties in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105885.
- [25] SINGH J, KAUR L, MCCARTHY O. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications-A review [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(1): 1-22.
- [26] SINGH J, MCCARTHY O J, SINGH H. Physico-chemical and morphological characteristics of New Zealand Taewa (*Maori potato*) starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(4): 569-581.
- [27] YU S, MA Y, SUN D W. Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage [J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(2): 139-144.
- [28] CHE L M, WANG L J, LI D, et al. Starch pastes thinning during high-pressure homogenization [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(1): 32-38.
- [29] LI W, GAO J, WU G, et al. Physicochemical and structural properties of A-and B-starch isolated from normal and waxy wheat: Effects of lipids removal [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 364-373.
- [30] 王心,张萌,刘笑,等.钙离子对小麦淀粉-低酯甜菜果胶复配体系糊化和流变特性的影响[J].中国食品学报,2023,23(9):44-52.
- [31] MA S, ZHENG X, WANG X, et al. Effect of A-and B-type granules on the physical properties of starch from six wheat varieties [J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2015, 7(4): 531-536.
- [32] HONG J, LI L, LI C, et al. Effect of heat-moisture treatment on physicochemical, thermal, morphological, and structural properties of mechanically activated large A-and Small B-wheat starch granules [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(10): 2795-2804.
- [33] TIAN Y, LIU X, KIRKENSGAARD J J K, et al. Characterization of different high amylose starch granules. Part I: Multi-scale structures and relationships to thermal properties [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109286.
- [34] LI H, DHITAL S, FLANAGAN B M, et al. High-amylose wheat and maize starches have distinctly different granule organization and annealing behaviour: A key role for chain mobility [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105820.
- [35] HORNUNG P S, AVILA S, LAZZAROTTO M, et al. Enhancement of the functional properties of Dioscoreaceas native starches: Mixture as a green modification process [J]. Thermochimica Acta, 2017, 649: 31-40.
- [36] FREDRIKSSON H, SILVERIO J, ANDERSSON R, et al. The influence of amylose and amylopectin characteristics on gelatinization and retrogradation properties of different starches [J]. Carbohydrate Polymers, 1998, 35(3-4): 119-134.
- [37] LERAY G, OLIETE B, MEZAIZE S, et al. Effects of freezing and frozen storage conditions on the rheological properties of different formulations of non-yeasted wheat and gluten-free bread dough [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(1): 70-76.
- [38] ZHANG C, WANG M, TAN Z, et al. Differential distribution of surface proteins/lipids between wheat A- and B-starch granule contributes to their difference in pasting and rheological properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions, 2023: 240: 124430.