

山西运城六种小麦淀粉结构及理化特性分析

付丽红, 畅莹莹, 徐润东, 杨梓婷, 郭云娥, 杨鸿宇

Morphological Features and Physicochemical Properties of Starches from Six Wheat Varieties in Yuncheng, Shanxi Province

FU Lihong, CHANG Yingying, XU Rundong, YANG Ziting, GUO Yun'e, and YANG Hongyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060090>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

加酶挤压对小麦淀粉结构和理化性质的影响

Effect of Enzyme Extrusion on Structure and Physicochemical Properties of Wheat Starch

食品工业科技. 2022, 43(15): 50-57 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090360>

乙醇-热处理制备冷水溶胀小麦淀粉及其结构和功能特性的研究

Structure and Functional Properties of Cold Water Swelling Wheat Starch by Ethanol-Heat Treatment

食品工业科技. 2022, 43(6): 18-24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060114>

微波处理对三种淀粉结构及其理化特性的影响

Effects of Microwave Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Three Kinds of Starches

食品工业科技. 2024, 45(24): 90-97 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010112>

大豆低聚肽对小麦淀粉理化性质的影响

Effects of Soybean Oligopeptides on the Gel Properties of Wheat Starch

食品工业科技. 2024, 45(12): 85-91 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080071>

槲皮素和芦丁对小麦淀粉的消化特性及其之间相互作用的研究

Study on the Digestibility and Interaction of Quercetin and Rutin to Wheat Starch

食品工业科技. 2021, 42(5): 45-50,59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050200>

基于右旋糖酐酶制备小麦多孔淀粉及其特性

Wheat Porous Starch: Preparation and Characteristics with Dextranase-Catalyzed Rotation

食品工业科技. 2024, 45(3): 123-129 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050025>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

付丽红, 畅莹莹, 徐润东, 等. 山西运城六种小麦淀粉结构及理化特性分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 286–294. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060090

FU Lihong, CHANG Yingying, XU Rundong, et al. Morphological Features and Physicochemical Properties of Starches from Six Wheat Varieties in Yuncheng, Shanxi Province[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 286–294. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060090

· 分析检测 ·

山西运城六种小麦淀粉结构及理化特性分析

付丽红, 畅莹莹, 徐润东, 杨梓婷, 郭云娥, 杨鸿宇
(山西农业大学食品科学与工程学院, 山西太谷 030801)

摘要: 本文为了了解不同品种小麦淀粉的差异与优势, 为山西运城地区小麦品种的选择和加工应用提供科学依据。本文选用山西运城六种特色小麦为原料, 通过扫描电镜、傅里叶红外光谱仪、X-射线衍射仪、差示扫描量热仪和快速粘度仪等技术, 对不同淀粉的微观结构 (直/支链淀粉含量、颗粒形态、粒径大小、晶体结构和短程有序度) 和理化特性 (透明度、溶胀性、冻融稳定性、糊化特性、热特性、以及凝胶特性) 进行测定和相关性分析。结果表明, 六种小麦淀粉由 A 和 B 淀粉粒组成, 均属于典型的 A 型晶体结构, 相对结晶度为 11.63%~20.41%, 直链淀粉含量范围为 0.56%~26.24%。不同品种淀粉粒径、结晶度、糊化特性、冻融性和质构特性均存在差异性 ($P<0.05$), 其中‘运黑 161’淀粉颗粒最小, 短链有序程度、热焓值 ΔH 、透明度、冻融稳定性和膨胀度均最高, 糊化温度低易糊化, 不易回生。在质构特性方面, ‘济麦 23’淀粉凝胶硬度、弹性和咀嚼性显著高于其他组 ($P<0.05$)。相关性分析表明, 直链淀粉含量与溶解度、糊化温度、回生值呈正相关, 与结晶度和热焓值呈负相关。淀粉相对结晶度与糊化温度、溶解度和回生值之间也存在相关性。综上所述, 淀粉的结构和理化特性因小麦品种不同而存在差异性, ‘运黑 161’和‘济麦 23’是两种优质小麦淀粉, 为淀粉工业生产和应用提供参考。

关键词: 小麦, 淀粉, 理化特性, 结构特性

中图分类号: TS232

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0286-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060090



本文网刊:

Morphological Features and Physicochemical Properties of Starches from Six Wheat Varieties in Yuncheng, Shanxi Province

FU Lihong, CHANG Yingying, XU Rundong, YANG Ziting, GUO Yun'e, YANG Hongyu

(College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: This study aimed to elucidate the differences and advantages among starches from various wheat varieties, providing scientific evidence for the selection and application of these wheat varieties in the Yuncheng region of Shanxi Province. Six kinds of specialty wheat starches were used to analyze the morphological features and physicochemical properties by scanning electron microscopy, fourier transform infrared spectrometer, X-ray diffractometer, differential scanning calorimeter and rapid visco analyser. The microstructure of starches included amylose content, amylopectin content, morphology, particle size, crystallinity and short-range ordering. The physicochemical properties included transparency, swelling, freeze-thaw stability, pasting properties, thermal properties and gel texture characteristics. The correlation between different factors was analyzed using pearson correlation coefficient. The results showed that the six wheat starches consisted of A and B starch granules, which belonged to the typical A-type crystal structure, with relative crystallinity ranging from 11.63% to 20.41%. The content of amylose ranged from 0.56% to 26.24%. There were significant differences in the parameters of granule size, crystallinity, pasting characteristics, freeze-thaw stability and gel texture characteristics of different starches ($P<0.05$). The 'Yunhei 161' starch had the smallest particle size, the highest degree of short-chain ordering, enthalpy (ΔH), transparency, freeze-thaw stability and swelling. This starch was easy to paste but not easy to regenerate. In terms of gel textural properties, hardness, elasticity and chewiness of 'Jiema 23' starch were

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 山西省基础研究计划 (202103021223154)。

作者简介: 付丽红 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 粮油加工, E-mail: fulihong031@163.com。

significantly higher than the other groups ($P < 0.05$). Correlation analysis showed that the content of amylose was positively correlated with solubility, pasting temperature and setback, which negatively correlated with crystallinity and enthalpy. Correlations were also found between relative crystallinity, pasting temperature, solubility and setback. In conclusion, the structure and physicochemical properties of starch were differentiated by wheat varieties. 'Yunhe 161' and 'Jiema 23' were two high quality wheat starches, which could provide a reference for starch industrial application.

Key words: wheat; starch; physicochemical properties; morphological features

小麦(*Triticum aestivum* L.)是世界上产量最高的三大作物之一,也是我国居民的主粮,我国小麦的生产量和消费量均排世界前列^[1]。淀粉是小麦的主要营养物质,其质量约占小麦粉的 60%~70%,相比玉米淀粉,其具有糊化温度低、热稳定好和耐剪切等优势,因此成为淀粉的重要原料,在食品工业中可作为稳定剂、增稠剂或黏结剂等,以提高食品的质地和口感。小麦淀粉具有两种颗粒类型,分别是粒径大小为 10~35 μm 的 A 淀粉和 2~10 μm 的 B 淀粉,粒径大小分布呈双峰型^[2]。研究发现,小麦品种间差异对其淀粉、面粉及相关产品产生很大的影响。王天姣^[3]分析了黄淮麦区 33 个品种小麦淀粉特性,发现淀粉性状变异系数范围为 2.16%~25.84%,淀粉特性差异较大,主要对烩面的弹性、坚实度和爽口性有影响。石吕等^[4]对江苏重要的 2 种小麦淀粉进行分析比较,发现‘苏裸麦 2 号’的结晶度高于‘扬麦 29’,其淀粉溶液峰值黏度、最低黏度和崩解值均显著高于‘扬麦 29’,最终黏度与回生值则呈相反趋势。亢玲等^[5]发现 299 个不同品种宁夏春小麦淀粉糊化特性具有较大差异。雍玉东等^[6]对江淮地区的 4 个品种小麦进行淀粉粒度和黏性参数测定,发现淀粉间存在差异性。Shi 等^[7]研究 3 种不同品种小麦淀粉的理化性质与 3D 打印之间的关系,并筛选出适合 3D 打印的淀粉样品。

小麦是山西省的第二大粮食作物,种植面积为 $66.67 \times 10^4 \text{ hm}^2$,运城的小麦产量占全省的 50% 以上,对该省的小麦产业有着非常重要的影响^[8]。目前,运城当地小麦淀粉的开发应用相对比较缺乏,未来有很大的产业化发展空间,为了推进小麦淀粉产业的发展,本文选择了山西省运城市主推的六种小麦品种,对其淀粉的结构和理化特性进行分析,筛选出适宜不同加工特性的淀粉品种,为运城小麦淀粉基食品的品质提升和小麦淀粉的工业开发提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘鲁原 118’、‘济麦 23’、‘太麦 198’、‘泰农 18’、‘荷麦 24’、‘运黑 161’小麦 运城棉花研究所;氢氧化钠 分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司;盐酸 分析纯,北京智微科技有限公司;溴化钾 光谱纯, Sigma 公司。

HSJ 恒温水浴锅 江苏科析仪器有限公司; D8Advance X 射线衍射仪、Tensor 27 傅里叶变换红外光谱仪 德国布鲁克科技有限公司; DSC-3 差示

扫描量热仪 梅特勒-托利多国际贸易有限公司; HELOS-OASIS 干湿二合一激光粒度仪 德国新帕泰克有限公司; JSM-7500F 冷场发射扫描电子显微镜 日本电子公司; RAPID-20 快速黏度仪 上海保圣实业发展有限公司; TMS-Pro 质构仪 美国 Food-Technology Corporation 公司; Agilent Carry 60 紫外-可见分光光度计 北京安捷伦科技有限公司; KDC-1044L 大容量低速离心机 安徽中科中佳科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 小麦淀粉的提取 将不同品种小麦籽粒粉碎过筛,小麦粉与蒸馏水按照 1:5(w/v)混匀,胶体磨处理 3 min, 4 $^{\circ}\text{C}$ 沉降 8 h, 4000 r/min 离心 5 min 得沉淀,与 0.2% 的 NaOH 按 1:7(w/v)混匀搅拌 4 h, 4000 r/min 离心 5 min 得到沉淀,去除上层和底部杂质后,加入蒸馏水复溶,如此清洗反复 3~4 次,离心后得沉淀,按照 1:4 加入蒸馏水混匀后,调节至 pH 为 7,离心后冷冻干燥得到小麦淀粉样品,粉碎后备用。

1.2.2 直/支链淀粉含量测定 参考 GB/T 15683-2008《大米 直链淀粉含量的测定》和 Tan 等^[9]的方法进行测定。

1.2.3 小麦淀粉颗粒形貌观察 将双面导电胶贴在载物台上,将样品均匀分散在导电胶上喷金观察不同淀粉颗粒微观形貌,加速电压为 10.0 kV,选择 1000 倍放大观察并拍片^[10]。

1.2.4 粒径测定 用空气作为分散介质,充分分散样品颗粒,样品在 5 mw 氦氖激光射线下进行测定,波长 632.8 nm,全自动对焦准直系统,多元检测器,速率 2000 次/秒。

1.2.5 傅里叶红外光谱测定 将小麦淀粉与 KBr 以 1:100(w/w)的比例混合,研磨压片,在 FTIR 仪器上就行扫描其范围为 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 。

1.2.6 晶体特性测定 参考 Peng 等^[11]的方法,采用 X 射线衍射仪检测样品, CuK α (40 kV, 30 mA)为辐射源, 2θ 为 $4^{\circ} \sim 40^{\circ}$,速率 $4^{\circ}/\text{min}$,步长 0.02° 。

1.2.7 热特性测定 小麦淀粉样品与去离子水在坩埚中按 1:2 混合密封, 4 $^{\circ}\text{C}$ 下平衡 24 h 后开始测定,温度范围变化为 $10 \sim 160^{\circ}\text{C}$,速率为 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$,记录淀粉晶体熔化热流变化并计算。

1.2.8 小麦淀粉糊透明度测定 参照 Yang 等^[12]的方法,配制 1%(w/v)的淀粉乳 50 mL,在 95°C 下恒温水浴 30 min,自然冷却降至室温,用紫外分光光度

计在 600 nm 下测吸光度值。

1.2.9 小麦淀粉糊溶胀性测定 参考程雯^[13]的方法进行测定,制备 3%(w/w)的淀粉乳,分别在 50、60、70、80 和 90 ℃ 水浴糊化 30 min,糊化完成后冷却到室温,4000 r/min 离心 10 min,分离并收集沉淀和上清液。将上清液置于 105 ℃ 烘箱中烘干,准确称量上清液干重 W_s ,根据下列公式计算样品溶解指数(SI);称量沉淀质量 W_r ,结合样品质量 W_i 和 SI 根据公式计算溶胀度(SP)。

$$SI(\%) = \frac{W_s}{W_i} \times 100$$

$$SP(g/g) = \frac{W_r}{W_i} \times (100 - SI)$$

式中:SI 表示样品溶解指数,%;SP 表示样品溶胀度,g/g; W_s 表示上清液干重,g; W_i 表示取样量,g; W_r 表示沉淀的质量,g。

1.2.10 小麦淀粉糊冻融稳定性测定 参考尹志华等^[14]的方法并做修改,配制 6%(w/w)的淀粉乳,在 95 ℃ 下恒温水浴 30 min 充分糊化完成后冷却到室温后,搅拌均匀,称取淀粉糊的质量(m_1),-20 ℃ 冷藏 1 d 后,25 ℃ 水浴解冻直至样品处于平衡状态,离心去上清液,称取沉淀质量(m_2),计算析水率,此冻融循环连续进行 5 次。

$$\text{析水率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中: m_1 表示离心管中淀粉糊的质量,g; m_2 表示沉淀的质量,g。

1.2.11 小麦淀粉糊化特性测定 参考 GB/T 24853-2010 测定分析样品的糊化性。测试程序为:50 ℃ 保持 1 min,随后以 13 ℃/min 的速度升温至 95 ℃,95 ℃ 保持 3 min,再以 13 ℃/min 的速度冷却至 50 ℃,随后在 50 ℃ 保持 2 min,13 min 时结束测定。搅拌器在起始 10 s 内转动速度为 960 r/min,之后保持 160 r/min。

1.2.12 小麦淀粉凝胶质构特性测定 参照魏波等^[15]的方法,配制 8%(w/w)的淀粉乳置于 50 mL 烧杯中,95 ℃ 水浴糊化,然后冷却到室温,放 4 ℃ 冷藏过夜,使用直径 12.7 mm 的 P/0.5 型圆柱形探头,测试速度 60 mm/min,测后速度 120 mm/min,触发力 0.2 N,停留时间 2 s,测定小麦凝胶体的质构特性。

1.3 数据处理

每个样品均进行三次重复试验,采用 Excel 2016、OMNIC、SPSS 软件对数据进行分析处理,采用 Origin 2018 软件进行绘图,使用 Photoshop 2024 对图像进行清晰度的调整。

2 结果与分析

2.1 直/支链淀粉含量分析

由图 1 可以看出,六个品种小麦淀粉中直链淀

粉含量范围是 0.56%~26.24%,支链淀粉含量范围是 73.56%~98.73%,其中‘太麦 198’的直链淀粉含量为 26.24%,显著高于其它五种($P<0.05$),支链淀粉含量最低为 73.56%。‘鲁原 118’和‘泰农 18’中淀粉组成差异不显著($P>0.05$);而‘运黑 161’淀粉几乎由支链淀粉组成,表明‘运黑 161’为糯质小麦,与其它五个品种间存在显著差异。Singh 等^[16]对 18 种印度品种小麦的直链淀粉进行测定,含量在 18.20%~28.8% 范围内。王海萍等^[17]采集中国九个省市的 200 种小麦,淀粉中直链淀粉含量为 20.71%~23.78%。望俊森等^[18]研究黄淮南片的 150 个小麦品种的直链淀粉含量为 18.78%~23.39%。因此,除‘运黑 161’以外的其他五种淀粉的直链淀粉范围为 23.43%~26.24%,与文献报道的范围相一致。

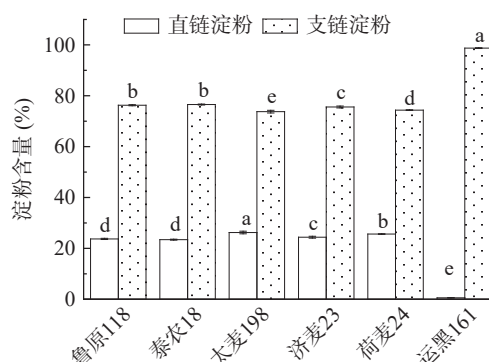


图 1 不同品种小麦淀粉的直链和支链淀粉含量

Fig.1 Amylose and amylopectin content of starch from different wheat varieties

注:不同小写字母表示品种之间具有显著性差异($P<0.05$),图 4、图 6 同。

2.2 小麦淀粉颗粒形貌分析

小麦淀粉中有大、小两种淀粉粒,即 $>10 \mu\text{m}$ 的 A 淀粉粒和 $<10 \mu\text{m}$ 的 B 淀粉粒,A 型淀粉粒呈透镜状或圆盘状,B 型淀粉粒呈球形或不规则形^[2]。从扫描电子显微镜图 2 中可以看出,小麦淀粉的大淀粉粒大多数为椭圆型,表面有凹陷;小淀粉粒大多数为球形,颗粒圆润饱满,体积较小,附着在大淀粉粒上或分散在大淀粉粒的周围。在六种小麦淀粉中,‘运黑

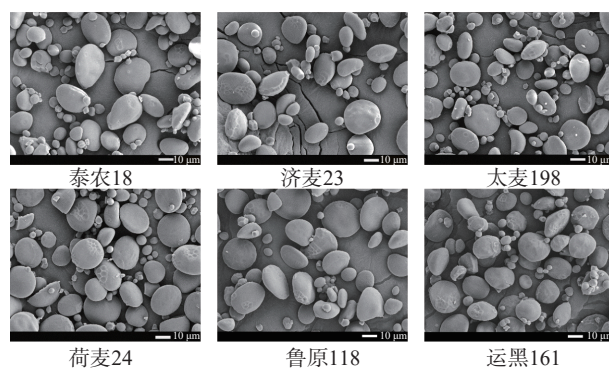


图 2 不同品种的小麦淀粉 SEM 图(1000×)

Fig.2 Scanning electron microscopy of starch in different wheat varieties (1000×)

161’淀粉颗粒表面最为粗糙,褶皱凹陷较多;‘济麦 23’淀粉颗粒多为扁圆形,表面有一些凹陷的大颗粒;‘荷麦 24’和‘鲁原 118’淀粉颗粒表面也有凹陷,有少量破损颗粒;‘太麦 198’和‘泰农 18’淀粉颗粒表面较为光滑。

2.3 小麦淀粉粒径分析

淀粉的粒度分布是量化其颗粒特征的有效手段之一,运城六个品种小麦淀粉粒径分布如表 1 所示,从表中可以看出淀粉颗粒粒径大小范围为 5.71~35.97 μm,不同品种之间存在一定差异性,‘鲁原 118’小麦淀粉颗粒的 X_{10} ($8.56\pm0.19\text{ }\mu\text{m}$)、 X_{50} ($17.85\pm0.14\text{ }\mu\text{m}$)、面积平均粒径 SMD($10.20\pm0.12\text{ }\mu\text{m}$)、体积平均粒径 VMD($18.03\pm0.13\text{ }\mu\text{m}$)均最大,说明‘鲁原 118’淀粉颗粒比其他五个品种的颗粒大。‘太麦 198’和‘泰农 18’淀粉粒径分布差异不显著。而‘运黑 161’淀粉颗粒的 X_{10} ($5.71\pm0.19\text{ }\mu\text{m}$)、 X_{50} ($15.29\pm0.22\text{ }\mu\text{m}$)、 X_{90} ($24.38\pm0.18\text{ }\mu\text{m}$)、 X_{99} ($32.23\pm0.53\text{ }\mu\text{m}$)均最小,且具有第二大的面积平均粒径 $9.52\pm0.47\text{ }\mu\text{m}$,最小的体积平均粒径 $15.28\pm0.21\text{ }\mu\text{m}$,说明‘运黑 161’淀粉颗粒是六个品种淀粉颗粒中最小的,它的面积平均粒径较大与它颗粒表面粗糙,褶皱凹陷多有关。与 Singh 等^[16]报道的 18 种印度品种小麦淀粉粒径大小范围($2.3\sim28.5\text{ }\mu\text{m}$)相比较大;与蔡雨佳等^[19]报道的‘临麦 4 号’、‘济南 17’和‘烟农 999’等 7 个小麦品种淀粉粒径大小范围 $2.45\sim33.85\text{ }\mu\text{m}$ 相一致。

2.4 傅里叶红外光谱分析

傅里叶红外光谱(FITR)可以用来检测淀粉分子构象、双螺旋结构变化和淀粉分子结晶度等的改变^[20]。六种淀粉样品傅里叶红外光谱如图 3 所示, 3400 cm^{-1} 处的吸收峰对应于强而宽的分子间氢键 O-H 的伸缩振动, 2930 cm^{-1} 附近的中等强度吸收峰代表 CH_2 的不对称伸缩振动, 1640 cm^{-1} 附近的吸收峰对应于淀粉中由于吸附水而产生的吸收峰, 999 cm^{-1} 附近的峰主要是 C-OH 的弯曲振动,与淀粉大分子中羟基之间形成的氢键结构相对应^[21]。从图中可看出,六个样品间特征吸收峰未见明显差异,这表明淀粉的基本化学结构相同。

淀粉在 1047 cm^{-1} 处的吸收峰强度与淀粉结晶

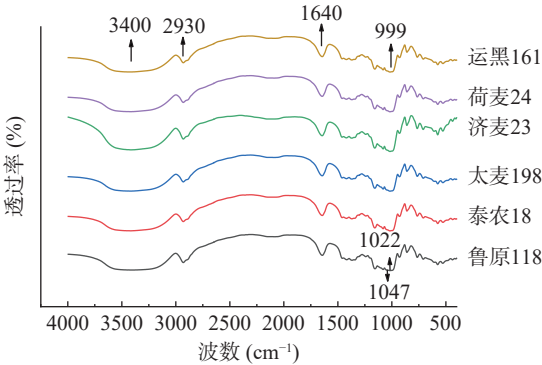


图 3 不同品种小麦淀粉的红外图谱

Fig.3 FTIR spectra of starch from different wheat varieties

区结构特征有关,而 1022 cm^{-1} 附近的吸收峰则与淀粉非结晶区结构特征有关^[22]。Van 等^[23]研究发现, $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ 比值可反映淀粉分子在短程范围的结晶度,其比值大小与短程有序度成正相关。由图 4 可以看出,六种不同小麦品种淀粉的 $1045\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 峰强度比值在 $1.771\sim1.995$, ‘运黑 161’>‘泰农 18’>‘鲁原 118’>‘济麦 23’>‘荷麦 24’>‘太麦 198’,其中‘运黑 161’淀粉的比值最高,说明其淀粉颗粒短程有序度最高;‘太麦 198’淀粉的比值最低,说明其短程有序度最低。苏磊等^[24]研究测得‘百农 365’、‘百农 207’、‘百农 307’、‘百农 607’四种小麦淀粉的 $1045/1022\text{ cm}^{-1}$ 峰强度比值为 $0.87\sim0.90$ 。因此,品种不同导致淀粉短链有序度存在一定差异性。

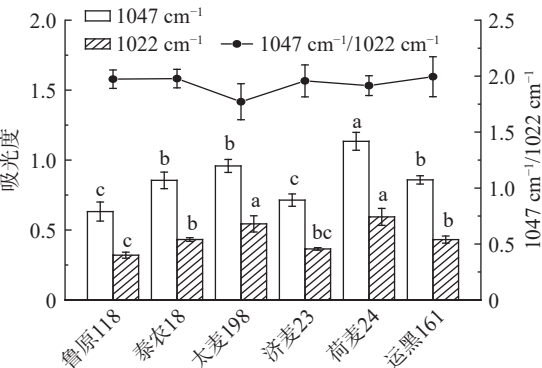


图 4 不同品种小麦淀粉 FTIR 波谱的 $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ 比值

Fig.4 FTIR ratio $1047\text{ cm}^{-1}/1022\text{ cm}^{-1}$ of starch from different wheat varieties

表 1 不同品种小麦淀粉粒径分布

Table 1 Granule size distribution of starch from different wheat varieties

品种	$X_{10}(\mu\text{m})$	$X_{50}(\mu\text{m})$	$X_{90}(\mu\text{m})$	$X_{99}(\mu\text{m})$	SMD(μm)	VMD(μm)
鲁原118	8.56 ± 0.19^a	17.85 ± 0.14^a	28.01 ± 0.11^a	35.76 ± 0.06^{ab}	10.20 ± 0.12^a	18.03 ± 0.13^a
济麦23	7.19 ± 0.16^b	17.32 ± 0.14^b	27.44 ± 0.17^b	35.16 ± 0.17^b	9.46 ± 0.12^b	17.31 ± 0.15^b
太麦198	5.99 ± 0.08^{cd}	15.73 ± 0.06^c	25.41 ± 0.11^c	33.94 ± 0.08^c	8.51 ± 0.04^c	15.78 ± 0.06^c
泰农18	6.05 ± 0.22^c	15.84 ± 0.28^c	25.87 ± 0.62^c	33.81 ± 0.69^c	8.41 ± 0.27^d	15.90 ± 0.34^c
荷麦24	6.30 ± 0.05^c	17.31 ± 0.06^b	28.07 ± 0.08^a	35.97 ± 0.28^a	8.94 ± 0.10^c	17.29 ± 0.05^b
运黑161	5.71 ± 0.19^d	15.29 ± 0.22^d	24.38 ± 0.18^d	32.23 ± 0.53^d	9.52 ± 0.47^b	15.28 ± 0.21^d

注: X_{10} 、 X_{50} 、 X_{90} 、 X_{99} 依次表示粒径小于该值的颗粒占颗粒总体积的10%、50%、90%、99%; SMD: 面积平均粒径; VMD: 体积平均粒径。数据表示为平均值±标准差, 同列字母不同表示显著差异($P<0.05$), 表2~表7同。

2.5 晶体特性分析

如图 5 所示, 六个品种的小麦淀粉衍射峰均在 15.0° 、 17.0° 、 18.0° 和 23.0° 附近出现, 属于典型的 A 型晶体结构。通常小麦淀粉还会在 20° 附近出现一个强度较弱的衍射峰, 谱图中 20° 附近的衍射峰代表着淀粉内直链-脂肪 V 型复合物的形成^[25], 从图 5 中可以看出, ‘运黑 161’ 淀粉颗粒在此处的峰与其它淀粉相比较为平缓, 这是因为‘运黑 161’ 淀粉几乎由支链淀粉分子组成, 所以难以形成 V 型复合物的结构, 所以此峰平缓, 峰强度微弱。

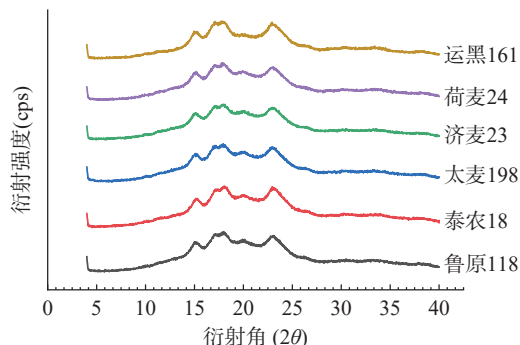


图 5 不同品种小麦淀粉的 X 射线衍射图谱

Fig.5 X-ray diffraction patterns of starch from different wheat varieties

从表 2 可以看出, 六种小麦淀粉的相对结晶度具有显著性差异 ($P<0.05$), 相对结晶度范围为 11.63% ~ 20.41% , 淀粉样品的晶面间距为 $3.83\sim 5.88$, ‘运黑 161’ 淀粉的相对结晶度显著高于其他五种淀粉 ($P<0.05$), 其次分别是‘泰农 18’、‘鲁原 118’、‘济麦 23’、‘荷麦 24’, 最低是‘太麦 198’。淀粉之间结晶度的差异是由结晶大小、结晶数量、直链淀粉的链长度以及双螺旋结构间相互作用等相互制约决定的。

表 2 不同品种小麦淀粉 XRD 特性

Table 2 XRD characteristics of starch from different wheat varieties

品种	衍射角($^{\circ}$)/面间距($\text{\AA}$)					相对结晶度 (%)
	15°	17°	18°	20°	23°	
鲁原118	15.14(5.85)	17.01(5.21)	18.11(4.86)	20.13(4.41)	23.14(3.84)	15.51 ± 0.06^c
济麦23	15.06(5.88)	17.05(5.20)	18.13(4.89)	20.13(4.41)	23.14(3.84)	14.57 ± 0.07^d
太麦198	15.18(5.83)	17.19(5.16)	18.15(4.88)	20.13(4.41)	23.20(3.83)	11.63 ± 0.06^f
泰农18	15.12(5.85)	17.17(5.16)	18.03(4.92)	20.01(4.45)	23.08(3.85)	16.05 ± 0.05^b
荷麦24	15.20(5.82)	17.05(5.20)	18.35(4.83)	20.09(4.42)	23.08(3.85)	12.55 ± 0.05^e
运黑161	15.20(5.82)	17.11(5.18)	18.75(4.73)	20.15(4.40)	23.04(3.86)	20.41 ± 0.26^a

表 3 不同品种小麦淀粉热特性

Table 3 Thermal characteristics of starch from different wheat varieties

品种	起始温度 $T_0(^{\circ}\text{C})$	峰值温度 $T_p(^{\circ}\text{C})$	终止温度 $T_c(^{\circ}\text{C})$	热焓值 $\Delta H(\text{J/g})$
鲁原118	52.88 ± 0.11^d	59.37 ± 0.01^c	73.63 ± 0.03^d	2.83 ± 0.03^c
济麦23	55.93 ± 0.03^b	63.97 ± 0.02^b	76.14 ± 0.14^b	2.72 ± 0.01^d
太麦198	58.49 ± 0.03^a	65.95 ± 0.01^a	78.71 ± 0.01^a	2.63 ± 0.01^e
泰农18	54.14 ± 0.05^c	59.32 ± 0.01^d	75.25 ± 0.01^c	2.86 ± 0.02^b
荷麦24	52.02 ± 0.02^e	58.32 ± 0.01^e	69.98 ± 0.01^e	2.69 ± 0.01^d
运黑161	48.88 ± 0.02^f	55.13 ± 0.01^f	67.45 ± 0.01^f	3.16 ± 0.02^a

2.6 热特性分析

由表 3 可知, 六个小麦淀粉的 ΔH 为 $2.63\sim 3.16\text{ J/g}$, T_0 为 $48.88\sim 58.49^{\circ}\text{C}$, T_p 为 $55.13\sim 65.95^{\circ}\text{C}$, T_c 为 $67.45\sim 78.71^{\circ}\text{C}$, 各品种之间存在差异显著 ($P<0.05$)。其中, ‘运黑 161’ 淀粉的 T_0 、 T_p 和 T_c 值均显著低于其他组, 而 ΔH 显著高于其他组 ($P<0.05$), 说明它的整个热变化过程在最低的温度下进行, 但是吸收了最多的热量; ‘太麦 198’ 淀粉的起始温度、峰值温度和终止温度最高, 热焓值最低, 说明其整个热变化过程在最高的温度下进行, 吸收了最少的热量。淀粉结构形态、颗粒大小、结晶区结构、直链与支链淀粉含量都与淀粉的热特性密切相关^[26]。直链淀粉增大, 淀粉的热焓值降低, 因此, ΔH 与直链淀粉含量呈负相关, 与相对结晶度呈正相关^[27], 这与本文的结果相一致。糊化焓 ΔH 指淀粉颗粒发生糊化时支链淀粉从有序到无序所需的能量^[28]。本文中六个品种淀粉的 ΔH 与王海容等^[29] 报道的 12 种用于酿酒制曲的小麦淀粉的 ΔH 值 ($7.07\sim 13.90\text{ J/g}$) 相比总体上偏低, 这是因为其相对结晶度和短链有序度低于其它品种小麦淀粉。

2.7 小麦淀粉的透明度分析

淀粉糊的透明度通常用吸光值来表示, 吸光值与淀粉溶液透明度呈反比例关系^[29]。如图 6 所示, 小麦淀粉糊的吸光度值范围是 $0.324\sim 0.853$, 各品种之间存在差异性显著 ($P<0.05$) 吸光度值最小的是‘运黑 161’ 淀粉, 说明其透明度最好, 适合制作淀粉基可食用膜等对透明度有要求的产品。其余五种透光性依次是‘泰农 18’>‘鲁原 118’>‘济麦 23’>‘荷麦 24’>‘太麦 198’, ‘太麦 198’ 淀粉糊的吸光度值最大, 说明其透明度最差。有研究表明, 淀粉糊的透明度主要受

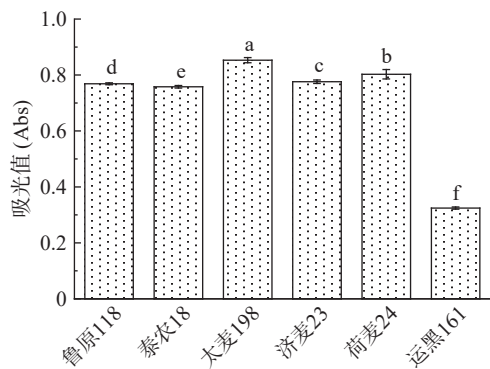


图 6 不同品种小麦淀粉糊的吸光度值

Fig.6 Absorbance values starch pastes from different wheat varieties

直链淀粉和支链淀粉之间相互作用的影响^[30]。

2.8 小麦淀粉的溶胀性分析

在小麦淀粉的糊化过程中, 淀粉颗粒的直链/支链有序结构被破坏, 发生了吸水膨胀, 它的膨胀能力可以用溶胀度来表示。在加热过程中, 可溶性直链淀粉等水可溶性物质溶出, 淀粉的这种溶解能力用溶解指数来表示^[13]。Wang 等^[31]研究表明, 淀粉颗粒的膨胀行为主要是支链淀粉分子的特性。当淀粉颗粒在过量的水中加热时, 直链淀粉分子倾向于膨胀然后溶解, 而高度分支的支链淀粉分子只膨胀到最大而不溶解。由表 4 可知, 50 ℃ 时淀粉颗粒的溶胀度很小

为(1.98~2.64 g/g), 溶解度为(0.11%~1.61%); 当温度达到 60 ℃ 时淀粉颗粒开始溶胀, 溶胀度和溶解度都随温度有所上升; 当温度达到 70 ℃ 时, 由于‘运黑 161’淀粉颗粒已完全膨胀, 变成了澄清透明均一的稀糊状溶液, 经过离心处理不分层, 不产生沉淀, 溶胀度达到最大, 没有水溶性物质溶出; 其他 5 种样品的溶胀度和溶解度都随温度的升高而增大。

2.9 小麦淀粉的冻融稳定性分析

淀粉糊的冻融稳定性可以由析水率来表示, 析水率越大, 稳定性越差。由表 5 可知, 经过五次冻融循环, ‘运黑 161’淀粉的析水率仅为 17.81%, 说明其冻融稳定性最好, 其次分别是‘泰农 18’‘鲁原 118’‘济麦 23’和‘荷麦 24’, ‘太麦 198’的析水率最高 55.92%, 与其他组存在显著性差异($P<0.05$), 冻融效果最差。Hong 等^[32]对五种水稻进行冻融稳定性测定, 发现淀粉糊的冻融稳定性与直链淀粉含量呈反比, 直链淀粉含量最高的品种其冻融稳定性最差。若小麦淀粉中直链淀粉含量较高, 则在冻融循环过程中淀粉分子之间的作用力较强, 淀粉分子与水分子之间的作用力就会较弱, 从而使得水容易从淀粉凝胶结构中析出, 析水率大, 淀粉糊的冻融稳定性就会变差; ‘运黑 161’淀粉主要由支链淀粉组成, 经过糊化处理, 冷却后不形成凝胶, 经过四次冻融循环, 支链淀粉分子和水的结合力变差, 水分析出。由此可知, ‘运黑 161 淀粉适合

表 4 不同品种小麦淀粉的溶胀度和溶解度

Table 4 Swelling power and water solubility of starch from different wheat varieties

指标	品种	温度(℃)				
		50	60	70	80	90
溶胀度(g/g)	鲁原118	2.32±0.03 ^c	4.58±0.08 ^c	5.98±0.02 ^c	7.39±0.08 ^c	10.02±0.03 ^b
	泰农18	2.40±0.01 ^b	5.10±0.15 ^b	6.12±0.03 ^b	8.10±0.10 ^b	10.18±0.06 ^b
	太麦198	1.98±0.04 ^f	3.94±0.02 ^e	5.21±0.04 ^e	6.57±0.02 ^e	7.88±0.10 ^e
	济麦23	2.15±0.03 ^d	4.26±0.04 ^d	5.54±0.04 ^d	7.29±0.03 ^c	9.51±0.03 ^c
	荷麦24	2.07±0.02 ^e	4.08±0.04 ^e	5.29±0.09 ^e	6.88±0.06 ^d	8.65±0.31 ^d
	运黑161	2.64±0.02 ^a	5.28±0.03 ^a	33.28±0.06 ^a	33.28±0.06 ^a	33.28±0.06 ^a
溶解度(%)	鲁原118	0.64±0.01 ^d	1.53±0.09 ^d	4.66±0.10 ^d	6.99±0.03 ^d	9.65±0.08 ^d
	泰农18	0.59±0.02 ^e	1.10±0.02 ^e	3.43±0.02 ^e	5.72±0.25 ^e	7.37±0.01 ^e
	太麦198	1.61±0.01 ^a	2.59±0.01 ^a	5.45±0.01 ^a	9.42±0.02 ^a	11.04±0.01 ^a
	济麦23	1.00±0.03 ^c	1.80±0.02 ^c	4.79±0.02 ^c	8.00±0.02 ^c	10.13±0.08 ^c
	荷麦24	1.35±0.04 ^b	2.00±0.01 ^b	5.06±0.05 ^b	8.59±0.07 ^b	10.44±0.08 ^b
	运黑161	0.11±0.02 ^f	0.44±0.02 ^f	—	—	—

注: —表示未测得数据, 表5~表7同。

表 5 不同品种小麦淀粉冻融循环过程的析水率

Table 5 Water precipitation during freeze thaw cycling of starch from different wheat varieties

品种	析水率(%)				
	一次冻融	两次冻融	三次冻融	四次冻融	五次冻融
鲁原118	34.84±0.06 ^d	40.14±0.08 ^d	43.76±0.06 ^d	49.12±0.04 ^d	51.03±0.05 ^d
泰农18	33.53±0.10 ^e	38.73±0.06 ^e	42.62±0.34 ^e	48.63±0.16 ^e	49.58±0.02 ^e
太麦198	43.65±0.11 ^a	45.97±0.03 ^a	47.70±0.16 ^a	52.39±0.05 ^a	55.92±0.04 ^a
济麦23	39.37±0.18 ^c	42.11±0.02 ^c	45.25±0.17 ^c	50.83±0.05 ^c	52.51±0.15 ^c
荷麦24	42.37±0.30 ^b	44.78±0.21 ^b	46.69±0.09 ^b	51.87±0.05 ^b	53.76±0.11 ^b
运黑161	—	—	—	7.21±0.07 ^f	17.81±0.17 ^f

于冷冻加工食品和半成品的加工。

2.10 小麦淀粉的糊化特性分析

对淀粉乳进行加热处理后,淀粉颗粒膨胀,无定形区被破坏,这时淀粉的颗粒结构依然在保持,持续加热后,淀粉颗粒不可逆膨胀,淀粉乳成为有黏度的淀粉糊,这就是淀粉的糊化过程^[33-34]。小麦淀粉的糊化特征参数见表 6,六种样品的糊化温度、峰值黏度、回生值、衰减值、最终黏度和最低黏度都具有显著性差异($P<0.05$)。‘太麦 198’淀粉的糊化温度最高 71.6 °C,‘运黑 161’淀粉的糊化温度最低 59.1 °C,这与小麦淀粉热特性的数据一致。回生值反映了冷却后淀粉糊的老化程度,回生值越小,表明淀粉糊越不易老化。样品的回生值范围为 683~2811 cP,‘运黑 161’淀粉的回生值最小,‘运黑 161’淀粉不易老化。衰减值反映了淀粉的热糊稳定性,指膨胀的淀粉颗粒应对热和剪切作用的阻力,衰减值高表明淀粉糊具有较少的颗粒完整性^[35],衰减值范围为 1730~2872 cP,‘运黑 161’淀粉最高,‘太麦 198’最低,表明‘运黑 161’淀粉颗粒糊化后膨胀度最高,‘太麦 198’淀粉颗粒溶胀后强度较高,不易破裂。

2.11 小麦淀粉的凝胶质构特性分析

TPA 质构分析是通过模拟人的咀嚼动作,对样品进行两次压缩,获取硬度、粘附性、弹性、内聚性、咀嚼性等样品质地参数。硬度指在第一次压缩循环期间任何时间发生的最大力,凝胶的硬度与其断裂强度相关。由表 7 可知,淀粉凝胶的硬度范围为 0.44~0.73 N,其中‘太麦 198’和‘济麦 23’淀粉的凝胶硬度相同均为 0.73 N,‘荷麦 24’淀粉凝胶的硬度最低为 0.44 N。淀粉样品凝胶的粘附性范围是 0.42~1.35 mJ,‘荷麦 24’的粘附性最大,‘济麦 23’的粘附性最小。六种淀粉凝胶硬度越大,粘附性越小。内聚性

指第二次压缩期间的正力量区域与第一次压缩期间的正力量区域的比率,6 种淀粉凝胶内聚性范围为 0.37~0.45 Ratio,除‘运黑 161’之外,‘荷麦 24’的内聚性最大,胶黏性最小,其他四品种间差异均不显著。弹性指样品在第一次压缩结束和第二次压缩开始之间恢复的高度,测定样品弹性范围为 0.93~3.12 mm,咀嚼性范围是 0.07~5.71 mJ。‘济麦 23’淀粉凝胶的硬度、弹性和咀嚼性都最高,粘附性最小,说明它的凝胶质构特性最好。由于‘运黑 161’淀粉完全由支链淀粉构成,经过糊化处理,冷却后不形成凝胶,所以无法测定质构特性。

2.12 小麦淀粉各项指标的相关性分析

小麦淀粉微观结构和理化特性各项指标之间的 Pearson 相关系数如图 7 所示,直链淀粉含量与溶解度、糊化温度呈显著性正相关($r=0.81, 0.88$),与回生值和最终黏度呈极显著性正相关,相关系数 r 分别为 0.99、0.97,与凝胶硬度呈显著性正相关($r=0.91$),与颗粒相关结晶度和热焓值呈显著性负相关,相关系数 r 均为-0.88。小麦淀粉的相对结晶度与糊化温度呈极显著性负相关($r=-0.96$);与溶解度、回生值和凝胶内聚性呈显著性负相关,相关系数 r 分别为-0.88、-0.89 和-0.84;热焓值与回生值和最终黏度呈显著性负相关($r=-0.88, -0.91$)。

不同淀粉的糊化温度和回生值呈显著性正相关,相关系数 r 为 0.91,与峰值黏度呈显著性负相关,相关系数 r 为-0.85,与衰减值呈极显著性负相关,相关系数 r 为-0.93;小麦淀粉的回生值和最终黏度呈极显著性正相关($r=0.94$)。小麦淀粉凝胶硬度和内聚性、咀嚼性和弹性呈显著性正相关,相关系数 r 分别为 0.84 和 0.91;胶黏性和硬度、内聚性呈极显著性正相关($r=0.94, 0.93$)。

表 6 不同品种小麦淀粉的糊化特征参数

Table 6 Gelatinization characteristic parameters of starch from different wheat varieties

品种	糊化温度(°C)	峰值粘度(cP)	回生值(cP)	衰减值(cP)	最低粘度(cP)	最终粘度(cP)
鲁原118	65.5±0.9 ^b	4665±2.5 ^c	2424±1.4 ^d	2432±5.0 ^e	2233±3.4 ^b	4657±2.5 ^b
泰农18	65.5±1.7 ^b	4741±1.8 ^b	2413±2.5 ^d	2465±2.8 ^b	2276±3.7 ^a	4688±5.8 ^a
太麦198	71.6±2.5 ^a	3269±9.5 ^f	2811±13.8 ^a	1730±11.3 ^f	1539±6.9 ^f	4338±2.4 ^e
济麦23	66.4±2.4 ^b	3918±6.3 ^d	2682±2.6 ^c	1989±0.8 ^d	1930±5.6 ^d	4612±7.4 ^c
荷麦24	67.9±1.1 ^b	3679±24.6 ^e	2791±5.0 ^b	1917±3.8 ^e	1777±7.3 ^e	4570±4.3 ^d
运黑161	59.1±1.3 ^c	4880±3.2 ^a	683±0.6 ^e	2872±2.3 ^a	2008±1.1 ^c	2691±0.9 ^f

表 7 不同品种小麦淀粉的凝胶质构特性

Table 7 Gel textural-properties of starch from different wheat varieties

品种	硬度(N)	粘附性(mJ)	内聚性(Ratio)	弹性(mm)	胶黏性(N)	咀嚼性(mJ)
鲁原118	0.58±0.02 ^b	0.80±0.02 ^c	0.40±0.02 ^b	1.24±0.09 ^b	0.44±0.05 ^a	0.38±0.07 ^b
泰农18	0.52±0.04	0.86±0.03 ^b	0.39±0.03 ^b	0.93±0.02 ^d	0.46±0.03 ^a	0.22±0.01 ^{bc}
太麦198	0.73±0.01 ^a	0.45±0.03 ^d	0.37±0.01 ^b	1.21±0.02 ^b	0.42±0.02 ^a	0.31±0.05 ^b
济麦23	0.73±0.02 ^a	0.42±0.02 ^d	0.38±0.02 ^b	3.12±0.01 ^a	0.47±0.02 ^a	5.71±0.23 ^a
荷麦24	0.44±0.03 ^d	1.35±0.02 ^a	0.45±0.01 ^a	1.13±0.02 ^c	0.35±0.02 ^b	0.07±0.02 ^c
运黑161	—	—	—	—	—	—

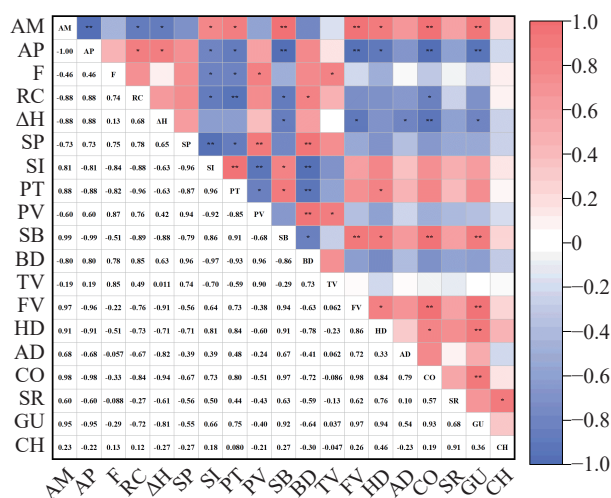


图 7 不同品种小麦淀粉特性指标间的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of starch characteristics of different wheat varieties

注: AM, 直链淀粉含量; AP, 支链淀粉含量; F, 红外光谱 1047/1022 cm^{-1} 比值; RC, 相对结晶度; ΔH , 热焓值; SP, 溶胀度; SI, 溶解度; PT, 糊化温度; PV, 峰值粘度; SB, 回生值; BD, 衰减值; TV, 最低粘度; FV, 最终粘度; HD, 凝胶硬度; AD, 黏附性; CO, 内聚性; SR, 弹性; GU, 胶黏性; CH, 咀嚼性。**表示在 0.01 水平上极显著相关 ($P < 0.01$); *表示在 0.05 水平上显著相关 ($P < 0.05$)。

3 结论

本研究对山西运城六个不同小麦品种的淀粉进行了微观结构和宏观理化特性的测定。研究发现,不同品种在各项指标上均表现出差异,并存在一定的相关性,尤其直链淀粉含量、相对结晶度、热焓值和糊化特性参数之间呈显著相关性。六种小麦淀粉颗粒均属于典型的 A 型晶体结构,由 A、B 两种淀粉粒组成, A 淀粉粒形态大多为椭圆型,表面有褶皱凹陷; B 淀粉粒大多为球形,颗粒圆润光滑。淀粉粒径大小范围为 5.71~35.97 μm ,直链淀粉含量范围为 0.56%~26.24%,相对结晶度为 11.63%~20.41%。在对小麦淀粉理化特性进行分析比较后,观察到‘运黑 161’淀粉易糊化,峰值黏度高,且不易回生,透明度、冻融稳定性和膨胀度最佳,适合于速冻面食、食品增稠剂、食品粘合剂等产品的应用;‘济麦 23’淀粉凝胶的质构特性最好,形成的凝胶咀嚼性好,有弹性,内部粘合力小,适合制作凉粉、果冻、软糖等需要良好口感和弹性的产品。其它四种淀粉属于普通小麦淀粉,应用于食品的添加。因此,‘济麦 23’和‘运黑 161’两种淀粉可作为优势淀粉资源,促进淀粉产业的发展。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

[1] 郭雪宁, 李逸波. 中国小麦进口市场集中度和依赖度分析[J]. 现代农业, 2023, 48(5): 33–39. [GUO X N, LIN Y B. Analysis on the concentration and dependence of China's wheat import

market[J]. Modern Agriculture, 2023, 48(5): 33–39.]

[2] ZHANG Y, GUO Q, FENG N, et al. Characterization of A- and B-type starch granules in Chinese wheat cultivars[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(10): 2203–2214.

[3] 王天姣. 小麦品种蛋白质和淀粉特性与河南烩面品质关系研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. [WANG T J. Study on the relationship between protein and starch properties of wheat varieties and the quality of Henan stewed noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.]

[4] 石吕, 石晓旭, 薛亚光, 等. 扬麦 29 和苏裸麦 2 号的淀粉特性比较[J]. 大麦与谷类科学, 2023, 40(5): 24–31. [SHI L, SHI X X, XUE Y G, et al. Comparison of starch characteristics between Yangmai 29 and Suluomai No.2[J]. Barley and Cereal Sciences, 2023, 40(5): 24–31.]

[5] 亢玲, 董艳, 张维军, 等. 宁夏春小麦种质资源淀粉糊化特性研究[J]. 东北农业科学, 2023, 48(6): 35–38. [KANG L, DONG Y, ZHANG W J, et al. Study on starch pasting properties of spring wheat germplasm resources in Ningxia[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2023, 48(6): 35–38.]

[6] 雍玉东, 李文阳, 张培文, 等. 晚播对江淮地区小麦淀粉粒度分布与黏度参数的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 8(2): 1–6.

[YONG Y D, LI W Y, ZHANG P W, et al. Effects of late sowing on starch particle size distribution and viscosity parameters of wheat in the Yangtze-Huaihe region[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 8(2): 1–6.]

[7] SHI S Y, WEN J P, GENG H, et al. Physicochemical properties, structural properties and gels 3D printing properties of wheat starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024(261): 129885.

[8] 姚彤琦, 姚琳, 黄云红, 等. 运城市旱地小麦优质高产栽培技术[J]. 现代农业科技, 2015, 3(5): 43–44. [YAO T Q, YAO L, HUANG Y H, et al. High-quality and high-yield cultivation technology of dryland wheat in Yuncheng City[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015, 3(5): 43–44.]

[9] TAN X Y, LI X X, CHEN L, et al. Effect of heat-moisture treatment on multi-scale structures and physicochemical properties of breadfruit starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2017(161): 286–294.

[10] DA R Z E, STORCK C R, CASTRO L A S, et al. Effect of heat-moisture treatment on rice starch of varying amylose content[J]. Food Chemistry, 2010, 121(2): 358–365.

[11] PENG P, WANG X, LIAO M, et al. Effects of HMW - GSs at Glu - B1 locus on starch - protein interaction and starch digestibility during thermomechanical processing of wheat dough[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 103(4): 2134–2145.

[12] YANG Z L, HAO H, WU Y W, et al. Influence of moisture and amylose on the physicochemical properties of rice starch during heat treatment[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 11(168): 656–662.

[13] 程雯. β -淀粉酶对小麦淀粉结构特性、糊化性质及回生性质的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [CHENG W. Effects of β -amylase on the structural properties, gelatinization properties and retrogradation properties of wheat starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]

[14] 尹志华, 汪兰, 田斌强, 等. 荸荠淀粉的物化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(1): 66–70. [YIN Z H, WANG L, TIAN B Q, et al. Physicochemical properties of chinese water chestnut starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils, 2008, 23(1): 66–

- 70.]
- [15] 琚魏波, 王亮, 荣亚萍, 等. 不同添加剂对马铃薯淀粉凝胶特性的影响[J]. 食品工业, 2023, 44(1): 47-52. [JU W B, WANG L, RONG Y P, et al. Effects of different additives on gel properties of potato starch[J]. The Food Industry, 2023, 44(1): 47-52.]
- [16] SINGH S, SINGH N, ISONO N, et al. Relationship of granule size distribution and amylopectin structure with pasting, thermal and retrogradation properties in wheat starches[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(2): 1180-1188.
- [17] 王海萍, 师风华, 唐朝晖, 等. 一些小麦品种的淀粉特性分析[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(3): 479-482. [WANG H P, SHI F H, TANG Z H, et al. Analysis on starch properties in some wheat cultivars[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2007, 27(3): 479-482.]
- [18] 望俊森, 张中州, 袁谦, 等. 黄淮南片小麦主要品质性状相关性分析[J]. 山西农业科学, 2021, 49(12): 1438-1443. [WANG J S, ZHANG Z Z, YUAN Q, et al. Correlation analysis of main quality characters of wheat from the south of yellow & huai river valley[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(12): 1438-1443.]
- [19] 蔡雨佳, 杨凯钧, 高科, 等. 不同小麦品种淀粉粒径的比较研究[J]. 山东农业科学, 2021, 53(7): 46-50. [CAI Y J, YANG K J, GAO K, et al. Comparison on starch particle size of different wheat varieties[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2021, 53(7): 46-50.]
- [20] 褚艳红, 庄玉伟, 郭辉, 等. 马铃薯淀粉加工成型前后红外光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(S1): 35-36. [CHU Y H, ZHUANG Y W, GUO H, et al. Study on the FTIR spectrum of potato starch before and after molding[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(S1): 35-36.]
- [21] CAI M, ZHANG Y, CAO H, et al. Exploring the remarkable effects of microwave treatment on starch modification: From structural evolution to changed physicochemical and digestive properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 343: 122412-122419.
- [22] SHINGEL K I. Determination of structural peculiarities of dextran, pullulan and γ -irradiated pullulan by Fourier-transform IR spectroscopy[J]. *Carbohydrate Research*, 2002, 337(16): 1445-1451.
- [23] VAN S J J, TOURNOIS H, DE W D, et al. Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy[J]. *Carbohydrate Research*, 1995, 279: 201-214.
- [24] 苏磊. 小麦淀粉结构对面条品质的影响[D]. 新乡: 河南科技学院, 2022. [SU L. Effect of wheat starch structure on noodle quality[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2022.]
- [25] 尚家英. 小麦 A、B 淀粉特性及其与小麦品质关系研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011. [SHANG J Y. Characterization of A-, B-starch and its relationship with wheat quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011.]
- [26] 刘希伟, 张敏, 李勇, 等. 花后不同强度遮光对糯小麦和非糯小麦淀粉组分和理化特性的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(5): 777-786. [LIU X W, ZHANG M, LI Y, et al. Effects of post-flowing shading intensities on starch components and physicochemical properties in waxy and non-waxy wheats[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(5): 777-786.]
- [27] 刘健, 文莉, 张晓祥, 等. 糯小麦淀粉结构特征和理化品质研究[J]. 核农学报, 2023, 37(10): 2019-2027. [LIU J, WEN L, ZHANG X X, et al. Study on starch structure and physicochemical quality of waxy wheat[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(10): 2019-2027.]
- [28] LIU S C, LIN L H, SHEN M Y, et al. Effect of *Mesona chinensis* polysaccharide on the pasting, thermal and rheological properties of wheat starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 118(6): 945-951.
- [29] 王海容, 王永锋, 朱国军, 等. 酿酒制曲专用小麦淀粉品质特性研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(11): 230-236. [WANG H R, WANG Y F, ZHU G J, et al. Starch quality characteristics of special wheat for Daqu-MAKING[J]. *China Brewing*, 2023, 42(11): 230-236.]
- [30] MOHAMMAD A S, TAWHEED A, SYED Z H, et al. Physicochemical, thermal, pasting, morphological, functional and bioactive binding characteristics of starches of different oat varieties of North-Western Himalayas[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(1): 126612.
- [31] WANG S J, COPELAND L. Phase transitions of pea starch over a wide range of water content[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(25): 6439-6446.
- [32] HONG E M, RHO S J, KIM U, et al. Physicochemical properties and freeze-thaw stability of rice flour blends among rice cultivars with different amylose contents[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2021, 30(2): 1347-1356.
- [33] 杨玉蛟, 许飞, 陈洁, 等. 儿茶素对糯小麦淀粉和普通小麦淀粉特性影响的对比研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版) 2023, 44(6): 51-58. [YANG Y J, XU F, CHEN J, et al. Comparative study on the effect of catechin on starch characteristics of waxy wheat and common wheat[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 44(6): 51-58.]
- [34] 程建军. 淀粉工艺学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 185-187. [CHENG J J. *Starch technology course*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 185-187.]
- [35] 段春月. 板栗淀粉理化特性及老化机理研究[D]. 秦皇岛: 河北科技师范学院, 2021. [DUAN C Y. Study on physicochemical properties and aging mechanism of chestnut starch[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology, 2021.]