

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241118008

引用格式: 于翠翠, 张文会. 西藏麻豌豆淀粉与绿豆淀粉、杨麦淀粉理化性质比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 251-256.

YU CC, ZHANG WH. Comparison of physicochemical properties of Tibetan pea starch with mung bean starch and poplar-wheat starch [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 251-256. (in Chinese with English abstract).

西藏麻豌豆淀粉与绿豆淀粉、杨麦淀粉 理化性质比较

于翠翠, 张文会*

(西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所, 拉萨 850000)

摘要: **目的** 比较西藏麻豌豆淀粉、绿豆淀粉和杨麦淀粉的理化性质。**方法** 研究3种淀粉的直链淀粉含量、颗粒形态、粒径分布、结晶结构、糊化特性、消化特性及热力学特性。**结果** 麻豌豆淀粉中直链淀粉含量占比显著低于绿豆淀粉和杨麦淀粉; 麻豌豆淀粉和杨麦淀粉颗粒主要呈椭圆形和肾形, 绿豆淀粉颗粒主要呈圆饼状和椭圆形, 麻豌豆淀粉粒径平均值与其他两种淀粉对比存在显著性差异, 3种淀粉的相对结晶度无显著性差异; 麻豌豆与绿豆淀粉为典型的C-型结晶结构, 杨麦淀粉为A-型结晶结构; 绿豆淀粉与水结合能力更强, 吸水膨胀后淀粉糊更黏稠, 而麻豌豆淀粉与杨麦淀粉的热糊稳定性更好, 在高温环境有更强的耐热性和抗剪切力; 麻豌豆淀粉更易形成凝胶更易老化, 而杨麦淀粉不易老化, 杨麦淀粉成糊时间晚, 而麻豌豆淀粉成糊时间最早。麻豌豆淀粉的快消化淀粉含量和慢消化淀粉含量最高, 杨麦淀粉的抗性淀粉含量最高。麻豌豆淀粉和杨麦淀粉比绿豆淀粉更易糊化, 而绿豆淀粉不易糊化。**结论** 麻豌豆淀粉与杨麦淀粉在颗粒形状和热糊稳定性上相同, 其理化性质大部分与绿豆淀粉相同。

关键词: 麻豌豆淀粉; 绿豆淀粉; 杨麦淀粉; 理化性质

Comparison of physicochemical properties of Tibetan pea starch with mung bean starch and poplar-wheat starch

YU Cui-Cui, ZHANG Wen-Hui*

(Institute of Agri-products Development and Food Sciences (IAPDFS), Xizang Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences (XZAAAS), Lhasa 850000, China)

ABSTRACT: Objective To compare the physicochemical properties of Tibetan pea starch, mung bean starch, and poplar-wheat starch. **Methods** The amylose content, granule morphology, particle size distribution, crystalline structure, pasting properties, digestibility and thermodynamic properties of the 3 types of starch were studied. **Results**

收稿日期: 2024-11-18

基金项目: 2024年西藏居民膳食营养健康改善与优化农产品保供科技支撑项目(XZCZ-SS-2024); 2025年支持国民营养计划(五个针对)研发项目(XZCZ-SS-2025)

第一作者: 于翠翠(1988—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为特色农产品开发。E-mail: 913180271@qq.com

*通信作者: 张文会(1974—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为特色农产品开发。E-mail: zhhf08@163.com

The amylose content in pea starch was significantly lower than that in mung bean starch and poplar-wheat starch; pea starch and poplar-wheat starch granules were mainly oval and kidney-shaped, while mung bean starch granules were mainly disc-shaped and ellipsoidal. The average particle size of pea starch was significantly different compared to the other 2 types of starch, and the relative crystallinity of the 3 types of starch types showed no significant differences; pea and mung bean starches had typical C-type crystalline structures, while poplar-wheat starch had an A-type crystalline structure. Mung bean starch had a stronger water-binding capacity, and the starch paste became more viscous after absorbing water and swelling, while pea starch and poplar-wheat starch had better thermal paste stability, with stronger heat resistance and shear resistance in high-temperature environments. Pea starch was more prone to gelation and aging, while poplar-wheat starch was less prone to aging. Poplar-wheat starch had a later pasting time, while pea starch had the earliest pasting time. Pea starch had the highest content of rapidly digestible starch and slowly digestible starch, while poplar-wheat starch had the highest content of resistant starch. Pea starch and poplar-wheat starch were easier to gelatinize than mung bean starch, which was less prone to gelatinization.

Conclusion Tibetan pea starch and poplar-wheat starch are similar as granule shape and thermal paste stability, and most of their physicochemical properties are similar as those of mung bean starch.

KEY WORDS: pea starch; mung bean starch; poplar-wheat starch; physicochemical properties

0 引言

豌豆又称毕豆、寒豆、麦豆等,形状为卵形^[1],为豆科一年生草本植物,是世界主要豆类作物之一。豌豆中富含碳水化合物、蛋白质及膳食纤维等多种物质,同时其脂肪含量低,也是B族维生素和铁、钾、钙等营养物质较好来源^[2]。现代研究表明食用豌豆不仅可以提高机体免疫力,还可以降低低密度脂蛋白及结肠癌等疾病的发病率^[3]。淀粉是豌豆的主要成分之一,其含量约占豌豆的40%~50%;与其他淀粉比较可知豌豆淀粉中直链淀粉含量高,具有热黏度高、凝胶透明度高及强度高的特点,可以作为粉皮和粉丝加工原料而用于食品加工工业^[4],另外豌豆淀粉可通过改性后用于纺织、医药、化工等领域^[5-9]。张燕鹏等^[10]将豌豆与马铃薯和玉米淀粉进行对比研究表明,豌豆淀粉的回生值与糊化温度较高、慢消化淀粉含量较高,但其衰减值较低;与马铃薯淀粉对比可知豌豆淀粉透明度低,凝沉性强。研究表明,不同产地与品种豌豆淀粉的组分含量及理化性质有较大差异,同时淀粉产品品质与理化性质有着密切相关^[10]。不同来源淀粉结构特征存在差异,使其具有不同的理化性质,影响淀粉在食品加工工业中的应用,目前对于西藏地区种植麻豌豆淀粉的研究较少,因此本研究以西藏日喀则地区种植麻豌豆为原料提取淀粉,与绿豆淀粉、杨麦淀粉进行系统研究,明确西藏麻豌豆淀粉结构、理化特性以及区别,为西藏麻豌豆淀粉开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和仪器

1.1.1 试验材料

麻豌豆淀粉(西藏日喀则地区产麻豌豆);绿豆淀粉和

杨麦淀粉(西北农林科技大学食品学院提供);直链淀粉、支链淀粉标准品[阿拉丁试剂(上海)有限公司];Megzyme试剂盒(美国Megazyme公司);糖化酶(100000 U/mL)、猪胰 α -淀粉酶(USP Grade)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司);氢氧化钠(分析纯,沧州市汇昇化工产品销售有限公司);无水硫酸铜、乙醇、醋酸、醋酸钠、石油醚(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);硫酸钾(分析纯,武汉鹏垒生物科技有限公司)。

1.1.2 仪器

JYL-G12E型高速破壁机(鼎立医疗器械有限公司);TDL-5-A台式离心机(上海安亨科学仪器厂);N6000型紫外分光光度计(上海佑科仪器仪表有限公司);Hitachi S-3400型扫描电子显微镜[日立分析仪器(上海)有限公司];SJ-9A-27-JY射频发生器(河北华氏有限公司);MASTERS12ER-2000激光粒度仪(英国Malvern公司);SUPER3 RVA快速黏度分析仪(澳大利亚Newport公司);D/max2200PCX-射线衍射仪(日本理学公司);HSJ-4A型HH系列数显恒温水浴锅(常州澳华仪器有限公司);Q2000差式扫描量热分析仪(美国TA公司);JB-12多头磁力搅拌器(常州市金坛友联仪器研究所);BSA2238-CW电子天平(精度0.1 mg,赛多利科学仪器北京有限公司);101-1AB型电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 麻豌豆淀粉的制备

将麻豌豆磨粉后过60目筛,按1:20(g:mL)料液比加纯水后搅拌36 h。将提取液放入4000 r/min离心机中离心10 min,倒掉上清液并刮去上层黄灰色物质,所得淀粉经纯水清洗3次后在放入离心机离心,所得淀粉倒入平皿中常温晾干^[11]。

1.2.2 总淀粉与直链淀粉含量测定

(1) 总淀粉含量

根据 Megzyme 试剂盒法(直链淀粉/支链淀粉检测试剂盒)测定。

(2) 直链淀粉含量

将一定比例直链淀粉和支链淀粉混合液与碘显色, 根据朗伯-比尔定理, 直链淀粉浓度与吸光度成线性关系的原理^[12], 参考文献^[13]中单波长分光光度法修改后对淀粉中直链淀粉含量进行测定。

1.2.3 淀粉颗粒形貌观察

将适当处理后淀粉轻放置在其上黏附有导电胶带的载物台上, 通过离子溅射镀膜仪对淀粉进行喷镀, 取出后, 将其置于扫描电子显微镜中并拍照^[14]。

1.2.4 淀粉粒径分布测定

取适量淀粉溶解于蒸馏水中, 在粒度分析仪中进行淀粉粒度测定。采用激光粒度分析仪, 检测淀粉颗粒平均直径。然后配制浓度为 1% 淀粉分散液, 以水为背景调试机器, 取少量分散液加入样品池, 在 0~1 μm 之间扫描, 记录数据并计算分析^[15]。

1.2.5 X 射线衍射

将淀粉置于铝片孔(15 mm×20 mm, 1.5 mm), 压紧并使用 X 射线衍射仪进行测定。测定条件为: 衍射角 2θ 为 4°~60°, 管压、管流分别为 40 kV、30 mA, 步长为 0.02°,

扫描速度为 6°/min, 积分时间为 0.2 min; 靶型为 Cu^[16]。相对结晶度根据 XRD 峰, 通过非线性峰拟合进行计算^[17]。

1.2.6 淀粉糊化特性测定

参照 AACC76-21 所述方法, 按样品各自的含水量称取麻豌豆淀粉于铝盒中, 先用螺旋桨手动搅拌几下使样品均匀分散, 装好铝盒后按设定好的升温降温程序(50 °C 保温 1 min, 以 12 °C/min 升温至 95 °C, 保温 2.5 min 后以 12 °C/min 降温至 50 °C, 保温 2 min), 用快速粘度分析仪测定样品糊化特性。

1.2.7 消化淀粉含量测定

参考 ENGLYST 等^[18]的方法并略作修改, 称取 100 mg 淀粉再加入 0.5 mol/L 醋酸钠缓冲液 10 mL, 加 1 mL 糖化酶(2500 U/mL)和 4 mL 猪胰 α-淀粉酶, 然后在 37 °C 水解 20 min 并沸水浴灭活, 采用 DNS 法测葡萄糖含量。用相同方法将样品在 37 °C 下水解 120 min 后测定葡萄糖含量。按照公式(1)~(3)计算快消化淀粉(rapidly digest starch, RDS), 慢消化淀粉(slowly digest starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)的含量:

$$\text{RDS}/\% = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{W} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{SDS}/\% = \frac{(G_{120} - G_0) \times 0.9}{W} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{RS}/\% = (1 - \text{RDS} - \text{SDS}) \times 100\% \quad (3)$$

式中, G_0 为淀粉酶解前葡萄糖含量, mg; G_{20} 为 20 min 内淀粉产生的葡萄糖含量, mg; G_{120} 为淀粉水解 120 min 产生的葡萄糖含量, mg; W 为样品的质量, g。

1.2.8 淀粉热特性测定

称取 3.0 mg 淀粉(湿基)置于差示扫描量热仪。选用最大量程 20 μL 的移液枪按比例添加蒸馏水, 在室温条件下将制备的样品放置 4 h。用差示扫描量热仪测定平衡好的样品, 升温速率为 10 °C/min, 测定温度范围 20~95 °C, 选择密封的空铝盘作为参比。所得图谱用仪器自带的分析软件进行分析。

1.3 数据处理

所有数据均为 3 次平行测量的平均值, 对同组数据利用 SPSS 17.0 进行显著性分析, 显著性差异水平($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 淀粉直链淀粉含量分析

由表 1 可知, 绿豆总淀粉含量高于麻豌豆淀粉和杨麦淀粉, 但 3 种淀粉之间并不存在显著性差异。麻豌豆淀粉中直链淀粉占比显著低于绿豆淀粉和杨麦淀粉。直链淀粉具有高溶解性和低黏度, 而支链淀粉具有低溶解性和高黏度; 直链淀粉不易形成凝胶, 而支链淀粉具有良好的凝胶形成能力^[19]。

表 1 3 种淀粉基本组分含量
Table 1 Content of 3 kinds of basic components of starch

样品名称	总淀粉/%	直链淀粉含量/%
麻豌豆淀粉	91.93±6.54 ^a	29.24±0.16 ^b
绿豆淀粉	93.22±4.86 ^a	32.46±0.00 ^a
杨麦淀粉	88.21±0.73 ^a	32.52±0.08 ^a

注: 同列数据后不同字母表示差异在 0.05 水平显著, 所得含量均为样品干基含量。下同。

2.2 扫描电子显微镜分析

由图 1 可以看出, 麻豌豆淀粉和杨麦淀粉的颗粒主要呈肾形和椭圆形, 且表面光滑, 但因部分淀粉复粒有褶皱; 绿豆淀粉颗粒主要呈椭圆形和圆饼状。

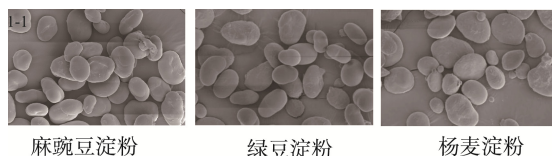


图 1 3 种淀粉颗粒扫描电子显微镜图(×1000)
Fig.1 Scanning electron microscope images of 3 kinds of starch granules (×1000)

2.3 淀粉粒径分析

由表 2 可知 3 种淀粉粒径平均值具有显著性差异, 其

表 2 3 种淀粉样品的粒径分布
Table 2 Particle size distribution of 3 kinds of starches

样品名称	粒径平均值/ μm	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D(3,2)/\mu\text{m}$
麻豌豆淀粉	27.20±1.73 ^a	9.00±0.22 ^a	25.17±0.21 ^a	39.60±1.92 ^a	11.77±0.12 ^a
绿豆淀粉	15.10±0.00 ^b	2.68±0.02 ^c	15.27±0.06 ^c	26.77±0.06 ^b	6.25±0.03 ^c
杨麦淀粉	19.60±0.00 ^b	8.12±0.03 ^b	20.60±0.00 ^b	28.33±0.06 ^b	9.34±0.07 ^b

中麻豌豆淀粉粒径平均值最大为 27.2 μm , 绿豆淀粉淀粉粒径平均值最小为 15.1 μm 。 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别指累计粒度分布百分数达到 10%、50%、90%所对应的粒径值; 麻豌豆淀粉粒径值 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 均与其他淀粉呈现显著性差异, 分别为 9.00、25.17、39.60 μm 。 $D(3,2)$ 表示面积平均径, $D(3,2)$ 越大, 粒度分布越宽^[20]。麻豌豆淀粉的 $D(3,2)$ 面积平均粒径与绿豆淀粉和杨麦淀粉具有显著性差异, 显著高于另外两种淀粉。

2.4 X-射线衍射分析

由表 3, 可知麻豌豆淀粉、绿豆淀粉表现出较为相似的衍射特征, 在衍射角 2θ 为 15° 、 17° 和 23° 具有较强衍射峰, 是典型 C 型淀粉, 而杨麦淀粉在 15° 、 17° 、 18° 、 23° 时有明显的衍射峰, 17° 、 18° 附近的衍射峰是相连的双峰, 这是典型 A 型淀粉。3 种淀粉的相对结晶度无显著性差异 ($P>0.05$), 麻豌豆淀粉和绿豆淀粉结晶度最高, 但其直链淀粉含量相对较低, 支链淀粉含量较高, 可能是由于支链淀粉通过其特有的支链结构, 有助于形成淀粉分子之间更为有序的排列, 进而提高淀粉的整体结晶度^[20]; 相对结晶度高其淀粉结构稳定性越好, 这可能是由于淀粉分子内部双螺旋间相互作用程度强、晶粒取向较好等原因^[21]。

2.5 淀粉糊化特性分析

淀粉糊的黏度与淀粉颗粒的大小、淀粉种类、直链淀粉含量及淀粉晶体结构、脂类物质含量、支链淀粉的

侧链长度等因素有关^[22]。峰值黏度代表了淀粉最大的膨胀力, 衰减值反映的是淀粉糊的热稳定性, 衰减值越大表明淀粉的热糊稳定性越差^[23-24]。由表 4 可知, 麻豌豆淀粉和杨麦淀粉的峰值黏度、低谷黏度和衰减值显著低于绿豆淀粉 ($P<0.05$), 说明绿豆淀粉与水结合能力更强, 吸水膨胀后淀粉糊更黏稠, 而麻豌豆淀粉与杨麦淀粉的热糊稳定性更好, 在高温环境有更强的耐热性和抗剪切力。回生值高说明淀粉制的产品质地坚硬, 老化变硬速度更快; 3 种淀粉的回生值呈现显著性差异 ($P<0.05$), 说明麻豌豆淀粉更易形成凝胶更易老化, 而杨麦淀粉不易老化。峰值时间可反映淀粉糊化的难易程度, 成糊温度代表黏度开始增加的温度^[25]。由此可知, 杨麦淀粉成糊温度显著高于另外两种淀粉, 说明杨麦淀粉糊化时间晚, 而麻豌豆淀粉成糊时间最早。

2.6 淀粉消化特性分析

RDS 指的是淀粉在 0~20 min 内会迅速产生高血糖应答, 对糖尿病患者和中老年人等人群不利^[21]。SDS 指的是在(20~120 min)内缓慢水解的淀粉, 具有缓慢消化吸收、维持饱腹感并释放能量, 维持餐后血糖稳态等特殊功能^[26-27]。RS 则是在 120 min 内未能被水解的部分, 其在人体中不被消化, 能在结肠中发酵产生短链脂肪酸等, 具有高膳食纤维含量、低热量特点, 有助于润肠轻体等作用, 因此 RS 含量较高可作为糖尿病等特殊人群的主食^[27-28]。3 种淀粉的体外消化参数如表 5 所示, 从表 5 中可以看出

表 3 3 种淀粉的 X-射线衍射特征参数
Table 3 X-ray diffraction characteristics of 3 kinds of starches

样品名称	衍射角 $2\theta/^\circ$			相对结晶度/%	晶型
	15	17	23		
麻豌豆淀粉	15.22	17.20	23.22	31.64±5.44 ^a	C
杨麦淀粉	15.16	17.16	23.16	27.15±2.66 ^a	A
绿豆淀粉	15.20	17.24	23.28	34.30±2.15 ^a	C

表 4 3 种淀粉糊化特性参数
Table 4 Gelatinization characteristic parameters of 3 kinds of starches

样品名称	峰值黏度/cp	低谷黏度/cp	衰减值/cp	最终黏度/cp	回生值/cp	峰值时间/min	成糊温度/ $^\circ\text{C}$
麻豌豆淀粉	2998.5±74.2 ^b	2353.0±93.3 ^b	646±168 ^b	4703.0±231.9 ^a	2350.0±138.6 ^a	4.73±0.00 ^b	72.65±0.00 ^c
绿豆淀粉	5429.5±105.4 ^a	3344.0±38.2 ^a	2086±144 ^a	4904.0±75.0 ^a	1560.0±36.8 ^b	4.27±0.00 ^b	74.73±0.46 ^b
杨麦淀粉	2908.5±0.7 ^b	2355.0±69.3 ^b	554±70 ^b	3310.5±77.8 ^b	955.0±8.5 ^c	6.94±0.09 ^a	88.88±0.04 ^a

3 种淀粉的 RDS 含量具有显著性差异, 其中麻豌豆淀粉 RDS 含量最多, 杨麦淀粉中 RDS 含量最少; 3 种淀粉中 SDS 含量具有显著性差异($P<0.05$), 其中麻豌豆和杨麦淀粉比绿豆中 SDS 含量高; 杨麦与绿豆淀粉中抗性淀粉 RS 含量比麻豌豆淀粉含量高, 且具有显著性差异($P<0.05$)。由此可知麻豌豆淀粉在 RDS 含量和 SDS 含量高于绿豆淀粉和杨麦淀粉; 杨麦淀粉的 RS 含量最高。

表 5 3 种淀粉体外消化参数
Table 5 Parameters *in vitro* of 3 kinds of starch digestion

样品名称	RDS/%	SDS/%	RS/%
麻豌豆淀粉	8.92±0.03 ^a	4.35±0.02 ^a	80.07±0.01 ^b
绿豆淀粉	7.06±0.07 ^b	2.84±0.06 ^c	87.55±0.01 ^a
杨麦淀粉	6.33±0.06 ^c	3.73±0.09 ^b	88.05±0.04 ^a

表 6 3 种淀粉样品的差示扫描量热分析特征参数
Table 6 Differential scanning calorimetric characteristic parameters of 3 kinds of starches

样品	起始糊化温度/°C	峰值温度/°C	终止温度/°C	糊化温度范围/°C	焓变/(J/g)
麻豌豆淀粉	57.18±0.71 ^b	63.03±0.88 ^b	72.79±0.26 ^{ab}	15.61±0.97 ^a	7.04±0.01 ^a
绿豆淀粉	63.92±1.13 ^a	69.13±0.97 ^a	74.62±2.84 ^a	10.70±3.97 ^a	6.53±0.54 ^a
杨麦淀粉	58.59±0.42 ^b	62.84±0.64 ^b	68.98±1.47 ^b	10.39±1.05 ^a	4.10±2.00 ^b

3 结 论

麻豌豆淀粉颗粒呈椭圆形和肾形, 粒径平均值最大, 属于典型的 C-型结晶, 其支链淀粉、快消化淀粉和慢消化淀粉含量均最高, 热糊稳定性好, 容易糊化且成糊时间早, 冷却后更易形成凝胶及老化。杨麦淀粉呈椭圆形和肾形, 属于的 A-型结晶, 其直链淀粉和抗性淀粉含量显著高于麻豌豆($P<0.05$), 虽易糊化但成糊时间晚, 冷却后不易老化; 绿豆淀粉颗粒主要呈圆饼状和椭球形, 粉粒径平均值最小, 属于的 C-型结晶, 其直链淀粉和抗性淀粉含量与杨麦淀粉无显著性差异($P>0.05$), 热糊稳定性差, 不易糊化且成糊时间早, 冷却后更易形成凝胶及老化。

参考文献

- [1] 曹杨. 豌豆综合利用研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012.
CAO Y. Research on comprehensive utilization of peas [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2012.
- [2] ROY F, BOYE JI, SIMPSON BK. Bioactive proteins and peptides in pulse crops: Pea, chickpea and lentil [J]. Food Research International, 2010, 43(2): 432–432.
- [3] BOUCHEN AK, MALIK A. Nutritional quality of legumes, and their role in cardiometabolic risk prevention: A review [J]. Journal of Medicinal Food, 2013, 16(3): 185–198.
- [4] ZHOU D, MA Z, YIN X, *et al.* Structural characteristics and physicochemical properties of field pea starch modified by physical, enzymatic, and acid treatments [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 386–394.
- [5] 李兆丰, 顾正彪, 洪雁. 豌豆淀粉的研究进展[J]. 食品与发酵工业,

2.7 淀粉差示扫描量热分析

淀粉的热力学特性是淀粉在加热糊化中淀粉分子双螺旋晶体转变、温度与糊化焓等变化情况^[29]。起始糊化温度和终止糊化温度等在一定程度反映淀粉的糊化特性, 其值低则说明淀粉易糊化; 热焓值与直链淀粉双螺旋结构以及结晶区的晶体结构有关, 主要是无定形区直链淀粉双螺旋结构被破坏而吸热^[30–31]。从表 6 可以看到, 麻豌豆淀粉与杨麦淀粉在起始糊化温度、峰值温度、终止温度低于绿豆淀粉, 并具有显著性差异($P<0.05$)。这说明麻豌豆淀粉和杨麦淀粉比绿豆淀粉更易糊化, 而绿豆淀粉不易糊化, 这可能是由于绿豆淀粉的晶体结构更加稳定而不易糊化。麻豌豆淀粉的热焓值最高且与杨麦淀粉呈现显著性差异, 这可能与麻豌豆淀粉中含有较高的直链淀粉有关。

2003(10): 70–74.

LI ZF, GU ZB, ONG Y. Research progress of pea starch [J]. Food and Fermentation Industry, 2003(10):70–74.

- [6] SUN Q, XIONG CSL. Functional and pasting properties of peastarch and peanut protein isolate blends [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 101(30): 1134–1139.
- [7] CANO AI, CHAFER M, CHIRALT A, *et al.* Physical and microstructural properties of biodegradable films based on pea starch and PVA [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 167: 59–64.
- [8] SLSTTERY CJ, KAVAKL IH, OKITA TW. Engineering starch for increased quantity and quality [J]. Trends in Plant Sciences, 2000, 5(7): 291–298.
- [9] 曹征南, 王超, 李素芬, 等. 热处理温度对豌豆淀粉结构变化与消化特性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(7): 255–259.
CAO ZN, WANG C, LI SF, *et al.* Heat treatment temperature on the pea starch structure change and the influence of digestive characteristics [J]. Food Science, 2021, 46(7): 255–259.
- [10] 张燕鹏, 庄坤, 丁文平, 等. 豌豆淀粉与马铃薯淀粉、玉米淀粉理化性质比较[J]. 食品工业科技, 2016, 37(4): 183–186.
ZHANG YP, ZHUANG K, DING WP, *et al.* Pea starch and potato starch, corn starch physical and chemical properties comparison [J]. Food Industry Technology, 2016, 37(4): 183–186.
- [11] 张伟丽, 白文明, 王鹏科, 等. 不同提取方法对苦荞淀粉理化特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(6): 28–33.
ZHANG WL, BAI WM, WANG PK, *et al.* Effects of different extraction methods on physicochemical properties of Tartary buck wheat starch [J]. Food Research and Development, 2018, 39(6): 28–33.
- [12] 张巧杰. 直链淀粉检测方法与技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.

- ZHANG QJ. Research on amylose detection method and technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [13] 李莉. 玉米淀粉中直链淀粉含量的分析测定方法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
- LI L. Study on analysis and determination method of amylose content in corn starch [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018.
- [14] 夏天雨. 射频/微波钝化处理对马铃薯淀粉结构及理化特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- XIA TY. Effect of RF/microwave toughening treatment on structure and physicochemical properties of potato starch [D]. Yanglin: Northwest A & F University, 2019.
- [15] 张永春, 余世锋, 郑喜群. 低温冻融处理对糯性玉米淀粉颗粒结构特性的影响[J]. 食品科技, 2014, 39(10): 178-183.
- ZHANG YC, YU SF, ZHENG XQ. The effect of low-temperature freeze-thaw treatment on the structural characteristics of waxy corn starch granules [J]. Food Science and Technology, 2014, 39(10): 178-183.
- [16] 刘星. 薏仁米主要营养成分近红外光谱快速测定及理化性质研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- LIU X. Rapid determination of main nutritional components of coix seed by near-infrared spectroscopy and study on its physicochemical properties [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [17] 刘星, 范楷, 司文帅, 等. 谷粒湿热处理对薏仁米淀粉形态、结构与热特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 128-133.
- LIU X, FAN K, SI WS, *et al.* Effects of damp-heat treatment of grain on morphology, structure and thermal properties of barley starch [J]. Food Science, 2018, 39(19): 128-133.
- [18] ENGLYST HN, KINGMAN SM, CUMMINGS JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(2): 33-35.
- [19] 琚魏波, 柳青山, 白文斌, 等. 山西不同品种高粱淀粉特性[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(6): 103-110.
- JU WB, LIU QS, BAI WB, *et al.* Different varieties of sorghum starch characteristics of Shanxi [J]. China Grain & Oil Journal, 2024, 39(6): 103-110.
- [20] 郭婷, 孙宝国, 汪丽萍, 等. 微粉化对豌豆粉理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(3): 67-70, 75.
- GUO T, SUN BG, WANG LP, *et al.* Micronization effect on the physical and chemical properties of pea meal [J]. Food Industry Technology, 2014, 35(3): 67-70, 75.
- [21] WANG WT, GE JL, XU K, *et al.* Differences in starch structure, thermal properties, and texture characteristics of rice from main stem and tiller panicles [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105341.
- [22] 吴昊. 反复/连续干热处理对不同晶型淀粉结构及理化特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- WU H. The effects of repeated/continuous dry heat treatment on the structure and physicochemical properties of starch with different crystalline types [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [23] 卢樾, 雷宁宇, 宋萧萧, 等. 4种杂豆淀粉结构特征和理化特性比较[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 34-40.
- LU Y, LEI NY, SONG XX, *et al.* Comparison of structural characteristics and physicochemical properties of starch from 4 varieties of common bean [J]. Food Science, 2019, 44(6): 34-40.
- [24] 侯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 不同种类淀粉理化性质的比较[J]. 粮食加工, 2015, 40(2): 32-37.
- HOU L, HAN XX, ZHENG XL, *et al.* Comparison of physicochemical properties of different types of starch [J]. Grain Processing, 2015, 40(2): 32-37.
- [25] 张正茂, 王志华, 颜永斌. 不同来源淀粉的糊化特性研究[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 141-145.
- ZHANG ZM, WANG ZH, YAN YB. Study on gelatinization characteristics of different starch sources [J]. Food Industry, 2016, 37(6): 141-145.
- [26] 姚月华, 唐宁, 杨舒莹, 等. 箭筈豌豆淀粉理化及消化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(12): 8-14, 22.
- YAO YH, TANG N, YANG SY, *et al.* Study on the physicochemical and digestive properties of arrow pea starch [J]. China Grain & Oil Journal, 2020, 35(12): 8-14, 22.
- [27] 张群. 慢消化淀粉的制备及应用研究[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(7): 784.
- ZHANG Q. Study on preparation and application of slow digestion starch [J]. Journal of Food and Biotechnology, 2014, 33(7): 784.
- [28] 王雨辰, 孔莲花. 抗性淀粉生物学活性研究进展[J]. 肠外与肠内营养, 2018, 25(5): 313-317.
- WANG YC, KONG LH. Research progress on biological activity of resistant starch [J]. Parenteral and Enteral Nutrition, 2018, 25(5): 313-317.
- [29] 王杰儒, 白琴波, 武昌, 等. 青海地区蚕豆与豌豆主要品种淀粉特性研究[J]. 食品科技, 2024, 49(5): 161-170.
- WANG JR, BAI QB, WU C, *et al.* The main varieties of starch properties research of qinghai region fava beans and peas [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(5): 161-170.
- [30] 王立东, 刘婷婷, 寇芳. 球磨处理对豌豆淀粉结构及理化性质的影响[J]. 高分子通报, 2016(11): 69-76.
- WANG LD, LIU TT, KOU F. Ball mill processing of pea starch structure and the influence of the physical and chemical properties [J]. Polymer Bulletin, 2016(11): 69-76.
- [31] 郭洪梅. 超微粉碎处理对杂粮(豆)淀粉结构及理化特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- GUO HM. The effect of ultrafine grinding treatment on the structure and physicochemical properties of starch in miscellaneous grains (beans) [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)