DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260205004
引用格式: 王红霞, 李梅, 郑娅, 等. 黄皮和紫皮马铃薯淀粉加工尾水蛋白功能和理化特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(15): 47–53.
Wang Hongxia, Li Mei, Zheng Ya, et al. Functional and physicochemical properties of proteins from starch processing wastewater of yellow- and purple- fleshed potatoes [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(15): 47–53. (in Chinese with English abstract).

黄皮和紫皮马铃薯淀粉加工尾水蛋白功能和理化特性研究

王红霞, 李 梅, 郑 娅, 胡生海*
(甘肃省农业科学院农产品贮藏加工研究所, 兰州 730070)

摘 要: 目的 探究品种对马铃薯淀粉加工尾水蛋白功能、理化特性的影响。**方法** 以黄皮和紫皮马铃薯为供试原料, 采用碱溶酸沉法提取淀粉加工尾水蛋白, 对 2 种蛋白的功能和理化特性进行测定和比较。**结果** 紫皮马铃薯尾水蛋白(PP)的溶解性、起泡性、持水性及乳化稳定性(42.03%, 59%, 5.53 g/g, 15.77 min)极显著高于黄皮马铃薯(YP) (35.58%, 24%, 3.74 g/g, 12.28 min) (P<0.01); YP 的乳化性为 14.71 m^2/g, 极显著高于 PP (8.65 m^2/g) (P<0.01); PP 和 YP 在持油性上无显著差异, 分别为 8.20 g/g, 8.42 g/g (P>0.05)。PP 平均粒径(511.66 nm±33.23 nm)显著小于 YP (723.00 nm±39.84 nm) (P<0.05); PP 的 ζ-电位绝对值为 12.60 mV±1.22 mV, 大于 YP (10.16 mV±0.21 mV)。氨基酸组成结果显示: 二者氨基酸组成相似, 但 YP 的必需氨基酸、非必需氨基酸和疏水性氨基酸含量(83.323、115.707、80.895 mg/g)显著高于 PP (70.954、98.739、67.987 mg/g) (P<0.05 或 P<0.01)。**结论** PP 和 YP 在理化、功能和营养特性等方面存在显著差异, 为不同品种马铃薯尾水蛋白资源化利用提供数据支撑。

关键词: 尾水蛋白; 黄皮马铃薯; 紫皮马铃薯; 功能特性; 理化特性
中图分类号: TS209 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)15–0047–07

Functional and physicochemical properties of proteins from starch processing wastewater of yellow- and purple- fleshed potatoes

WANG Hong-Xia, LI Mei, ZHENG Ya, HU Sheng-Hai*
(*Agricultural Products Storage and Processing Research Institute*, *Gansu Academy of Agricultural Sciences*, *Lanzhou* 730070, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the influence of potato cultivar on the functional and physicochemical properties of proteins from starch processing wastewater. **Methods** This research utilized yellow-fleshed potato and purple-fleshed potato as raw materials. Proteins were derived from the starch processing wastewater using the alkali-soluble acid precipitation method, and their functional and physicochemical properties were determined and

收稿日期: 2026-02-05
基金项目: 甘肃省农业农村厅科技支撑项目(KJZC-2025-30)
第一作者: 王红霞(1993—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为农产品贮藏加工。E-mail: 2533559209@qq.com
***通信作者:** 胡生海(1972—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: 274406724@qq.com

compared. **Results** The results demonstrated that the solubility, foaming capacity, water holding capacity and emulsifying stability of the proteins from purple-fleshed potato starch wastewater (PP) (42.03%, 59%, 5.53 g/g, 15.77 min) were significantly higher than those of yellow-fleshed potatoes (YP) (35.58%, 24%, 3.74 g/g, 12.28 min) (P<0.01). The emulsifying activity of YP reached 14.71 m^2/g, significantly higher than that of PP (8.65 m^2/g) (P<0.01). There was no significant difference in oil retention between PP and YP, which were 8.20 g/g and 8.42 g/g respectively (P>0.05). The average particle size of PP (511.66 nm±33.23 nm) was significantly smaller than that of YP (723.00 nm±39.84 nm) (P<0.05). The absolute value of the zeta potential of PP was 12.60 mV±1.22 mV, higher than that of YP (10.16 mV±0.21 mV). Amino acid composition analysis revealed that PP and YP exhibited similar amino acid profiles. Nevertheless, YP possessed significantly higher content of essential amino acids, nonessential amino acids and hydrophobic amino acids (83.323, 115.707 and 80.895 mg/g) compared with PP (70.954, 98.739 and 67.987 mg/g) (P<0.05 or P<0.01). **Conclusion** There are significant differences in the physicochemical, functional and nutritional properties between PP and YP, laying a data foundation for targeted resource utilization of wastewater proteins from various potato cultivars.

KEY WORDS: wastewater proteins; yellow-fleshed potato; purple-fleshed potato; functional properties; physicochemical properties

0 引 言

马铃薯是全球重要的粮食作物之一，对保障粮食安全具有重要作用[1]。统计数据显示，2023 年全球年产量达 3.83 亿吨，我国马铃薯年产量达 9349.18 万吨，是全球产量最高的国家[2]。其中，约 12%的马铃薯用于加工利用，且主要集中在淀粉加工领域[3]。在淀粉加工过程中会产生大量的尾水，其中蛋白质含量约为 1.5%，是整个尾水的主要污染源[4]。有学者统计，平均每生产 1 吨淀粉尾水排放量高达 20 吨，其中约 5 吨为需要进一步处理的高浓度蛋白尾水[5−6]。淀粉加工企业受多种因素制约，极少对尾水中的蛋白质进行回收，通常直接排放[7]。而尾水中含有大量高浓度有机物，直接排放不仅会造成环境污染，也会造成严重的资源浪费。

马铃薯蛋白氨基酸种类丰富，必需氨基酸含量高，且组成与人体必需氨基酸模式非常接近，被认为是最好的植物源蛋白之一[8−9]。马铃薯蛋白显著的功能特性、生物活性和营养价值，使其在多个领域中展现出巨大的应用潜力[8−10]，如作为高附加值成分添加到乳制品、婴儿配方制品及功能性饮料中，还可应用于包装材料和药物递送领域，如作为维生素和虾青素的载体，保护其不流失。

目前已经报道的马铃薯淀粉加工尾水蛋白回收技术主要包括热絮凝法、超滤法、生物处理法和碱溶酸沉法等[5,11−13]。热絮凝法已用于工业化应用，但回收过程易导致蛋白变性，限制了其进一步深加工和高值化利用。多项研究采用超滤技术从马铃薯淀粉尾水中分离蛋白，虽可获得较高提取率，但尾水中有机物易引发严重膜污染，且运行成本较高，目前仍局限于实验室研究阶段。生物处理法对环境要求极高，周期长且成本高。碱溶酸沉法作为植物蛋白提取的经典工艺，应用已较为成熟，然而，针对不同品种马铃薯淀粉加工尾水蛋白的理化与功能特性差异研究仍较为缺乏。

鉴于此，本研究分别以黄皮马铃薯与紫皮马铃薯淀粉加工尾水为原料，采用碱溶酸沉法制备蛋白，并测定其基本理化性质及功能特性，重点解析品种差异对蛋白功能特性的影响规律，以期明确不同品种马铃薯尾水蛋白的品质特征，为马铃薯淀粉加工副产物尾水蛋白高值化利用提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄皮马铃薯、紫皮马铃薯购于庄浪县宏达淀粉加工有限公司；亚麻籽油由甘肃省农科院农产品贮藏加工研究所生产。

氢氧化钠(NaOH)、盐酸(HCl)、亚硫酸氢钠($NaHSO_3$)、十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)、磷酸、乙醇(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)；考马斯亮蓝 G-250(分析纯)、牛血清白蛋白组分五(bovine serum albumin fraction V, BSA-V)(纯度≥95%)、柠檬酸钠缓冲液(北京索莱宝科技有限公司)；磷酸盐缓冲液(phosphate buffered saline, PBS)(北京兰杰柯科技有限公司)；氨基酸标准品(AAS18)分析标准品(美国 Sigma 公司)

1.2 仪器与设备

BSA224S 分析天平[精度 0.1 mg，赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]；PHS-3C pH 计(上海佑科仪表有限公司)；SpectraMax190 酶标仪(美国 Molecular Devices Corporation 公司)；TG6-WS 高速离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)；LR-5 高速均质机(无锡易凯自动化技术有限公司)；Zetasizer Nano ZS90 电位仪(英国 Malvern 公司)；LC-WBS-4 磁力搅拌器(上海力辰科学仪器有限公司)；Biochrom30+氨基酸分析仪(英国 Biochrom 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 马铃薯淀粉加工尾水制备

分别取黄皮、紫皮马铃薯清洗干净, 切小碎块, 称取 500 g 加入 500 mL 0.1% $NaHSO_3$ 溶液, 用打浆机打成糊状, 80 目筛过滤, 滤液 4 ℃静置 0.5 h 后, 6000 r/min 离心 15 min, 收集上清液, 即为马铃薯淀粉加工尾水, 于 4 ℃存放备用[14]。

1.3.2 碱溶酸沉法提取尾水蛋白

取前期实验制备的尾水, 用 1.0 mol/L NaOH 将 pH 调节至 9, 室温搅拌 2 h, 使蛋白充分溶解, 以 6000 r/min, 离心 15 min, 上层为蛋白提取液, 下层为不溶性残渣, 取上清液, 用 1.0 mol/L HCl 调节 pH 至 4, 室温放置 2 h, 使蛋白充分析出, 6000 r/min 离心 10 min, 收集沉淀, 除去水分。将沉淀溶解在去离子水中, pH 调节至 7, 将溶液转移至分子量为 3500 Da 透析袋中, 在 4 ℃下用 PBS 缓冲液透析 2 d。随后进行冷冻干燥[15], 将黄皮马铃薯蛋白记为 YP, 将紫皮马铃薯蛋白记为 PP。

1.3.3 溶解性

配制 0.2 mg/mL BSA-V溶液, 分别取标准溶液 0、100、200、400、600、800、1000 μL 于 1.5 mL Eppendorf 管中, 再用蒸馏水补充至 1000 μL, 混匀。取 20 μL 于 96 孔板中, 分别加入 230 μL 考马斯亮蓝溶液。避光放置 10 min 后, 于 595 nm 处测定吸光度值[16]。以溶液质量浓度为横坐标(X, mg/mL), 吸光度为纵坐标(Y)进行线性回归, 得出的回归方程为 Y=5.5613X+0.5158, r^2=0.9908, 表明 BSA-V溶液在质量浓度为 0~0.2 mg/mL 范围内线性关系良好。

分别配制 2 mg/mL 蛋白溶液 20 mL, 室温搅拌 2 h, 使蛋白质充分溶解, 随后以 6000 r/min 离心 10 min 后, 取上清液, 用考马斯亮蓝法测定上清液中蛋白质量浓度和样品中总蛋白质量浓度。溶解度(S)计算公式为:

$$S/\%=\frac{W_1}{W_2}\times 100\% \tag{1}$$

式中: S 为溶解度, %; W_1 为上清液蛋白质量浓度, mg/mL; W_2 为总蛋白质量浓度, mg/mL。

1.3.4 乳化性及乳化稳定性

分别配制 5 mg/mL 蛋白溶液 15 mL, 室温搅拌 2 h, 使蛋白质充分溶解, 随后加入 5 mL 亚麻籽油, 在 10000 r/min 条件下高速均质 1 min, 得到乳状液, 从溶液底部吸取乳状液 50 μL 与 5 mL 质量分数为 0.1%的 SDS 溶液混合, 以 0.1% SDS 溶液作空白对照, 在 500 nm 波长处测定吸光度(A_0)。室温放置 10 min 后, 以同样的操作方式再次测定吸光度(A_t)[17]。计算公式(2)~(3)如下:

$$\mathrm{EAI}/(\mathrm{m^2/g})=\frac{2\times 2.303\times A_0\times \mathrm{DF}}{\theta\times p\times 10000}\times 100 \tag{2}$$

$$\mathrm{ESI/min}=\frac{A_0\times\Delta T}{\Delta A}\times 100 \tag{3}$$

式中: EAI 为乳化性(emulsifying activity index), m^2/g; ESI 为乳化稳定性(emulsifying stability index); DF 为稀释因子(dilution factor); p 为溶液蛋白质量浓度, mg/mL; θ 为油体积分数, %; ΔA 为 A_0 和 A_{10} 之间的差值; ΔT 为时间差, min。

1.3.5 起泡性及泡沫稳定性

配制 10 mg/mL 蛋白质溶液 20 mL, 室温条件下在高速分散器中以 10000 r/min 的转速均质 2 min 后, 转移至 50 mL 量筒中, 记录均质停止时的泡沫体积(即整个体积), 以及均质停止后 30 min 的泡沫体积[18], 计算公式(4)~(5)如下:

$$\mathrm{FC}/\%=\frac{V}{V_0}\times 100\% \tag{4}$$

$$\mathrm{FS}/\%=\frac{V_t}{V}\times 100\% \tag{5}$$

式中: FC 为起泡性(foaming capacity), %; FS 为起泡稳定性(foaming stability), %; V 为均质停止时泡沫的体积, mL; V_0 为均质停止时溶液体积, mL; V_t 为 t 时间后泡沫体积, mL。

1.3.6 持水性及持油性

将 50 mg 蛋白粉加入到预先称重的 10 mL Eppendorf 管中, 分散于 5 mL 去离子水或亚麻籽油中。混合液涡旋混匀 30 min 后孵育 1 h, 6000 r/min 离心 10 min, 小心移除上清液。记录 Eppendorf 管和沉淀物的重量, 持水性及持油性计算公式(6)如下:

$$\mathrm{WHC/OHC}/(\mathrm{g/g})=\frac{W_2-W_1}{W_\mathrm{p}} \tag{6}$$

式中: WHC 代表持水性(water holding capacity), g/g; OHC 代表持油性(oil holding capacity), g/g; W_2 为 Eppendorf 管和沉淀物的重量, g; W_1 为 Eppendorf 管重量, g; W_p 为蛋白重量, g。

1.3.7 粒径分布和 Zeta 电位测定

粒径分布参照 Peng 等[15]的方法进行。采用 Zetasizer Nano ZS90 电位仪进行粒径分布分析。将 10 mg 蛋白样品与 10 mL 去离子水充分混匀, 然后 6000 r/min, 离心 5 min, 取上清液, 超声 5 min 以确保分散均匀后测试。以水为分散介质, 25 ℃下平衡 120 s, 测定粒径分布。

Zeta 电位测定参照 Peng 等[15]的方法进行。用 0.01 mol/L PBS (pH 7.2)配制 1 mg/mL 蛋白混悬液, 充分混匀, 然后 6000 r/min, 离心 5 min, 取上清液, 测定 Zeta 电位。

1.3.8 氨基酸组成及含量测定

分别准确称取 2 种蛋白粉末样品 50~200 mg, 置于水解管底部, 避免样品黏附于管壁。按体积比 1:1 加入水和盐酸, 氮吹仪通入高纯氮气吹扫 15 min 以彻底排除管内氧气, 随后密封水解管。将封口的水解管置油浴锅中 110 ℃水解 24 h, 水解结束后, 自然冷却至室温。过 0.45 μm 滤膜后, 于 50 mL 容量瓶定容, 准确吸取 2 mL 定容样品, 加热脱酸至干燥, 温度为 85 ℃。加入 1 mL 柠檬酸钠缓冲液充分溶解混匀, 过 0.22 μm 过滤器, 使用氨基酸分析仪进行分析。

1.4 数据处理

本研究数据均为 3 个平行样品的平均值, 结果采用 SPSS 20.0 进行统计学分析, 采用 Origin 2024 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 粒径和 Zeta 电位分析

粒径分布可作为蛋白质结构变化的间接指标，可以反映样品溶液中颗粒的尺寸与均一性[1,19]。如图 1A 所示，PP 平均粒径(511.66±33.23) nm 显著小于 YP (723.00±39.84) nm (P<0.05)，粒径分布曲线也明显向左偏移(图 1B)，说明 PP 颗粒更小。此外，PP 呈现出单峰形状，说明其颗粒大小较为均一；而 YP 表现出双峰形状，说明样品中存在两类不同尺寸的蛋白颗粒。有研究显示，蛋白粒径大小与溶解度密切相关[18]，同时较小的粒径可使蛋白在水油界面吸附更快，有助于泡沫的形成和乳液的稳定[15]，这有助于解释两种蛋白在溶解度、乳化稳定性、起泡性等功能特性存在的差异。

蛋白质溶液的 ζ-电位是衡量分子间相互作用的关键参数，它既揭示蛋白质表面电荷情况，也可以反映整个蛋白体系的稳定程度[19]。研究认为，较高的ζ-电位绝对值，产生较强的分子间斥力，抑制分子之间聚沉，进而使溶液体系更加稳定，这种稳定性有利于提高蛋白质的功能性质[18]。如图 2 所示，PP 表面电位绝对值(12.60±1.22) mV，高于 YP (10.16±0.21) mV，说明其分子表面携带更多的净电荷，分子间静电斥力更强，使其蛋白分散体系更加稳定。

2.2 溶解性分析

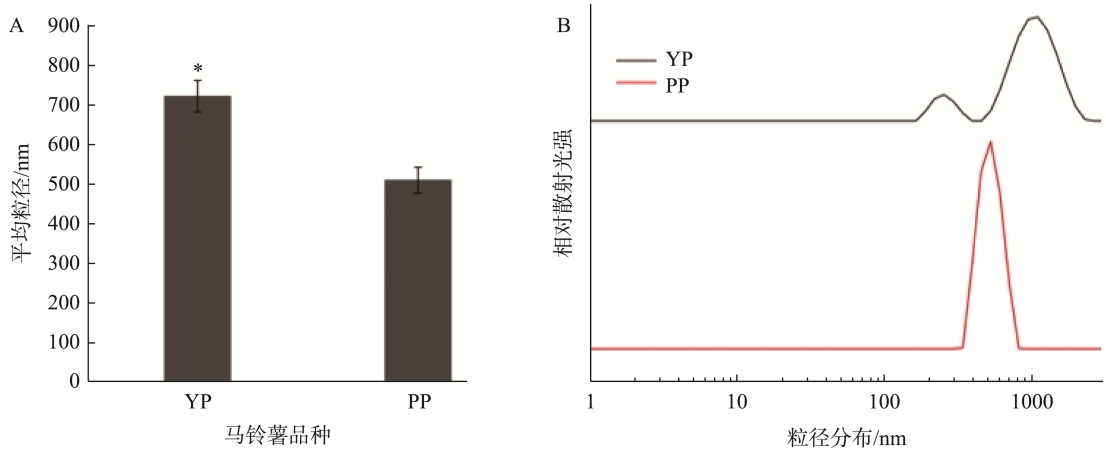
蛋白质溶解度是影响起泡、乳化和凝胶特性等功能特性的最重要的食品加工参数之一，体现了蛋白质与水分子的作用能力，其高低程度直接决定了蛋白质在食品生产应用中的价值[20]。通常而言，疏松的分子结构会促进肽键伸展，增强侧链极性基团的水合作用，进而使其溶解性提高。同时，蛋白分子的粒度大小也会影响其溶解度，粒度越小越有利于溶解[19]。两种蛋白的溶解度如图 3 所示，PP 溶解度为 42.03%，极显著高于 YP (35.58%) (P<0.01)。PP 表现出较为优异的溶解性，这可能与其较小的粒径分布(图 1)、较大的电位值(图 2)以及相对疏松的分子结构有关[21]。较高的水溶解性为其优异的持水性、起泡性等功能特性提供了前提条件[20]。

2.3 乳化性及乳化稳定性分析

蛋白质在食品加工中常被用作天然乳化剂，是因为其兼具亲水性和疏水性。其乳化性能通常由乳化性和乳化稳定性来评估[21]。乳化性指的是乳化剂在油水界面上吸附的能力；乳化稳定性是指在规定时间内相同稀释度下乳液的稳定性[22]。如图 4 所示，YP 的乳化性为 14.71 m^2/g，极显著高于 PP (8.65 m^2/g)，均低于大豆蛋白[15](P<0.01)。这可能是由于 YP 含有更高比例的疏水性氨基酸残基或更易变性的结构域，使其能迅速吸附并在界面上铺展，从而实现更高的乳化活性[23]。但值得注意的是，PP 的乳化稳定性为 15.77 min，极显著高于 YP (12.28 min) (P<0.01)，说明乳化稳定性并不完全依赖于初始乳化能力。有研究结果显示，有些蛋白即使初始乳化活性一般，也能形成持久稳定的乳液，这可能是由于部分蛋白质聚集形成了更具保护性的复合结构[24]。

2.4 起泡性及起泡稳定性分析

起泡性和起泡稳定性是衡量蛋白质加工特性的另一个重要指标。蛋白质的起泡性能与其在气液界面形成薄蛋白层并稳定该界面的能力有关[25]。起泡性和起泡稳定性受到蛋白溶解度、粒径和结构等的影响[18]。研究显示，蛋白质发泡能力与溶解度呈中等正相关，蛋白质溶解度的提高加速了空气-水界面多层蛋白质膜的形成[26]。如图 5 所示，PP 起泡性为 59%，极显著高于 YP (24%) (P<0.01)，且高于大豆蛋白[15]，这可能与 PP 较为优异的水溶解性、表面特性和表面吸附性有关。YP 和 PP 都有较高的起泡稳定性，分别为 88.8%, 89.0%，无显著性差异(P>0.05)。



注: *表示不同品种间差异显著(P<0.05)。

图 1 不同品种蛋白的平均粒径(A)及粒径分布(B)

Fig.1 Mean particle diameter (A) and particle size distribution (B)of proteins from different varieties

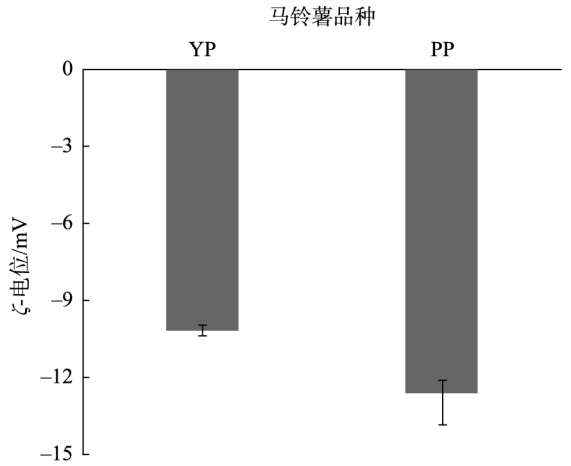
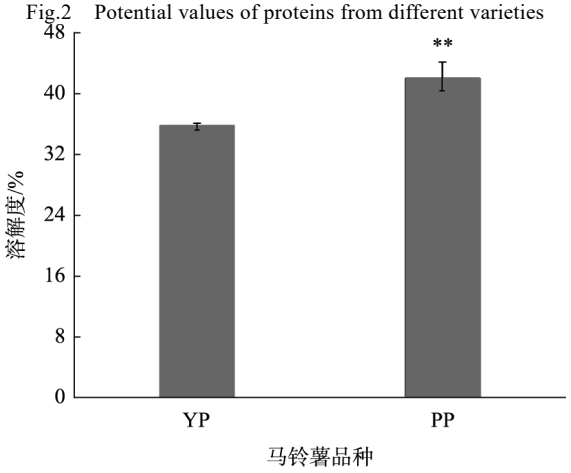


图 2　不同品种蛋白的电位值

Fig.2　Potential values of proteins from different varieties



注: **表示同一指标不同品种间差异极显著(P<0.01)。下同。

图 3　不同品种蛋白的溶解度

Fig.3　Solubility of proteins from different varieties

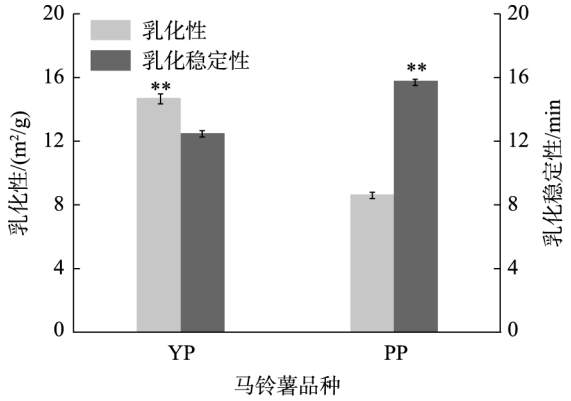


图 4　不同品种蛋白的乳化性及乳化稳定性

Fig.4　Emulsifying activity and emulsion stability of proteins from different varieties

2.5　持水性和持油性

蛋白质的持水性常用来反应蛋白质吸收水分能力，与食品的质构、口感和黏度密切相关[27]。蛋白质的持油性通常反映了其与脂质相互作用的能力，并与风味保留、货架期和乳化特性密切相关；其受蛋白种类、油脂添加量和疏水性的影响[28]。如图 6 所示，PP 的持水性为 5.53 g/g，极显著高于 YP (3.74 g/g) (P<0.01)，高于大豆蛋白 4.36 g/g[20]，可能是由于 PP 较小的粒径和较高的水溶性增强了蛋白质分子与水表面之间的相互作用，使其吸附力更强。同时，相对较高的ζ电位(图 2 所示)也有助于提高持水性。结果显示，PP 和 YP 都有较高的持油性，分别为 8.20 g/g 和 8.42 g/g (P>0.05)，高于大豆蛋白 5.32 g/g[20]。总体而言，持油能力大约是持水力的 2 倍，可能是马铃薯蛋白具有高疏水性，导致其脂质吸附能力更高，这是其持油能力显著高于持水能力的根本原因。

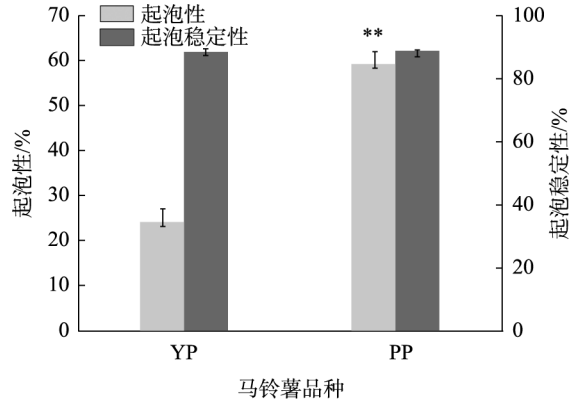


图 5　不同品种蛋白的起泡性和起泡稳定性

Fig.5　Foaming property and foaming stability of proteins from different varieties

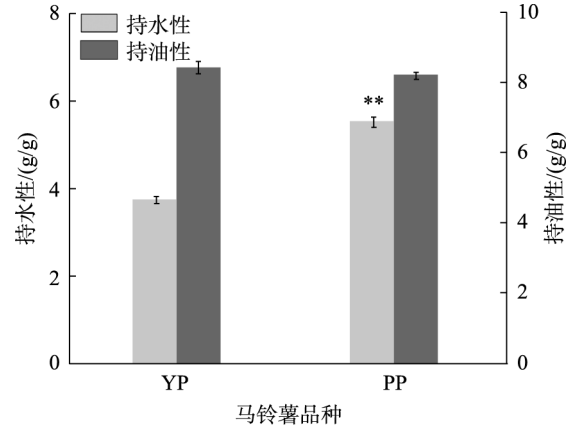


图 6　不同品种蛋白的持水性和持油性

Fig.6　Water holding capacity and oil holding capacity of proteins from different varieties

2.6　氨基酸组成分析

氨基酸组成及含量如表 1 所示。结果显示，两种蛋白中含量最高的是谷氨酸和天冬氨酸，这与大多数植物蛋白相似[29]。其次为亮氨酸、赖氨酸。其中，YP 必需氨基酸含量为 83.323 mg/g，显著高于 PP (70.954 mg/g) (P<0.05)；非必需氨基酸含量为 115.707 mg/g，极显著高于 PP (98.739 mg/g) (P<0.01)，说明 YP 更具营养价值[30]。此外，PP 和 YP 的芳

香族氨基酸/支链氨基酸比例分别高达 64.5%、62.6%, 有助于更好地维持蛋白质稳态和肌肉代谢[31]。两种蛋白均富含酸性氨基酸, 这一特征使其具备了酸性蛋白的特征。YP 疏水性氨基酸含量为80.895 mg/g, 显著高于PP (67.987 mg/g) (P<0.05), 这可能是 PP 溶解度优于 YP 的原因之一。

表 1 不同品种蛋白的氨基酸组成(mg/g, n=3)
Table 1 Amino acid composition of proteins from different varieties (mg/g, n=3)

氨基酸	PP	YP
苏氨酸	9.343±0.245	10.616±0.184
蛋氨酸	3.533±0.311	4.143±0.156
异亮氨酸	7.975±0.312	9.354±0.247
亮氨酸	14.067±0.074	16.826±0.282
苯丙氨酸	10.152±0.078	11.724±0.293
赖氨酸	13.024±0.140	14.988±0.336
组氨酸	4.382±0.274	5.660±0.334
缬氨酸	8.481±0.262	10.012±0.378
必需氨基酸总量	70.954	83.323*
天冬氨酸	18.273±0.276	21.808±0.263
丝氨酸	9.550±0.333	9.914±0.369
谷氨酸	21.804±0.165	26.113±0.147
甘氨酸	7.319±0.123	8.515±0.304
丙氨酸	7.976±0.335	9.588±0.288
酪氨酸	9.551±0.332	10.955±0.104
精氨酸	11.745±0.193	14.224±0.150
脯氨酸	8.487±0.261	10.733±0.300
胱氨酸	4.037±0.162	3.857±0.203
非必需氨基酸总量	98.739	115.707**
酸性氨基酸	40.076	47.921
碱性氨基酸	29.151	34.872
亲水性氨基酸	32.481	35.342
疏水性氨基酸	67.987	80.895*
芳香族氨基酸	19.703	22.679
支链氨基酸	30.523	36.192

注: 酸性氨基酸: 谷氨酸、天冬氨酸; 碱性氨基酸: 赖氨酸、精氨酸、组氨酸; 亲水性氨基酸: 丝氨酸、苏氨酸、胱氨酸、酪氨酸; 疏水性氨基酸: 甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、脯氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸; 芳香族氨基酸: 酪氨酸、苯丙氨酸; 支链氨基酸: 异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸[28]。*表示不同品种间差异显著(P<0.05), **表示不同品种间差异极显著(P<0.01)。

3 结 论

蛋白的功能特性是影响其在食品加工中应用的主要因素。通过对紫皮马铃薯和黄皮马铃薯淀粉加工尾水蛋白的功能特性及理化特性进行研究, 结果发现, PP 平均粒径较小, 表面电荷密度较大; 具有优异的水溶性、起泡性、乳化稳定性、持水性, 适合作为发泡剂、保水剂或嫩化剂类原料应用于食品加工业; PP 和 YP 都具有较高的持油性, 适合添加至高脂食品中。而 YP 的氨基酸、必需氨基酸和非必需氨基酸含量较高, 更适用于作为营养补充剂应用在食品工业, 可通过适当改性(如物理、化学和酶法等)来改善其部分功能特性, 扩展应用场景。但本研究只对比了不同品种蛋白部分功能、理化特性, 后续可完善其他功能和结构特性研究, 并进行相关性分析, 以期全面系统的揭示品种差异对蛋白特性的影响。

参考文献

[1] 李佳琪, 雷一铭, 毕晟赟, 等. 不同 pH 对马铃薯蛋白理化性质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(5): 246–254.
Li Jiaqi, Lei Yiming, Bi Shengyun, et al. Effects of different pH on the physicochemical properties of *Solanum tuberosum L*. protein [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(5): 246–254.

[2] 曾凡逵, 胡肖业, 吕黄珍, 等. 中外马铃薯加工业的比较分析[J]. 中国马铃薯, 2024, 38(6): 513–529.
Zeng Fankui, Hu Xiaoye, Lv Huangzhen, et al. Comparison analysis of potato processing industry in China and foreign countries [J]. Chinese Potato Journal, 2024, 38(6): 513–529.

[3] Wang Zhaojun, Liu Hong, Zeng Fankui, et al. Potato processing industry in China: current scenario, future trends and global impact [J]. Potato Research, 2023, 66(2): 543–562.

[4] 孔令知. 复凝聚法回收淀粉加工废水中蛋白质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015, 1.
Kun Lingzhi. Study on recovering proteins from starch processing waste water by complex coacervation [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015: 1.

[5] 马丞鸿, 张树林, 丛方地, 等. 絮凝法回收马铃薯淀粉废水中蛋白质的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(23): 113–117.
Ma Chenghong, Zhang Shulin, Cong Fangdi, et al. Study progress on the recovery of proteins from potato starch wastewater by flocculation [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(23): 113–117.

[6] 孙红娟, 贠建民, 颜东方, 等. 气浮—絮凝—厌氧好氧处理马铃薯淀粉废水工艺探索[J]. 农产品加工, 2012, 12(301): 20–28.
Sun Hongjuan, Yun Jianmin, Yan Dongfang, et al. Potato starch wastewater treatment technology of gasfloatation-flocculation-anoxia-oxidation combination [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012, 12(301): 20–28.

[7] 左金龙, 任进, 姜黎明, 等. 马铃薯淀粉废水处理现状及资源化利用[J]. 应用化工, 2024, 53(9): 2181–2186.
Zuo Jinlong, Ren Jin, Jiang Liming, et al. Treatment status and resource utilization of potato starch wastewater [J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(9): 2181–2186.

[8] Hu Chun, He Yang, Zhang Weinong, *et al*. Potato proteins for technical applications: nutrition, isolation, modification and functional properties-a review [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 91: 12.

[9] Bhutto R A, Bhutto N U A H, Khanal S, et al. Potato protein as an emerging high-quality: Source, extraction, purification, properties

(functional, nutritional, physicochemical, and processing), applications, and challenges using potato protein [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110415.

[10] Rachel L, Zoya O, Maya P D, et al. Utilization of high-pressure homogenization of potato protein isolate for the production of dairy-free yogurt-like fermented product [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113(5): 106442.

[11] 顾文芬, 曾凡逵, 程锦春. 超滤法从马铃薯淀粉加工分离汁水中回收蛋白质的研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(3): 131–136.
Gu Wenfen, Zeng Fankui, Cheng Jinchun. Study on the protein recovery from potato starch processing water by ultrafiltration [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(3): 131–136.

[12] Guo Junyuan, Liu Jianying, Yang Yijin, et al. Fermentation and kinetics characteristics of a bioflocculant from potato starch wastewater and its application [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 356–362.

[13] Zwijnenberg H J, Kemperman A J B, Boerrigter M E, et al. Native protein recovery from potato fruit juice by ultrafiltration [J]. Desalination, 2002, 144(1): 331–334.

[14] 任琼琼, 陈丽清, 韩佳冬, 等. 马铃薯淀粉废水中蛋白质的提取研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(14): 284–287.
Ren Qiongqiong, Chen Liqing, Han Jiadong, et al. Research of protein extracting from potato starch waster-water [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(14): 284–287.

[15] Peng Hui, Wang Qian, Zhang Yanli, et al. Novel eco-friendly extraction of oat bran protein: a multifaceted analysis of structure, physicochemical, and functional properties [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172(p3): 112165.

[16] 王娣, 彭春秀, 付毫, 等. 超高压处理对核桃蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 39–49.
Wang Di, Peng Chunxiu, Fu Hao, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the structural and functional properties of walnut protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 39–49.

[17] 张倩, 郭兴凤, 朱婷伟, 等. 提取方法对小麦胚芽蛋白结构、组成及功能特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2026, 34(1): 1–9.
Zhang Qian, Guo Xingfeng, Zhu Tingwei, et al. Effect of extraction methods on the structure, composition and functional properties of wheat germ proteins [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2026, 34(1): 1–9.

[18] 陈卓, 陈会民, 李倩文, 等. 超声联合 pH 值偏移处理对马铃薯蛋白功能和结构特性的影响及相关性分析[J]. 食品科学, 2025, 46(12): 258–266.
Chen Zhuo, Chen Huimin, Li Qianwen, et al. Effect of ultrasonic treatment combined with pH shift on functional and structural properties of potato proteins and correlation analysis between them [J]. Food Science, 2025, 46(12): 258–266.

[19] 田凤珠, 李丹, 左锋, 等. pH 驱动法改善米糠蛋白溶解特性[J/OL]. 食品工业科技, 1-13. [2026-07-24]. https: //doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080137.
Tian Fengzhu, Li Dan, Zuo Feng, et al. Enhancement of rice bran protein solubility via pH-driven modification [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1-13. [2026-07-24]. https: //doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025080137.

[20] 何荣军, 李佳炜, 杨雨, 等. 食叶草碱溶酸沉蛋白质的理化性质及功能特性研究[J]. 发酵科技通讯, 2025, 54(2): 63–69.
He Rongjun, Li Jiawei, Yang Yu, et al. Physicochemical and functional properties of alkaline extraction-acid precipitation proteins of edible dock [J]. Bulletion of Fermentation Science and Technology, 2025, 54(2): 63–69.

[21] 王晨曦, 夏志远, 刘鹏飞, 等. 琥珀酸酐改性对甘薯蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(11): 37–44.
Wang Chenxi, Xia Zhiyuan, Liu Pengfei, et al. Effect of succinic anhydride modification on structural and functional properties of sweet potato protein [J]. Food Research and Development, 2025, 46(11): 37–44.

[22] Li Xiaotian, Luo Tao, Wang Luanfeng, et al. Emulsifying properties of wheat germ protein: effect of different ultrasonic treatment [J]. Ultrasonics sonochemistry, 2023, 98: 106479.

[23] Tushir S, Yadav D N, Kapoor R K, et al. Low temperature desolventization: effect on physico-chemical, functional and structural properties of rice bran protein [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 61(3): 516–527.

[24] Yalcin E, Sakiyan O, Sumnu G, et al. Functional properties of microwave-treated wheat gluten [J]. European Food Research and Technology, 2008, 227(5): 1411–1417.

[25] Immonen M, Chandrakusuma A, Hokkanen S, et al. The effect of deamidation and lipids on the interfacial and foaming properties of ultrafiltered oat protein concentrates [J]. LWT, 2022. DOI: 10.10 16/j. lwt.2022.114016.

[26] Zhong Lei, Ma Ning, Wu Yiliang, et al. Characterization and functional evaluation of oat protein isolate-*Pleurotus ostreatus* *β*-glucan conjugates formed via Maillard reaction [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 87. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.08.034.

[27] Hojilla-Evangelista M P, Evangelista R L, Wu Y V. Characterization of milkweed (*Asclepia* spp.) seed proteins [J]. Industrial Crops & Products, 2009, 29(2-3): 275–280.

[28] Deng Yejun, Huang Lixin, Zhang Caihong et al. Physicochemical and functional properties of Chinese quince seed protein isolate [J]. Food Chemistry, 2019, 283(15): 539–548.

[29] 李琳, 金丽娜, 郭佩佩, 等. 富硒小米蛋白的理化性质, 功能特性及结构研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(3): 259–267.
Li Lin, Jin Lina, Guo Peipei, et al. Physicochemical properties, functional characteristics, and structure of seleniumen-riched millet protein [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(3): 259–267.

[30] Jiang Xinyu, Gao Feng, Ma Yongliang, et al. Protein from tiger nut meal extracted by deep eutectic solvent and alkali-soluble acid precipitation: a comparative study on structure, function, and nutrition [J]. Food Chemistry, 2024(15): 452.

[31] Herman M A, She P, Peroni O D, et al. Adipose tissue branched chain amino acid (BCAA) metabolism modulates circulating BCAA levels [J]. Journal of Biological Chemistry, 2010, 285(15): 11348–11356.

(责任编辑：韩晓红　蔡世佳)