刘璇, 刘永辰, 张佳敏, 等. 不同提取部位山桐子蛋白的理化及功能特性比较 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 43−53. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050176

LIU Xuan, LIU Yongchen, ZHANG Jiamin, et al. Comparison of Physicochemical and Functional Properties of *Idesia polycarpa* Proteins from Different Extraction Sites[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 43−53. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050176

·特邀主编专栏—植物基食品原料基础研究、前沿技术创新及其健康绿色产品开发（客座主编：于寒松、张健、李健）·

不同提取部位山桐子蛋白的理化及功能特性比较

刘　璇[1,2,3], 刘永辰[1], 张佳敏[1], 张　静[1], 姜瞻梅[1], 冯红霞[2,3], 宋明发[2,3], 侯俊财[1,2,3,*], 常云鹤[2,3,*]

（1.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;
2.国家林业草原山桐子加工与综合利用工程技术研究中心, 贵州贵阳 550005;
3.贵阳学院食品科学与工程学院, 贵州贵阳 550005）

摘　要: 本研究对比分析了山桐子全果蛋白（*Idesia polycarpa* whole fruit protein，IPWP）、山桐子果皮蛋白（*Idesia polycarpa* pericarp protein，IPPP）和山桐子种子蛋白（*Idesia polycarpa* seed protein，IPSP）的理化性质及功能特性，旨在揭示不同提取部位山桐子蛋白性质的差异，并与市售大豆分离蛋白（Soybean protein isolate，SPI）对比，探究山桐子蛋白的应用潜力。研究发现：IPSP 的蛋白含量（69.13%±0.61%）及总氨基酸含量显著高于 IPWP 和 IPPP（P<0.05）；三种山桐子蛋白均呈孔隙结构，分子量范围均小于 45 kDa，其中 IPSP 结构最为舒展，18.4 kDa 亚基含量最丰富；同一 pH 下，IPWP 与 IPSP 比 IPPP 具有更小的平均粒径及更高的 Zeta-电位绝对值和表面疏水性；三种山桐子蛋白在溶解度、起泡性及乳化性方面均优于 SPI。与 IPWP 和 IPPP 相比，IPSP 具备更强的溶解度、泡沫稳定性、乳化性及乳化稳定性，尤其在 pH7 时，IPSP 的溶解度及乳化稳定性分别比 IPPP 增加了 79.47% 和 43.65%。综上对比，三种山桐子蛋白性能整体优于市售大豆蛋白，其中 IPSP 在蛋白组成及功能特性方面更具优势。本研究为山桐子功能性成分的高值化利用与开发提供基本的理论与技术支撑。

关键词: 山桐子蛋白, 不同部位, 理化特性, 功能特性

中图分类号: TS252.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0043−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050176　　本文网刊:

Comparison of Physicochemical and Functional Properties of *Idesia polycarpa* Proteins from Different Extraction Sites

LIU Xuan[1,2,3], LIU Yongchen[1], ZHANG Jiamin[1], ZHANG Jing[1], JIANG Zhanmei[1], FENG Hongxia[2,3], SONG Mingfa[2,3], HOU Juncai[1,2,3,*], CHANG Yunhe[2,3,*]

（1.College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;
2.Engineering Technology Research Center for Processing and Comprehensive Utilization of Idesia polycarpa of National Forestry and Grassland Administration, Guiyang 550005, China;
3.College of Food Science and Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China）

Abstract: In this study, the physicochemical and functional properties of *Idesia polycarpa* whole fruit protein (IPWP), *Idesia polycarpa* pericarp protein (IPPP), and *Idesia polycarpa* seed protein (IPSP) were compared. To reveal the differences in the properties of *Idesia polycarpa* proteins in different extraction sites, it was also compared with

收稿日期: 2025−05−21

基金项目: 贵州省科技重大专项项目（黔科合重大专项字 [2024]025）; 贵州省基础研究（自然科学）（黔科合基础-ZK[2023]）一般 017。

作者简介: 刘璇（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 乳品加工, E-mail: liuxuan1162@163.com。

*** 通信作者:** 侯俊财（1975−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 乳品加工, E-mail: houjuncai88@126.com。

常云鹤（1986−）, 男, 博士, 高级实验师, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: changyunhe1102@sina.com。

commercially available soybean protein isolate (SPI) to explore the potential of *Idesia polycarpa* protein application. It was found that the protein content (69.13%±0.61%) and total amino acid content of IPSP were significantly higher than those of IPWP and IPPP (P<0.05). The three *Idesia polycarpa* proteins all exhibited a porous structure, with molecular weights below 45 kDa, among which IPSP had the most extended structure and the highest content of the 18.4 kDa subunit. At the same pH, IPWP and IPSP showed smaller average particle size and higher absolute value of Zeta-potential and surface hydrophobicity than IPPP. The three *Idesia polycarpa* proteins demonstrated superior solubility, foaming capacity, and emulsifying activity compared to SPI. Compared with IPWP and IPPP, IPSP possessed enhanced solubility, foam stability, emulsification and emulsion stability, especially at pH7, the solubility and emulsion stability of IPSP increased by 79.47% and 43.65%, respectively, than those of IPPP. In summary, the performance of the three *Idesia polycarpa* proteins was better than that of the commercially available SPI. IPSP showed the greater advantages in protein composition and functional properties. This study would provide the basic theoretical and technical support for the high-value utilization and development of *Idesia polycarpa* functional components.

Key words: *Idesia polycarpa* protein; different parts; physicochemical properties; functional properties

山桐子(*Idesia polycarpa*)是一种含有油籽的雌雄异株落叶乔木,其产果期长、果实产量高[1]。该果实由果皮、果肉和种子构成,富含油脂(40.25%)、蛋白质(8.5%)、总黄酮(178.24 mg RE/g)、总多酚(133.62 mg GAE/g)等多种营养成分,同时含有钙(Ca)、磷(P)、氮(N)等微量元素[2],可用于动物饲料、果园施肥、化妆品等多种应用场景,且山桐子果实中富含维生素 E 及天然红色素,常用于制备保健品和天然食品添加剂中[3]。此外,不同生长时期以及不同生长部位的山桐子所含营养成分含量存在差异[4],这种差异为山桐子的多元化利用提供了科学依据。

目前,国内外对山桐子的研究大多集中在生态学、栽培和育种方面[5];在食品领域,关于山桐子的研究多聚焦于油脂提炼及其营养品质分析方面[6],另有学者从山桐子果实中分离出苦味化合物,阐明了其苦味形成机制[7],还有研究发现山桐子果实中酚类化合物具有抗炎活性[8]。然而,山桐子蛋白的研究尚处于起步阶段,多数仍停留在果实中蛋白成分的含量测定、提取工艺优化与基础性质表征层面:闻乐嫣等[9]在研究两品种山桐子干果(重庆 1 号、重庆 2 号)的不同部位的成分差异时发现,重庆 1 号果肉中蛋白含量最高,重庆 2 号种子中蛋白含量最高;杨静等[10]测得毛叶山桐子粕中粗蛋白含量可高达 12.92%;还有研究[11]通过超声辅助三相萃取技术对山桐子粕中的脂肪、蛋白质和多糖进行同时提取,虽确定了最佳提取条件,其中山桐子蛋白提取率为 5.03%,但仅分析了其氨基酸组成;Fan 等[12]对山桐子果实中不饱和脂肪酸酶(IpFAD2)的基因型进行了克隆和表达分析,表征发现 IpFAD2 分子量为 44.03 kDa,等电点为 8.04,其二级结构由 α-螺旋、β-折叠、β-转角及无规则卷曲构成。Dou 等[13]采用超滤-色谱法从山桐子粕中分离纯化出具有抗氧化能力的肽;Yang 等[14]以山桐子蛋白为基材,制备了具有生物活性功能的新型食品包装材料,用于包裹和延长甜樱桃的采后货架期。尽管山桐子蛋白研究已取得阶段性进展,但仍存在显著不足:目前尚缺乏对山桐子蛋白理化及功能特性的系统性研究,不同部位山桐子蛋白的特性差异也未得到充分揭示,这极大限制了其在食品工业和生物医药领域的应用潜力。

近年来,传统植物蛋白开发高度集中于豆类[15]及谷物类[16]原料,但这类蛋白具有一定局限性,例如,玉米醇溶蛋白存在必需氨基酸失衡问题(缺乏赖氨酸)[17],大豆蛋白制品中常伴有豆腥、苦涩等不良风味[18]。而新兴优质蛋白(藜麦、奇亚籽、杏仁、微藻等蛋白)虽在营养特性及功能特性上优于传统植物蛋白[19−20],但因生长条件严苛导致其原料产量受限,难以对其实现大规模持续开发。在此背景下,山桐子作为一种非粮型高产植物,其蛋白资源具备独特开发价值:一方面,可拓宽植物蛋白原料来源,缓解传统豆类、谷物蛋白的应用局限;另一方面,其生长适应性强、产量高,符合可持续食品体系的发展需求。目前来看,尽管已有学者对山桐子蛋白的提取及表征进行了初步探究,但其理化、功能特性等潜在优势尚未被挖掘,且不同部位蛋白的差异化特征可能为山桐子的多元应用提供新方向。基于此,本研究通过对比分析不同部位(全果、果皮、种子)山桐子蛋白的组成成分、理化特性及功能性质,同时与市售大豆蛋白对比,旨在揭示山桐子蛋白的独特优势,探究其在食品领域替代传统蛋白的应用潜力,为山桐子的高值化利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

山桐子干果 贵州省仁怀市新华丰农业发展有限公司;大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI)纯度 88.2%,上海源叶生物科技有限公司;大豆油 中国粮油食品有限公司;8-苯胺基-1-萘磺酸(ANS)、β-巯基乙醇、十二烷基硫酸钠(SDS) 均购自 Sigma 公司;本研究采用的其余化学试剂均为分析纯级别。

XH-300A+型超声微波组合合成仪 上海新仪微波化学科技公司;H1750R 型高速冷冻离心机 湖南湘仪离心机仪器有限公司;DYY-6C 型电泳仪 北京六一生物科技有限公司;杜马斯定氮仪 德国元

素公司；T-18 高速分散器　德国 IKA 公司；S-3400N 钨灯丝扫描电子显微镜、LA8080 氨基酸分析仪、F-7100 荧光分光光度计　日本日立公司；LGJ-18 真空冷冻干燥机　北京松源华兴科技发展有限公司；GelDoc EZ 全自动免染凝胶成像分析系统　美国 bio-rad 公司；纳米粒度及 Zeta 电位分析仪　马尔文帕纳科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　脱脂山桐子粉的制备

1.2.1.1　工艺流程　山桐子干果→预处理→粉碎→溶剂脱脂搅拌→离心→沉淀→风干→过筛→脱脂山桐子粉。

1.2.1.2　操作要点　挑选形态饱满、色彩均匀的山桐子干果，摘除果梗后获得全果，将全果轻微碾压破碎，人工分离果皮与种子。随后分别对全果、果皮和种子进行粉碎处理，各取上述样品与石油醚按料液比 1∶5（g/mL）混合于密闭烧杯中，常温下充分搅拌 2 h，以 4000 r/min 离心 10 min 后分别收集上清液和沉淀，该过程重复 3 次并全程于通风橱内进行。合并三次脱脂后的上清液，通过真空旋转蒸发仪回收溶剂，将离心与回收溶剂后的沉淀合并，置于通风橱自然风干，过 60 目筛后干燥保存，即为脱脂的全果、果皮和种子山桐子粉。

1.2.2　山桐子蛋白的制备

1.2.2.1　工艺流程　山桐子脱脂粉→溶解→碱性条件下微波提取→离心→上清液→酸沉→离心→水洗沉淀→冷冻干燥→山桐子蛋白。

1.2.2.2　操作要点　称取上述脱脂后的全果、果皮、种子山桐子粉，分别按照料液比 1∶10（g/mL）加入去离子水分散，用 1 mol/L NaOH 溶液将分散液 pH 调至 13.0，并置于冰水浴中，设置微波参数为恒温 50 ℃，微波辅助碱溶提取 1 h，8000 r/min 离心 20 min，收集上清液并用 1 mol/L HCl 溶液调节 pH 至 3.2 进行酸沉，然后 8000 r/min 离心 20 min，取沉淀水洗 3 次，将不溶物真空冷冻干燥，即得到山桐子全果蛋白（*Idesia polycarpa* whole fruit protein, IPWP）、山桐子果皮蛋白（*Idesia polycarpa* pericarp protein, IPPP）和山桐子种子蛋白（*Idesia polycarpa* seed protein, IPSP）。

1.2.3　基本成分测定

1.2.3.1　蛋白、水分、灰分含量测定　蛋白含量测定参照国家标准 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》[21] 中燃烧法；水分含量测定参照国家标准 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》[22] 中直接干燥法；灰分含量测定参照国家标准 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》[23]。

1.2.3.2　总糖含量的测定　根据 Chen 等[24] 的方法稍作修改，采用硫酸-苯酚法测定总糖含量。准备 1 mg/mL 山桐子蛋白溶液，将 1 mL 蛋白溶液与 1 mL 6% 苯酚混合均匀，缓慢加入 5 mL 浓硫酸，立即涡旋混匀 30 s，室温避光反应 10 min 后，冷却至室温，测定 490 nm 处吸光度。以葡萄糖为标准溶液（0~0.2 mg/mL）作标准曲线（y=5.0306x+0.0942，R^2=0.9954），通过标曲计算总糖含量。

1.2.3.3　总酚含量的测定　根据 Idowu 等[25] 的方法稍作修改测定总酚含量。称取 0.25 g 山桐子蛋白，加入 5 mL 60% 乙醇溶液，设置超声功率为 100 W，采用超声 2 s 停 3 s 的间隔模式辅助提取 30 min，超声过程中维持体系温度在 25 ℃ 左右，6000 r/min 离心 15 min，上清液即为待测液。将 1 mL 上清液与 0.5 mL 10% 福林酚试剂混合均匀，静置 1 min，再加入 1.5 mL 20% 碳酸钠溶液，去离子水定容至 10 mL，70 ℃ 下避光反应 1 h，冷却至室温后，测定 765 nm 波长处吸光度。以没食子酸标准溶液（0~1.0 mg/mL）作标准曲线（y=5.1801x+0.1094，R^2=0.9950），通过标曲计算总酚含量。

1.2.3.4　总黄酮含量的测定　根据 Ivanović等[26] 的方法稍作修改测定总黄酮含量。按照总酚测定方法制得待测液，移取 1.2 mL 待测液，加入 3.8 mL 60% 乙醇溶液和 0.3 mL 5% 亚硝酸钠溶液，充分混匀后静置 8 min，再加入 0.3 mL 10% 硝酸铝溶液和 4.0 mL 氢氧化钠溶液，用 60% 乙醇溶液定容至 10 mL，静置反应 12 min，于 510 nm 处测定吸光值。以芦丁为标准品（0~1.0 mg/mL）作标准曲线（y=1.0042x+0.0444，R^2=0.9992），通过标曲计算总黄酮含量。

1.2.4　氨基酸组成的测定　根据酸水解法测定蛋白质样品的氨基酸组成。向包含蛋白含量约 30 mg 的蛋白质样品中加入 10 mL 6 mol/L 的盐酸，用氮吹装置置换溶液中的空气 30 min，然后将溶液在 110 ℃ 下加热 23 h，冷却至室温后定容至 50 mL 得到水解液，摇匀后取出部分水解液过膜进行氮吹干燥，干燥后的氨基酸用 0.02 mol/L 的盐酸复溶，再用 0.22 μm 的滤膜过滤到液相进样瓶中待测。用氨基酸分析仪进行分析，设置自动进样器温度 4 ℃，进样体积 20 μL，用茚三酮进行柱后衍生后，在 570 nm 处检测氨基酸。结果表示为 g/100 g，并与联合国粮食及农业组织（FAO/WHO）推荐的氨基酸评分模式进行比较。

1.2.5　SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳（SDS-PAGE）　参照 Shi 等[27] 的方法稍作修改，使用 SDS-PAGE 分析蛋白质样品的分子量。取适量蛋白质样品溶于去离子水配成 7 mg/mL 的蛋白溶液，将蛋白溶液分别与非还原上样缓冲液（不含 β-巯基乙醇）及还原上样缓冲液（含 β-巯基乙醇）以 1∶4 的体积比混合均匀，然后沸水浴 5 min，随后冷却。将混合溶液和 14.4~116 kDa 的 Maker（上样体积均为 6 μL）加到凝胶（12% 分离胶）上样孔中，设置电泳电压为恒压 150 V。电泳结束后，将凝胶用考马斯亮蓝 R-250 染色 15~

30 min, 染色完成用脱色液(冰醋酸:甲醇:去离子水=1:1:8)反复脱色直至条带清晰可见。

1.2.6 表面疏水性的测定 参照 Li 等[28] 的方法, 以 ANS 荧光探针法测定蛋白样品的表面疏水性。准备 1 mg/mL 的蛋白溶液(pH 分别为 4、7、9、11), 用 PBS 缓冲液将其依次稀释成 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL 浓度的样品溶液。吸取 5 mL 样品溶液, 加入 8 mmol/L ANS 试剂 25 μL, 漩涡混匀后, 室温下避光反应 15 min, 用荧光分光光度计检测其荧光强度, 设置检测参数为激发波长(EX)390 nm, 发射波长(EM)470 nm, 狭缝宽度 2.5 nm, 电压 550 V, 以蛋白浓度为横坐标, 测得的荧光强度为纵坐标, 得到的初始斜率即为样品的表面疏水性(H_0)。

1.2.7 平均粒径及 Zeta-电位的测定 将蛋白溶液(pH 分别为 4、7、9、11)稀释至浓度为 1 mg/mL, 使用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪测定蛋白样品的平均粒径及 Zeta-电位。测定前, 设置仪器平衡温度为 25 ℃, 测定样品平均粒径时, 设置仪器平衡时间为 30 s, 测定 Zeta-电位时设置仪器平衡时间为 120 s。

1.2.8 扫描电子显微镜(SEM) 采用钨灯丝扫描电子显微镜观察蛋白质样品的微观结构。观察前将待观测的蛋白样品置于离子溅射仪中进行喷金处理, 在 5 kV 的电压下放大 500 倍和 5000 倍对样品进行微观结构的观察。

1.2.9 溶解度的测定 根据 Mohan 等[29] 的方法稍作修改测定蛋白质样品的溶解性。将蛋白质样品溶解在去离子水中至浓度为 2 mg/mL, 使用 1 mol/L HCl 或 1 mol/L NaOH 溶液将蛋白样品溶液 pH 调节至 4、7、9、11, 室温下搅拌 30 min, 并保持 1 h, 在 4 ℃ 下以 8000 r/min 离心 15 min。采用 BCA 试剂盒测定上清液中蛋白质含量, 按照如下计算公式计算溶解度:

$$溶解度(\%)=\frac{上清液中蛋白质含量}{总蛋白含量}\times 100 \quad 式(1)$$

1.2.10 起泡性及泡沫稳定性的测定 根据 GarcÍa 等[30] 的方法稍作修改测定蛋白质样品的起泡性(Foam capacity, FC)和泡沫稳定性(Foam stability, FS)。取浓度为 2 mg/mL 的蛋白溶液(pH 分别为 4、7、9、11)于量筒中, 记录初始溶液体积, 使用高速均质机以 12000 r/min 的速度均质蛋白溶液 1 min。均质后, 分别在 0 min 和 30 min 时读数。按如下计算公式计算起泡性和泡沫稳定性:

$$FC(\%)=\frac{V_0-V}{V}\times 100 \quad 式(2)$$

$$FS(\%)=\frac{V_t-V}{V_0-V}\times 100 \quad 式(3)$$

式中: V 为均质前的体积, mL; V_0 为均质后 0 min 的体积, mL; V_t 为静置 30 min 后的体积, mL。

1.2.11 乳化性及乳化稳定性的测定 根据 Souza 等[31] 的方法稍作修改测定蛋白质样品的乳化性(Emulsifying activity index, EAI)和乳化稳定性(Emulsifying stability index, ESI)。准备浓度为 2 mg/mL 的蛋白样品溶液(pH 分别为 4、7、9、11), 使用高速均质机将 10 mL 大豆油与 30 mL 蛋白质溶液混合, 以 10000 r/min 的速度均质 1 min。混匀后, 立即将从容器底部获得的 50 μL 乳液加入 5 mL 0.1% SDS 溶液中, 混匀, 在 500 nm 处测吸光值。室温静置 10 min 后, 将从容器底部获得的 50 μL 乳液加入 5 mL 0.1% SDS 溶液中, 混匀, 在 500 nm 处测吸光度, 0.1% SDS 为对照。按如下计算公式计算乳化活性指数和乳化稳定性指数:

$$EAI(m^2/g)=2T\frac{A_0\times N}{\varphi\times L\times C\times 10000} \quad 式(4)$$

$$ESI(min)=\frac{A_0\times 10}{A_0-A_{10}} \quad 式(5)$$

式中: N 为稀释因子; T 为常数 2.303; L 为光学直径 1 cm; φ 为油体积分数为 0.25; C 为蛋白质溶液的初始浓度为 2 mg/mL; A_0 和 A_{10} 分别指乳液在 0 和 10 min 时的吸光度值。

1.3 数据处理

实验数据以平均值±标准偏差(n=3)表示, 采用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件进行显著性分析(ANOVA), 通过 Duncan 多重比较评估各个平均值之间的差异显著性, 显著性水平设定为 $P<0.05$, 并以不同字母标注。使用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 理化特性分析

2.1.1 基本成分 表 1 和图 1 分别为不同部位山桐子蛋白的基本成分及样品实物图。由表 1 可以看出, 不同部位山桐子蛋白的基本成分存在差异。其中, IPWP 的蛋白含量为 56.57%±0.27%, 其总酚、总黄酮含量显著低于 IPSP($P<0.05$); IPPP 的蛋白含量最低, 仅为 47.59%±0.24%, 但其总糖和灰分含量显著

表 1 不同部位山桐子蛋白基本成分

Table 1 Proximate composition of proteins from different parts of *Idesia polycarpa*

样品	蛋白质(%)	总糖(%)	灰分(g/100 g)	水分(g/100 g)	总酚(mg/g)	总黄酮(mg/g)
IPWP	56.57±0.27^b	16.52±0.13^b	4.35±0.29^b	5.62±0.34^a	26.96±0.08^b	72.21±2.19^b
IPPP	47.59±0.24^c	21.50±0.42^a	8.58±0.40^a	3.73±0.22^b	27.47±0.47^b	53.46±1.36^c
IPSP	69.13±0.61^a	7.95±0.40^c	2.66±0.35^c	3.50±0.09^b	28.41±0.36^a	95.88±2.46^a

注: 数值用平均值±标准差表示, 不同字母表示同一列数据差异显著($P<0.05$)。

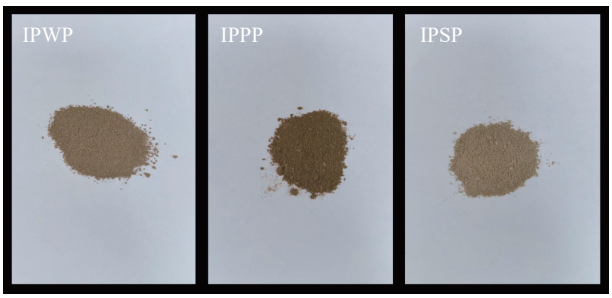


图 1　IPWP、IPPP 和 IPSP 实物图

Fig.1　Picture of IPWP, IPPP and IPSP

高于其他两种蛋白（P<0.05），从成分组成角度来看，IPPP 因非蛋白组分占比较高，故山桐子果皮部位不适宜作为蛋白提取的最佳部位；三种蛋白中 IPSP 的蛋白含量最高，可达 69.13%±0.61%，且其总糖、灰分和水分等非蛋白组分含量处于最低水平，同时其总酚和总黄酮含量显著高于 IPWP 和 IPPP（P<0.05），表明 IPSP 在蛋白质含量以及酚类、黄酮类功能性成分的富集方面具有突出优势。从图 1 中可以看出，三种山桐子蛋白的颜色存在差别，具体表现为：IPPP 颜色最深，IPWP 与 IPSP 的颜色依次变浅。综合组成成分及颜色特征，IPSP 因蛋白含量高、样品颜色浅，更适于作为蛋白基料应用于食品工业中。上述不同部位山桐子蛋白在组成成分上的差异，为其针对性的定向开发利用提供了参考依据。

2.1.2　氨基酸组成　氨基酸组成是决定蛋白质质量的关键参数[32]，依据氨基酸分析结果，一定程度上可反映出蛋白质的理化及功能特性[33]。如表 2 所示，三种山桐子蛋白的氨基酸组成存在显著差异（P<0.05），IPWP、IPPP、IPSP 的总氨基酸含量分别约为 38.36±2.05、21.73±1.56、56.69±2.45 g/100 g。所有山桐子蛋白样品中的主要氨基酸为谷氨酸（3.39~12.70 g/100 g），其次为天冬氨酸（3.01~7.01 g/100 g）、亮氨酸（2.13~4.99 g/100 g）和缬氨酸（1.66~4.01 g/100 g），但其含硫氨基酸（如半胱氨酸）含量较低[34]，这一结果与其他大多数谷物、豆类蛋白质的氨基酸组成类似[35]。且山桐子蛋白均含有 FAO/WHO（2007）要求的必需氨基酸，其中 IPSP 中必需氨基酸含量最高，其次是 IPWP，特别是亮氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸和异亮氨酸的含量最多，可以认为山桐子蛋白具有理想的营养特性，可以用作人的蛋白质补充剂[36]，是功能性食品的良好备选来源。山桐子蛋白中疏水性氨基酸含量（8.45~20.40 g/100 g）明显低于亲水性氨基酸含量（13.28~36.30 g/100 g），有研究表明[37]，蛋白质中亲水性氨基酸和疏水性氨基酸占总氨基酸的比例与蛋白质的溶解度息息相关，进而影响其乳化和发泡特性。

2.1.3　SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳（SDS-PAGE）分析　蛋白分子量大小与其功能特性直接相关[38]，通过非还原 SDS-PAGE 和还原 SDS-PAGE 可以分析 IPWP、IPPP、IPSP 的亚基分布（图 2）。整体而言，三种山桐子蛋白条带主要分布在 45 kDa 低分子量范围以下，且三者条带颜色存在显著差异。还原 SDS-PAGE 结果显示，IPWP、IPPP、IPSP 均呈现约三条清晰的特征条带，其分子量分别位于 35、18.4 kDa 附近及 14.4 kDa 以下的范围，参考豆类蛋白质亚基的分子量分布特征[39]，上述条带位置与 SPI 中 Vicilin 及 Legumin-β 亚基的特征分子量较为接近，由此推测山桐子蛋白中可能含有 7S 和 11S 球蛋白组分，但该推测仍需在后续研究中通过质谱鉴定等技术手段进一步验证。具体来看，三种山桐子蛋白均在 18.4 kDa 处表现出强条带，说明该分子量对应的蛋白亚基在山桐子蛋白中占比较高，该亚基可能属于球蛋白成分；接近泳道底端的条带，说明山桐子蛋白中可能含有小分子蛋白成分（其分子量低于 14.4 kDa）。对比 IPWP、IPPP、IPSP 的 SDS-PAGE 结果发现，IPWP 和 IPSP 在 18.4 kDa 处条带显色强度显著高于 IPPP，表明这两种蛋白中可能含有更多与 Legumin-β 类似的亚基，这可能与 IPWP 和 IPSP 中赖氨酸、精氨酸等碱性氨基酸含量较多有关；相比之下，IPPP 在 35、18.4 kDa 处条带强度最弱，说明 IPPP 中球蛋白含量明显低于 IPWP 和 IPSP。此外，观察非还原电泳结果可知，SPI 泳道的进样孔处存在明显深色残留，这可能是由于 SPI 中二硫键交联，使蛋白形成高分子量聚集体，导致其迁移受阻并截留于浓缩胶中[40]。对

表 2　不同部位山桐子蛋白氨基酸组成（g/100 g）

Table 2　Amino acid composition of proteins from different parts of *Idesia polycarpa* (g/100 g)

氨基酸种类	蛋白样品			FAO/WHO（成人）
	IPWP	IPPP	IPSP	
天冬氨酸	5.09±0.24^{b}	3.01±0.02^{c}	7.01±0.13^{a}	
苏氨酸	1.87±0.31^{a}	1.27±0.25^{b}	2.31±0.11^{a}	1.10
丝氨酸	2.33±0.04^{b}	1.42±0.05^{c}	3.32±0.04^{a}	
谷氨酸	7.62±0.15^{b}	3.39±0.23^{c}	12.70±0.31^{a}	
甘氨酸	2.35±0.30^{b}	1.41±0.23^{c}	3.22±0.32^{a}	
丙氨酸	2.42±0.08^{b}	1.39±0.11^{c}	3.29±0.13^{a}	
半胱氨酸	0.16±0.03^{b}	0.09±0.02^{c}	0.30±0.04^{a}	0.60
缬氨酸	2.88±0.11^{b}	1.66±0.13^{c}	4.01±0.15^{a}	1.50
蛋氨酸	0.82±0.03^{b}	0.37±0.01^{c}	1.69±0.12^{a}	1.60
异亮氨酸	2.27±0.15^{b}	1.39±0.04^{c}	3.08±0.12^{a}	1.50
亮氨酸	3.57±0.12^{b}	2.13±0.10^{c}	4.99±0.19^{a}	2.10
酪氨酸	1.70±0.23^{b}	1.09±0.13^{c}	2.22±0.31^{a}	2.10
苯丙氨酸	2.52±0.11^{b}	1.52±0.14^{c}	3.34±0.19^{a}	
赖氨酸	1.49±0.11^{a}	0.95±0.03^{b}	1.71±0.13^{a}	1.80
组氨酸	0.97±0.02^{b}	0.48±0.01^{c}	1.55±0.12^{a}	1.50
精氨酸	0.30±0.02^{b}	0.17±0.06^{b}	1.96±0.04^{a}	
总氨基酸	38.36±2.05^{b}	21.73±1.56^{c}	56.69±2.45^{a}	
必需氨基酸	16.38±0.96^{b}	9.76±0.71^{c}	22.68±1.13^{a}	
疏水性氨基酸	14.48±0.60^{b}	8.45±0.53^{c}	20.40±0.90^{a}	
亲水性氨基酸	23.88±1.45^{b}	13.28±1.03^{c}	36.30±1.55^{a}	
芳香族氨基酸	4.22±0.34^{b}	2.61±0.27^{c}	5.55±0.50^{a}	

注：“空白”表示“无此项”；数值用平均值±标准差表示，不同字母表示同一行数据差异显著（P<0.05）。

比还原与非还原条件下的 SDS-PAGE 结果发现，SPI 进样孔颜色在还原处理后变浅，而山桐子蛋白进样孔处显色强度未出现明显变化，表明山桐子蛋白并未因二硫键作用发生显著的蛋白聚集现象。

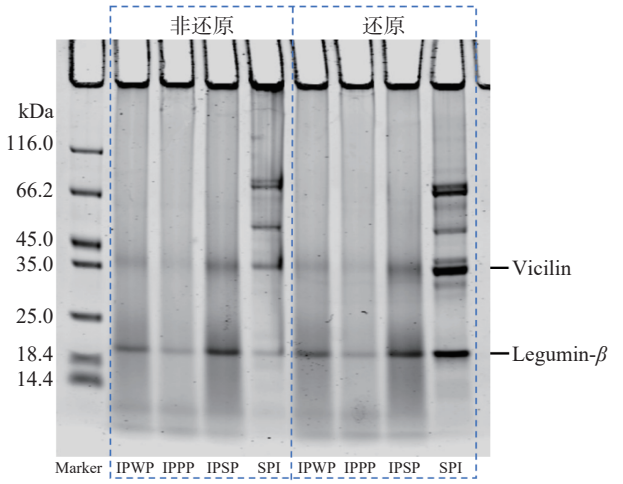


图 2 不同部位山桐子蛋白的非还原和还原 SDS-PAGE 结果

Fig.2 Non-reduced and reduced SDS-PAGE results of proteins from different parts of *Idesia polycarpa*

2.1.4 表面疏水性 表面疏水性是影响蛋白质功能特性的因素之一，与蛋白表面疏水残基的结构、含量和分布密切相关[41]。由图 3 可知，在相同 pH 条件下，三种山桐子蛋白的表面疏水性存在显著差异，具体表现为 IPSP>IPWP>IPPP（P<0.05），这可能与其疏水氨基酸含量不同有关（见表 2）。例如 pH7 时，IPWP 的表面疏水性为 208.79±10.64，IPPP 的表面疏水性最低，为 156.58±13.64，这可能是由于 IPPP 中疏水性氨基酸总含量较低造成的；IPSP 的表面疏水性显著高于 IPWP、IPPP 及 SPI（P<0.05），表明其蛋白结构具有更高的舒展性，促使更多的疏水区域暴露于蛋白表面[42]，进而表现出更强的表面疏水性。在不同 pH 条件下，三种山桐子蛋白的表面疏水性随着 pH 的增加而显著提高（P<0.05）。以 IPSP 为例，其在 pH7 时的表面疏水性约为 pH4时的 2 倍（P<0.05），这是可能是因为在碱性环境下，蛋白质的结构展开，蛋白质分子内部的疏水基团暴露在表面，更易与荧光探针 ANS 作用，使其表面疏水性增加。

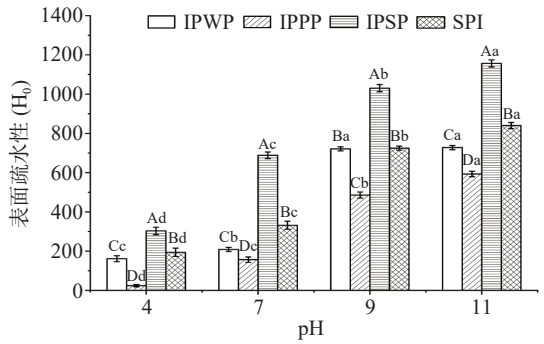


图 3 不同部位山桐子蛋白在不同 pH 条件下的表面疏水性

Fig.3 Surface hydrophobicity of proteins from different parts of *Idesia polycarpa* at different pH conditions

注：不同大写字母表示同一 pH 时不同蛋白样品之间差异显著（P<0.05），不同小写字母表示同一蛋白样品在不同 pH 时数据差异显著（P<0.05），图 4、图 6~图 8 同。

2.1.5 粒径及 Zeta-电位 蛋白质的平均粒径和 Zeta-电位与蛋白质的功能特性息息相关。本研究采用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪，测定了 IPWP、IPPP、IPSP 和 SPI 在不同 pH 下的平均粒径与 Zeta 电位，结果见图 4。

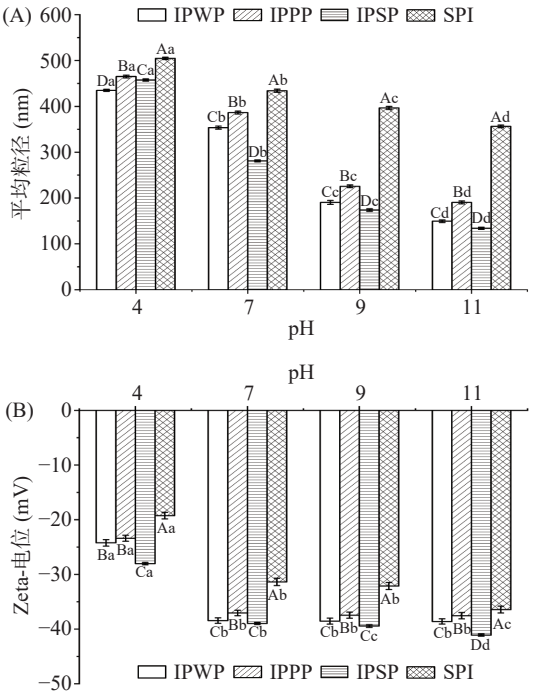


图 4 不同部位山桐子蛋白在不同 pH 条件下的平均粒径及 Zeta-电位

Fig.4 Average particle size and Zeta-potential of proteins from different parts of *Idesia polycarpa* at different pH conditions

平均粒径反映了蛋白质的聚集程度，由图 4A 可知，不同部位山桐子蛋白在相同 pH 下的平均粒径差异显著（P<0.05），且均小于 SPI。在 pH 为 7、9、11 时，三种山桐子蛋白的平均粒径表现为 IPSP<IPWP<IPPP（P<0.05），这可能与样品中总糖等非蛋白成分的含量差异有关。由表 1 可知，IPSP、IPWP、IPPP 中总糖含量依次升高，而已有研究表明[43]，糖类物质可通过氢键或静电相互作用与蛋白质结合形成复合物，从而造成样品颗粒体积增大，因此，总糖含量较高的 IPPP 可能因糖-蛋白复合物的形成而呈现更大的粒径；在 pH4 时，IPPP 的平均粒径仍然最大，但 IPSP 的粒径大于 IPWP。随着 pH 增加，三种山桐子蛋白的平均粒径逐渐降低（P<0.05），这可能是由于偏离蛋白等电点时，蛋白表面净电荷增加，抑制分子聚集，使样品粒径减小。这些变化可能会提高蛋白溶解性、增加蛋白向空气/油-水界面扩散的速度，使蛋白质表现出更好的界面特性[44]。

Zeta-电位绝对值的大小代表着蛋白在溶液体系中分散稳定性的高低，由图 4B 可知，在相同 pH 下，IPSP、IPWP、IPPP 的 Zeta 电位绝对值依次降低，且

均大于 SPI。其中 IPSP 电位绝对值显著高于 IPPP（P<0.05），这可能与 IPSP 中富含带负电的氨基酸有关[45]，由氨基酸结果（见表 2）可知，IPSP 中天冬氨酸和谷氨酸两种带负电的氨基酸总量大于 IPPP，使其表现出较高的电位绝对值，表明 IPSP 溶液的分散稳定性更好[46]。随着 pH 向碱性偏移，蛋白样品的 Zeta-电位值逐渐降低，这可能是因为当溶液 pH 高于蛋白质等电点时，蛋白分子中羧基解离程度增加[47]，表面负电荷增多，Zeta-电位值降低，从而表现为更高的 Zeta-电位绝对值。这一变化可使蛋白分子间静电斥力增强[48]，蛋白聚集减弱，从而提高蛋白质颗粒在溶液中的分散程度，使蛋白溶液更加稳定。

2.1.6　扫描电子显微镜（SEM）分析　图 5 展示了 IPWP、IPPP、IPSP 在不同放大倍数下的微观结构，由图可知，三种山桐子蛋白之间的微观结构存在显著差异。在 500 倍放大倍数下观察样品（图 5A~D），IPWP 呈现不规则块状结构，部分区域可见片状堆叠，边缘锐利，整体呈松散的聚集体状态；IPPP 以不规则片状结构为主，层叠排列紧密，片状物尺寸较大，局部可见断裂边缘；IPSP 以团块状颗粒为主，形状不规则，颗粒表面粗糙，可观察到部分凹陷，大小颗粒嵌套分布。商品化 SPI 因采用喷雾干燥工艺，呈现球状结构，与本研究中通过冷冻干燥获得的块状或片层状山桐子蛋白结构不同。

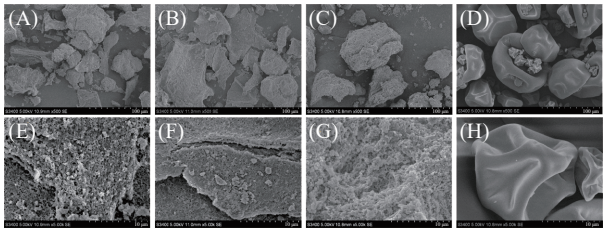


图 5　不同部位山桐子蛋白的微观结构

Fig.5　Microstructure of proteins from different parts of *Idesia polycarpa*

注：图（A）~（D）依次代表放大 500 倍的 IPWP、IPPP、IPSP、SPI 的 SEM 结果；图（E）~（H）依次代表放大 5 k 倍的 IPWP、IPPP、IPSP、SPI 的 SEM 结果。

进一步放大倍数至 5 k 观察样品（图 5E~H），可以发现，IPWP 表面为密集多孔的网状结构，孔隙大小不一，形成复杂三维网络，孔壁薄，显示出高度发达的孔隙体系，这可能与蛋白内部成分溶出有关。IPPP 以有序层状结构为主，层间界限清晰，表面有小孔，与 IPWP 的无序多孔结构形成鲜明对比。IPSP 表面粗糙，呈絮状交织结构，孔隙大且形状不规则，疏松度高。山桐子蛋白的这种孔隙结构可能有利于其泡沫性质及乳化性质等功能特性的改善。

2.2　功能特性分析

2.2.1　溶解度　溶解度是蛋白质重要的功能性质之一，其溶解性能受粒径大小、氨基酸组成以及 pH 等多种因素影响[49]。如图 6 所示，相同 pH 下，三种山桐子蛋白的溶解度均显著高于 SPI（P<0.05），其中 IPSP 溶解度最高，其次为 IPWP 和 IPPP，这一结果与蛋白样品的粒径大小呈负相关（见图 4A）。IPPP、IPWP、IPSP 的平均粒径依次减小，粒径减小会使蛋白颗粒比表面积增大，从而增强蛋白质与水之间的相互作用，使三种山桐子蛋白呈现不同的溶解度。此外，氨基酸种类及含量也会影响蛋白质溶解度。以 pH7 为例，IPSP 的溶解度最高，约为 83.51%±1.18%，比 IPWP 和 IPPP 的溶解度分别提高了约 24.40% 和 79.47%（P<0.05），这可能是因为 IPSP、IPWP 和 IPPP 三者的亲水性氨基酸含量依次减少（见表 2）。有研究表明，亲水性氨基酸（尤其天冬氨酸、谷氨酸）含量较高的蛋白质，与水分子的结合能力更强，因此通常具有更高的溶解度[50]。与 IPWP 和 IPPP 相比，IPSP 中的亲水性氨基酸含量占总氨基酸比例最多，故表现出最大的溶解度。

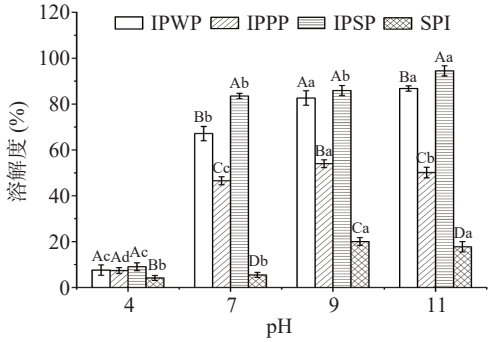


图 6　不同部位山桐子蛋白在不同 pH 条件下的溶解度

Fig.6　Solubility of proteins from different parts of *Idesia polycarpa* at different pH conditions

在不同 pH 条件下，三种山桐子蛋白质整体显示相似的溶解度规律，即随着溶液 pH 的增加，蛋白溶解度逐渐提高。在 pH 为 4 时，所有蛋白样品均展现出最低的溶解度，均低于 10%，这是由于该 pH 最接近四种蛋白的等电点，此时蛋白所带正负电荷量相当，净电荷接近为 0，蛋白质的静电相互作用导致蛋白易聚集[51]。当 pH 从 4 升至 7 时，IPWP、IPPP 和 IPSP 的溶解度均显著提高（P<0.05），这可能是因为蛋白质带有离子电荷，pH 的提高使静电排斥力增加，促进了蛋白聚集体的解离[52]，使不溶性聚集转变为可溶性聚集，蛋白样品的溶解度显著提高。

2.2.2　起泡性及泡沫稳定性　蛋白质的起泡性及泡沫稳定性是指快速搅打蛋白溶液时，蛋白质在气-液界面迅速扩散而形成一层薄膜气泡并维持气泡稳定的能力。蛋白质的发泡能力与其溶解度、粒径大小、表面电荷及表面疏水性等性质有关[53]。

如图 7A 所示，在相同 pH 下，山桐子蛋白的 FC 排序为 IPWP>IPPP>IPSP，且均显著高于 SPI（P<0.05）。蛋白质与盐离子的相互作用对其起泡性有重要影响[54]。有研究表明[55]，在低盐离子浓度体系中，盐离子可与蛋白中带相反电荷的氨基酸残基结合，削弱蛋白分子间的静电斥力，促使更多蛋白质分子在气-水界面吸附并形成薄膜，从而提升起泡性；但盐离

子浓度过高，会导致蛋白聚集，反而不利于其发挥起泡性。本研究中三种山桐子蛋白中灰分含量均处于较低水平（见表 1），其中 IPWP和 IPPP 灰分含量显著高于 IPSP，即可能 IPWP 和 IPPP 中无机盐成分更多，两者表现出更高的起泡性。在不同 pH 条件下，所有蛋白样品的起泡性变化规律一致，均为随着 pH 的增加而逐渐提高。在 pH4 时，IPWP、IPPP 和 IPSP 的 FC 均达到最低值，可能是由于接近蛋白质等电点，蛋白表面净电荷减少，阻止蛋白质扩散到气-液界面形成薄膜，起泡能力较差。与 pH4 相比，pH7 时三种蛋白的 FC 显著增加了 40%~50%（P<0.05），所有蛋白样品均在 pH11 时表现出最大起泡性，可能是由于随着 pH 的增加，蛋白平均粒径减小（见图 4A），有助于蛋白质分子更快地吸附到气-液界面，起泡性提高。这一结果也有可能与蛋白质溶解度的增加有关，高溶解度表明更多的可溶性蛋白质可以扩散到气-液界面并降低表面张力[56]，有助于泡沫的形成。

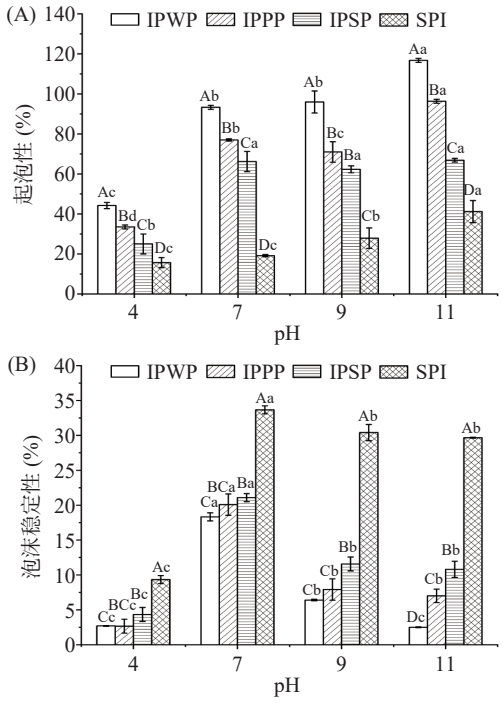


图 7 不同部位山桐子蛋白在不同 pH 条件下的起泡性（FC）和泡沫稳定性（FS）

Fig.7 FC and FS of proteins from different parts of *Idesia polycarpa* at different pH conditions

图 7B 展示了不同部位山桐子蛋白在不同 pH 处理下的泡沫稳定性差异。由图可知，在相同 pH 时，三种山桐子蛋白样品的 FS 与其 FC 呈相反趋势，表现为 IPWP、IPPP 和 IPSP 的 FS 依次升高，均显著低于 SPI（P<0.05）。这可能是因为 IPSP 表面疏水性显著高于其他两种山桐子蛋白（见图 3），因此 IPSP 具有更高的界面膜强度，表现出较好的泡沫稳定性[57]。在不同 pH 条件下，蛋白样品的泡沫稳定性表现为：随着 pH 的增加，FS 先上升后下降。pH4 时，所有蛋白质样品的 FS 均达到最低值；当 pH 为 7 时，所有蛋白样品的泡沫稳定性显著提升（P<0.05），其中 IPSP 的 FS 较 pH4 时增加了 16%（P<0.05）；随着 pH 继续向碱性偏移，蛋白样品的 FS 呈下降趋势，这说明在高 pH 环境下，蛋白表面负电荷增加，分子间强静电斥力会阻碍蛋白分子聚集，使其气-水界面处蛋白间的相互作用力减弱[58]，导致泡沫更容易破裂，FS 降低。

2.2.3 乳化性及乳化稳定性 衡量蛋白质乳化性质的常用指标为乳化性和乳化稳定性，用来反映蛋白质在油-水界面通过吸附形成乳液，以及在油-水界面维持一定稳定性的能力[59]。蛋白质的乳化性质通常与蛋白的表面疏水性、溶解度、表面电荷及粒径大小等性质有关[60−61]。

如图 8A 所示，在相同 pH 下，三种山桐子蛋白的 EAI 高低排序为 IPSP>IPWP>IPPP，其中 IPSP 和 IPWP 的 EAI 均显著高于 IPPP（P<0.05）。这可能与三种蛋白质的溶解度有关，IPSP和 IPWP 的溶解度高于 IPPP（见图 6），较高的溶解度意味着单位体积内有更多蛋白质分子能够快速扩散并吸附在油-水界面[62]，从而提高乳化活性。另一方面可能与蛋白质粒径大小有关，粒径结果显示（见图 4A），IPPP、IPWP、IPSP 的平均粒径依次减小，有研究表明[63]，较小的粒径意味着蛋白具有更大的表面积与体积比，使得蛋白分子更易与油滴接触并吸附于油-水界面上，提高乳化活性。在不同 pH 条件下，所有蛋白样品的 EAI 均表现为随着溶液 pH 的增加而提高，在 Ngo 等[64] 的研究中也发现了同样的趋势。pH 为 4 时，三种山桐子蛋白质的 EAI 均达到最低值，当

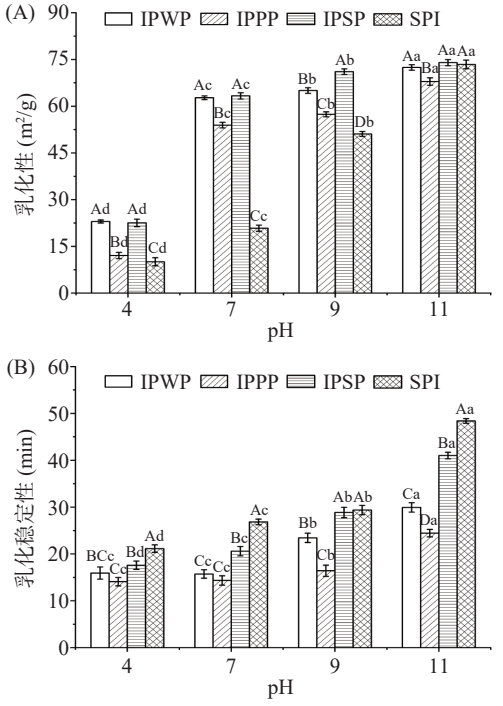


图 8 不同部位山桐子蛋白在不同 pH 条件下的乳化性（EAI）和乳化稳定性（ESI）

Fig.8 EAI and ESI of proteins from different parts of *Idesia polycarpa* at different pH conditions

pH 升至 7 时，IPWP、IPPP、IPSP 的 EAI 显著提高（$P<0.05$）。这与山桐子蛋白质的溶解度趋势一致（见图 6），由于 pH4 接近等电点，蛋白溶解度较低，不利于油水的吸附[65]，从而表现为最差的 EAI，pH 增加后溶液中可溶性蛋白分子增多，有利于蛋白分子吸附在油滴表面[66]，EAI 增加。

图 8B 为山桐子蛋白在不同 pH 下的乳化稳定性结果。由图可知，在相同 pH 下，三种山桐子蛋白的 ESI 趋势为 IPSP>IPWP>IPPP，这一结果与三种山桐子蛋白质的表面疏水性不同有关（见图 3），即表面疏水性较强的蛋白质与油的结合能力更强，从而表现出更高的乳化稳定性。在不同 pH 条件下，所有蛋白样品的乳化稳定性随着 pH 的增加而逐渐升高。在 pH4 时，所有蛋白的 ESI 最低，这可能是因为在等电点附近，蛋白质表面电荷量少，缺乏静电排斥的相互作用，蛋白质分子间容易发生絮凝和聚集，导致 ESI 较低。随着溶液 pH 增大，蛋白质的 ESI 增加，这可能是由于在碱性条件下蛋白质表面电荷增加，静电斥力增强，液滴之间不易聚集，使蛋白乳液维持更高的稳定性[67]。另一方面，也可能是由于 pH 的增加促进蛋白质分子结构展开，使蛋白质暴露更多的疏水性基团，从而提高蛋白质在油-水界面的吸附能力[68]，ESI 增加。

3　结论

本研究以市售大豆蛋白为对照，比较了三种不同部位山桐子蛋白（IPWP、IPPP、IPSP）在不同 pH（4、7、9、11）下的理化特性及功能特性差异。研究结果表明：IPSP 与 IPWP 的蛋白含量、生物活性成分（总酚、黄酮）及总氨基酸含量显著高于 IPPP（$P<0.05$），且二者结构更为舒展，不同部位蛋白的亚基组成含量存在差异；同一 pH 下，IPWP 与 IPSP 较 IPPP 具有更小粒径和更高 Zeta-电位绝对值，三种山桐子蛋白在溶解度、起泡性及乳化性方面均优于 SPI，展现出山桐子蛋白的潜在应用价值。与 IPPP 相比，IPSP 在表面疏水性、溶解度、乳化性及乳化稳定性等功能特性上表现最佳，IPWP 则具有更强的起泡性，且这些性质随 pH 的增加得到改善。综合对比表明，IPSP 和 IPWP 在蛋白组成及功能特性方面表现卓越，结合实际加工的可行性，后续可围绕 IPWP 开展改性或脱色研究，以优化其功能特性、提升蛋白含量并改善色泽，推动山桐子蛋白向高附加值产品转化。本研究对山桐子资源的高效利用及功能性成分的定向开发具有重要意义。

© The Author(s) 2026. 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］丁显平. 大力发展山桐子产业 服务国家粮食安全战略[J]. 中国林业产业, 2024(6): 1−7. ［DING Xianping: Developing *Jatropha curcas* industry to serve the national food security strategy［J］. China Forestry Industry, 2024(6): 1−7.］

［2］杨文清. 山桐子饼粕蛋白的制备、功能特性及应用[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2024. ［YANG Wenqing. Preparation, functional characteristics and application of *Jatropha curcas* cake protein［D］. Enshi: Hubei Minzu University, 2024.］

［3］张文龙. 山桐子果和籽的组成、特性与制炼油工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. ［ZHANG Wenlong. Research on the composition, characteristics, oil production and refining process of *Idesia polycarpa* pulps and seeds［D］. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］

［4］陈子茜. 山桐子果实油脂积累及其贮藏工艺研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023. ［CHEN Ziqian. Study on oil accumulation in *Idesia polycarpa* fruits and its storage process［D］. Enshi: Hubei Minzu University, 2023.］

［5］HUANG Song, ZHENG Wei, WANG Yanmei, et al. Dynamic changes of endogenous hormones in different seasons of *Idesia polycarpa* Maxim［J］. Life, 2023, 13(3): 788.

［6］LUO Tianting, XU Jiaqi, ZHEN Zhouqin, et al. Quality analysis of *Idesia polycarpa* fruit oil samples from cultivars with different phenotypes［J］. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102127.

［7］XIANG Xuwen, YANG Qingqing, CHEN Kewei, et al. Characterization of key bitter compounds in *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels fruit by sensory-guided fractionation［J］. Food Chemistry, 2024, 439: 138103.

［8］NIE Xiaohua, CHEN Mengqing, JIN Chengyu, et al. A comprehensive study of defatted *Idesia polycarpa* fruit: Phenolic profile and its relation with anti-inflammatory activity in seed, pulp, and whole fruit［J］. Food Bioscience, 2025, 66: 106228.

［9］闻乐嫣, 毛建梅, 安小凤, 等. 毛叶山桐子果实化学成分及脂肪酸动态分析与评价[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 198−207. ［WEN Leyan, MAO Jianmei, AN Xiaofeng, et al. Dynamic analysis and evaluation of chemical constituents and fatty acids of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels fruit［J］. Food Science, 2022, 43(4): 198−207.］

［10］杨静, 张娟, 李浪, 等. 毛叶山桐子粕的营养价值及重金属元素含量分析[J]. 动物营养学报, 2020, 32(11): 5482−5490. ［YANG Jing, ZHANG Juan, LI Lang, et al. Analysis of nutritional value and heavy metal element contents in *Idesia polycarpa* meal［J］. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(11): 5482−5490.］

［11］SHI Xin, ZHANG Qiuqiu, YANG Jintao, et al. Simultaneous extraction of oil, protein and polysaccharide from *Idesia polycarpa* Maxim cake meal using ultrasound combined with three phase partitioning［J］. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 110: 107043.

［12］FAN Ruishen, LI Long, CAI Gui, et al. Molecular cloning and function analysis of *FAD2* gene in *Idesia polycarpa*［J］. Phytochemistry, 2019, 168: 112114.

［13］DOU Lei, ZHANG Zimu, YANG Wenqing, et al. Separation and purification of antioxidant peptides from *Idesia polycarpa* Maxim. cake meal and study of conformational relationship between them［J］. Food Science & Nutrition, 2024, 12(9): 6206−6225.

［14］YANG Wenqing, ZHANG Zimu, CHEN Yaobing, et al. Evaluation of the use of *Idesia polycarpa* Maxim protein coating to extend the shelf life of European sweet cherries［J］. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1283086.

［15］COLEMAN K, WHITMORE A P, HASSALL K L, et al. The potential for soybean to diversify the production of plant-based

protein in the UK[J]. Science of the Total Environment, 2021, 767: 144903.
[16] POUTANEN K S, KÅRLUND A O, GÓMEZ-GALLEGO C, et al. Grains-a major source of sustainable protein for health[J]. Nutrition Reviews, 2022, 80(6): 1648−1663.
[17] HURST J P, YOBI A, LI Aixia, et al. Large and stable genome edits at the sorghum alpha kafirin locus result in changes in chromatin accessibility and globally increased expression of genes encoding lysine enrichment[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1116886.
[18] HAN Feng, SONG Jialin, QI Mingming, et al. Improving the quality of steamed bread with whole soybean pulp: Effects of ultrasonic treatment on protein structure and reduction of beany flavor[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 112: 107156.
[19] SAWICKI T, JABŁOŃSKA M, DANIELEWICZ A, et al. Phenolic compounds profile and antioxidant capacity of plant-based protein supplements[J]. Molecules, 2024, 29(9): 2101.
[20] SHARMA P, WICHAPHON J, KLANGPETCH W. Antimicrobial and antioxidant activities of defatted *Moringa oleifera* seed meal extract obtained by ultrasound-assisted extraction and application as a natural antimicrobial coating for raw chicken sausages[J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 332: 108770.
[21] 国家卫生和计划生育委员会 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission, State Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of protein in food: GB 5009.5-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[22] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission. National food safety standard Determination of moisture in food: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[23] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [National Health and Family Planning Commission. Determination of ash content in food according to the national food safety standard: GB 5009.4-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.]
[24] CHEN Wei, GAO Lei, SONG Lirong, et al. An improved phenol-sulfuric acid method for the quantitative measurement of total carbohydrates in algal biomass[J]. Algal Research, 2023, 70: 102986.
[25] IDOWU A T, AMIGO-BENAVENT M, WHELAN S, et al. Impact of different light conditions on the nitrogen, protein, colour, total phenolic content and amino acid profiles of cultured *Palmaria palmata*[J]. Foods, 2023, 12(21): 3940.
[26] IVANOVIĆ S, AVRAMOVIĆ N, DOJČINOVIĆ B, et al. Chemical composition, total phenols and flavonoids contents and antioxidant activity as nutritive potential of roasted hazelnut skins (*Corylus avellana* L.)[J]. Foods, 2020, 9(4): 430.
[27] SHI Ruijie, MA Chenglong, LI Jinpeng, et al. Characterization of TGase-induced whey protein isolate: Impact of HPHP pretreatment[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 282: 110025.
[28] LI Fang, WU Xiaojuan, WU Wei. Effects of oxidative modification by malondialdehyde on the *in vitro* digestion properties of rice bran protein[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 97: 103158.
[29] MOHAN N, MELLEM J J. Functional properties of the protein isolates of hyacinth bean [*Lablab purpureus* (L.) Sweet]: An effect of the used procedures[J]. LWT, 2020, 129: 109572.
[30] GARCÍA ARTEAGA V, APÉSTEGUI GUARDIA M, MURANYI I, et al. Effect of enzymatic hydrolysis on molecular weight distribution, techno-functional properties and sensory perception of pea protein isolates[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 65: 102449.
[31] de SOUZA T S P, DIAS F F G, KOBLITZ M G B, et al. Effects of enzymatic extraction of oil and protein from almond cake on the physicochemical and functional properties of protein extracts[J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 122: 280−290.
[32] KUMAR M, TOMAR M, POTKULE J, et al. Functional characterization of plant-based protein to determine its quality for food applications[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 106986.
[33] LI Liang, ZHOU Yan, TENG Fei, et al. Application of ultrasound treatment for modulating the structural, functional and rheological properties of black bean protein isolates[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(4): 1637−1647.
[34] VAZ PATTO M C. Grain legume protein quality: A hot subject[J]. ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura, 2016, 192(779): a314.
[35] JARPA-PARRA M, BAMDAD F, WANG Y, et al. Optimization of lentil protein extraction and the influence of process pH on protein structure and functionality[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 57(2): 461−469.
[36] PAOLETTI A, COURTNEY-MARTIN G, ELANGO R. Determining amino acid requirements in humans[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 11: 1400719.
[37] SHEVKANI K, SINGH N, CHEN Ying, et al. Pulse proteins: Secondary structure, functionality and applications[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(6): 2787−2798.
[38] YE Jianming, SHI Ninghui, ROZI P, et al. A comparative study of the structural and functional properties of chickpea albumin and globulin protein fractions[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(10): 3253−3266.
[39] SHEN Qian, LI Jing, SHEN Xiaojun, et al. Linear and nonlinear interface rheological behaviors and structural properties of pea protein (vicilin, legumin, albumin)[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108500.
[40] WEN X, MU Z S, GANTUMUR M A, et al. Characterization of whey protein isolate aggregation induced by different acidic substances: Triggered by disulfide bond formation and recombination[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110414.
[41] JIANG Zhanmei, MENG Yifei, HOU Chenyue, et al. Extrusion for reducing malondialdehyde-induced whey protein isolate oxidation in relation with its physicochemical, functional and intro digestive properties[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 142: 108730.
[42] TANG Sen, LI Junsheng, HUANG Guoxia, et al. Predicting protein surface property with its surface hydrophobicity[J]. Protein and Peptide Letters, 2021, 28(8): 938−944.
[43] WANG Linlin, WANG Cunfang, ZHANG Xiaoning, et al. Effects of different saccharides on the microstructure and functional properties of protein in goat milk during processing[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(12): 6580−6590.
[44] NOSKOV B A, BYKOV A G. Dilational rheology of monolayers of nano- and micropaticles at the liquid-fluid interfaces[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2018, 37: 1−12.
[45] STEFANOVIĆ A B, JOVANOVIĆ J R, DOJČINOVIĆ M B, et al. Effect of the controlled high-intensity ultrasound on improving functionality and structural changes of egg white proteins[J]. Food

and Bioprocess Technology, 2017, 10(7): 1224−1239.
[46] WANG Ren, XU Pengcheng, CHEN Zhengxing, et al. Complexation of rice proteins and whey protein isolates by structural interactions to prepare soluble protein composites[J]. LWT, 2019, 101: 207−213.
[47] MADEIRA P P, FREIRE M G, COUTINHO J A P. The role of carboxyl groups upon the precipitation of albumin at low pH[J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 319: 114206.
[48] DONG Shirong, XU Honghua, MA Jinyu, et al. Enhanced molecular flexibility of *α*-zein in different polar solvents[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 96: 103097.
[49] GAO Kun, RAO Jiajia, CHEN Bingcan. Plant protein solubility: A challenge or insurmountable obstacle[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 324: 103074.
[50] GULTEKIN SUBASI B, YILDIRIM-ELIKOĞLU S, ALTAY İ, et al. Influence of non-thermal microwaveradiationon emulsifying properties of sunflower protein[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131275.
[51] LIU Ning, CHEN Qiannan, LI Guanghui, et al. Properties and stability of *Perilla* seed protein-stabilized oil-in-water emulsions: Influence of protein concentration, pH, NaCl concentration and thermal treatment[J]. Molecules, 2018, 23(7): 1533.
[52] AMAGLIANI L, O'REGAN J, KELLY A L, et al. Composition and protein profile analysis of rice protein ingredients[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 59: 18−26.
[53] LUO Wenwen, XU Heyang, GANTUMUR M A, et al. Ball milling-ultrasound modification of *Citrus* fiber-carrageenan complex for improving functional properties of salted egg white[J]. Food Biophysics, 2025, 20(2): 66.
[54] AMAGLIANI L, SILVA J V C, SAFFON M, et al. On the foaming properties of plant proteins: Current status and future opportunities[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 261−272.
[55] ZHANG Siyu, XIE Qinggang, WANG Fei, et al. Effects of mono- and divalent-ions and their strength on foaming properties of infant formula protein model system[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110828.
[56] LI Cong, YANG Juzhuan, YAO Lu, et al. Characterisation, physicochemical and functional properties of protein isolates from *Amygdalus pedunculata* Pall seeds[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125888.
[57] DELAHAIJE R J B M, WIERENGA P A. Hydrophobicity enhances the formation of protein-stabilized foams[J]. Molecules, 2022, 27(7): 2358.
[58] YANG Chen, HAN Fei, WANG Ziyan, et al. The air-water interfacial properties of bovine serum albumin with pH-shifting treatments by hydrogen-deuterium exchange mass spectrometry[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 166: 111360.
[59] GHRIBI A M, GAFSI I M, BLECKER C, et al. Effect of drying methods on physico-chemical and functional properties of chickpea protein concentrates[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 165: 179−188.
[60] GANTUMUR M A, HUSSAIN M, LI Jinzhe, et al. Modification of fermented whey protein concentrates: Impact of sequential ultrasound and TGase cross-linking[J]. Food Research International, 2023, 163: 112158.
[61] BOUKID F. Peanut protein–an underutilised by-product with great potential: A review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(9): 5585−5591.
[62] IGARTÚA D E, DICHANO M C, FERRARI S B, et al. Combination of pH-shifting, ultrasound, and heat treatments to enhance solubility and emulsifying stability of rice protein isolate[J]. Food Chemistry, 2024, 433: 137319.
[63] ALAVI F, CHEN Lingyun, EMAM-DJOMEH Z. Effect of ultrasound-assisted alkaline treatment on functional property modifications of faba bean protein[J]. Food Chemistry, 2021, 354: 129494.
[64] NGO N T T, SHAHIDI F. Functional properties of protein isolates from *Camelina* (*Camelina sativa* (L.) Crantz) and flixweed (Sophia, *Descurainis sophia* L.) seed meals[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2021, 3(1): 31.
[65] HU H, CHEUNG I W Y, PAN S Y, et al. Effect of high intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of aggregated soybean *β*-conglycinin and glycinin[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 102−110.
[66] LIU Yuqing, WU Qingzhi, ZHANG Jian, et al. Food emulsions stabilized by proteins and emulsifiers: A review of the mechanistic explorations[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261: 129795.
[67] YANG Yaqin, JIN Haobo, JIN Yongguo, et al. A new insight into the influence of pH on the adsorption at oil-water interface and emulsion stability of egg yolk protein[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 246: 125711.
[68] SUN Yanjun, CHEN Jianhang, ZHANG Shuwen, et al. Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124: 11−18.