

提取方式对枸杞叶黄酮组成及理化特性的影响

李娟霞¹ 李建欣¹ 高建英¹ 买文婷¹ 范艳丽¹ 马金超² 孟雪梅¹

(1. 宁夏大学食品科学与工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏正山堂生物科技有限责任公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: [目的]探究不同提取方式对枸杞叶中黄酮类化合物的功效、化学组成及官能团特征的影响。[方法]对比分析超声波辅助乙醇提取(UAE)、微波辅助乙醇提取(MAE)及双水相萃取(ATPS)3种方法对枸杞叶黄酮的得率、化学组成及体外抗氧化活性的影响。[结果]UAE和MAE获得的干燥枸杞叶黄酮得率最高,其主要单体成分为芦丁、槲皮素、绿原酸和山奈酚。干燥枸杞叶黄酮提取物的体外抗氧化能力显著高于新鲜样品,其中UAE提取物对DPPH自由基清除率最高(84.31%),亚铁离子还原力最强(26.23%)。[结论]不同提取方式下黄酮类单体溶出效率不同,且黄酮醇结构与抗氧化活性呈显著正相关。

关键词: 枸杞叶; 抗氧化性; 提取方法; 黄酮类化合物

Effects of extraction methods on the composition and physicochemical properties of flavonoids from *Lycium barbarum* leaves

Li Juanxia¹ Li Jianxin¹ Gao Jianying¹ Mai Wenting¹ Fan Yanli¹ Ma Jinchao² Meng Xuemei¹

(1. School of Food Science and Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Ningxia Zhengshantang Biotechnology Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750001, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different extraction methods on the efficacy, chemical composition, and functional group characteristics of flavonoids in *Lycium barbarum* leaves. [Methods] This study comparatively analyzes the effects of three methods—ultrasound-assisted ethanol extraction (UAE), microwave-assisted ethanol extraction (MAE), and aqueous two-phase system (ATPS)—on the yield, composition, and *in vitro* antioxidant activity of flavonoids from *L. barbarum* leaves. [Results] UAE and MAE achieve the highest yield of flavonoids from dried *L. barbarum* leaves. The main components are rutin, quercetin, chlorogenic acid, and kaempferol. The antioxidant capacity of the flavonoid extract from dried *L. barbarum* leaves is significantly higher than that of fresh samples, and the UAE extract has the highest DPPH radical scavenging rate (84.31%) and the strongest ferrous ion-reducing ability (26.23%). [Conclusion] The dissolution efficiency of flavonoids varies under different extraction methods, and there is a significantly positive correlation between the flavanol structure and antioxidant activity.

Keywords: *Lycium barbarum* leaves; antioxidant activity; extraction method; flavonoids

近年来,枸杞叶因其富含多酚、黄酮类化合物等多种生物活性成分与微量元素,在食品工业领域展现出显著应用价值。黄酮类化合物作为植物次生代谢产物,以C₆—C₃—C₆为基本化学架构,是优良天然抗氧化剂^[1]。目前,枸杞叶黄酮的提取方式主要有微波辅助乙醇提取(MAE)、超声波辅助乙醇提取(UAE)以及双水相萃取

(ATPS)等。超声波、微波辅助可提高枸杞叶黄酮的提取率^[2]。超声波的振动作用能够缩短提取时间,微波易于控制提取温度,有效保持黄酮化合物的生物活性,双水相萃取法则基于聚合物—盐系统的相分离特性,在温和操作条件下实现高效分离,有效降低后续纯化难度^[3]。然而,提取工艺的优化多以得率为单一指标,忽视了不同处理

基金项目:宁夏回族自治区大学生创新创业计划项目(编号:s202410749076)

通信作者:孟雪梅(1993—),女,宁夏大学副教授,博士。E-mail: mengxuemei@nxu.edu.cn

收稿日期:2025-07-08 **改回日期:**2026-02-10

引用格式:李娟霞,李建欣,高建英,等. 提取方式对枸杞叶黄酮组成及理化特性的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 160-167.

Citation: Li Juanxia, Li Jianxin, Gao Jianying, et al. Effects of extraction methods on the composition and physicochemical properties of flavonoids from *Lycium barbarum* leaves[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 160-167.

方法对植物细胞作用位点的差异性影响。不同提取方法作用于植物细胞时,可能导致黄酮单体组成、比例或渗出率的变化,进而影响其功能特性。

黄酮类化合物的抗氧化活性与其B环羟基取代基构效关系密切,其中邻二酚羟基因电子云密度分布特性更易发生亲电反应,表现出最优自由基清除能力,可通过淬灭自由基机制有效拮抗氧化损伤。崔今^[4]利用高效液相色谱—质谱分析鉴定枸杞叶提取物中的11种黄酮类化合物,包括芦丁、槲皮素、阿魏酸、绿原酸及山奈酚等成分,在抗突变、调脂及延缓衰老等生理功能中呈现多维度生物效应。芦丁的抗氧化性高于槲皮素^[6],其通过提供氢原子或电子中和自由基,从而发挥抗氧化作用,而70%乙醇提取物对自由基的体外清除率达62%~78%^[5-7]。UAE可使新鲜枸杞叶黄酮得率提升至7.74%并保持显著抗氧化活性^[2]。尽管提取方式对枸杞叶黄酮的抗氧化活性和组成均有影响,但具体是哪些单体贡献了主要抗氧化活性仍不明确。此外,提取方式如何影响单体的溶出动力学及其与抗氧化活性的关联性也缺乏系统性研究。

试验拟以新鲜枸杞叶(FLBL)和干燥枸杞叶(DLBL)为原材料,采用UAE、ATPS和MAE提取枸杞叶黄酮,探讨提取方式对黄酮组成与结构的影响,并与体外抗氧化活性进行相关性分析,实现针对性的筛选高活性枸杞叶黄酮,为枸杞叶资源的有效利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

枸杞叶:百瑞源殷红子熟枸杞庄园贺兰山基地;

芦丁、无水乙醇、亚硝酸钠、氢氧化钠:分析纯,银川伟博鑫生物科技有限公司;

甘草、桔梗:圣家堂药业有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平:AE-240型,北京超越未来科技发展有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-2550型,上海百哲仪器有限公司;

低速大容量离心机:TDL-5-A型,上海川宏实验仪器有限公司;

微波炉:WD700 LG型,LG电子(天津)电器有限公司;

旋转蒸发仪:R206型,郑州长城科工贸有限公司;

数控超声清洗器:KQ-500DE型,昆山舒美超声仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 UAE 参照李明等^[8]的方法并稍作修改。将FLBL平铺(1 cm厚),50℃鼓风干燥8 h,得DLBL。称取2.0 g枸杞叶,粉碎后,按料液比1:60(g/mL)加入70%乙醇溶液,超声功率500 W,超声频率40 kHz,超声时间

80 min,超声温度90℃,即为U-DLBL和U-FLBL。

1.3.2 ATPS 参照贾晓凤等^[9]的方法并稍作修改。以16%硫酸铵、28%聚乙二醇(PEG400)和56%蒸馏水构建双水相体系。取1.0 g枸杞叶于双水相体系内,充分摇匀,料液比为1:30(g/mL),60℃、240 W超声提取40 min。离心,取上层溶液,即为A-DLBL和A-FLBL。

1.3.3 MAE 参照范艳丽等^[10]的方法并稍作修改。取2.0 g枸杞叶,粉碎,按料液比1:70(g/mL)加入70%乙醇溶液,预浸时间60 min,120℃微波提取7 min,4 000 r/min离心15 min,过滤,定容,即为M-DLBL和M-FLBL。

1.3.4 总黄酮得率测定 参照张继斌等^[11-12]的方法,测定500 nm处吸光度,按式(1)计算枸杞叶黄酮含量。

$$G = \frac{C \times V}{M} \times 100, \quad (1)$$

式中:

C——黄酮类化合物质量浓度,mg/mL;

V——提取物总体积,mL;

M——枸杞叶质量(干物质),g;

G——总黄酮得率,mg/g(干物质)。

1.3.5 紫外光谱特征分析 称取2 mg芦丁标准品、10 mg待测样品,用70%乙醇溶液定容,超声10 min至完全溶解。于200~800 nm处进行紫外可见光谱扫描,重复测定3次。对比样品与芦丁标准品的紫外吸收光谱,观察样品在200~800 nm(苯环吸收)和300~400 nm(共轭体系吸收)处的特征吸收峰^[13]。

1.3.6 傅里叶变换红外光谱分析 参照廖霞等^[14]的方法,扫描范围4 000~400 cm⁻¹,分辨率4 cm⁻¹,扫描次数32。

1.3.7 高效液相色谱分析 采用高效液相色谱(HPLC)法分析枸杞叶黄酮提取物的单体组成。精密称取10 mg样品定容,准确称取芦丁、槲皮素、山奈酚、对香豆酸、绿原酸、咖啡酸、阿魏酸标准品并定容。临用前,样品与标准品超声10 min助溶,用0.22 μm有机相针式滤器过滤3次,取20 μL进样。色谱条件:Inertsil ODS-3(C₁₈)色谱柱(4.6 mm×250 mm,5 μm);流动相A为甲醇,流动相B为乙酸—纯水(体积比1:100)溶液;洗脱程序:0~8 min,15%~20% A;8~18 min,20%~60% A;18~25 min,60% A;25~30 min,60%~80% A;30~40 min,80% A;40~50 min,80%~15% A;50~55 min,15% A。紫外检测波长290 nm,柱温30℃,流速1 mL/min,进样量20 μL。以质量浓度为横坐标,峰面积为纵坐标绘制标准曲线。

1.3.8 体外抗氧化性测定

(1) DPPH自由基清除能力:参照董宇等^[15]的方法,按式(1)计算DPPH自由基清除率。

$$R = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

R ——DPPH 自由基清除率,%;

A_0 ——空白组吸光度;

A_1 ——加入样品与 DPPH 反应体系吸光度;

A_2 ——所测样品吸光度。

(2) 亚铁离子还原能力:参照李竹嘉等^[16]的方法,测定 595 nm 处吸光度,并按式(3)计算亚铁离子还原力。

$$F = \frac{A_{\text{样}} - A_{\text{空}}}{A_{\text{空}}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

F ——亚铁离子还原力,%;

$A_{\text{样}}$ ——样品吸光度;

$A_{\text{空}}$ ——空白对照组吸光度。

(3) ABTS 自由基清除能力:参照董宇等^[15]的方法,以维生素 C 作对照组,平行测定 3 次,按式(4)计算 ABTS 自由基清除率。

$$T = \frac{A_0' - (A_1' - A_2')}{A_0'} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

T ——ABTS 自由基清除率,%;

A_0' ——无水乙醇代替样品溶液的吸光度;

A_1' ——样品吸光度;

A_2' ——无水乙醇代替 ABTS 工作液的吸光度。

1.3.9 数据处理 使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素 ANOVA 检验,Origin 2024SR1 软件绘制光谱图,GraphPad Prism 10.1.2 软件绘制柱状图和折线图;字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 提取方式对枸杞叶黄酮得率的影响

由图 1 可知,MAE 通过介电加热诱导极性分子振动产生分子摩擦热,提升细胞内温度,增大压力,促使细胞破裂以释放黄酮组分,与 Doldolova 等^[17]的结论一致。同时,MAE 可降低传质阻力,加快提取速度,使 M-DLBL 与 M-FLBL 得率分别达到 14.3, 13.4 mg/g。相比之下,ATPS 因局限于液-液界面传质且相分配系数差异显著,细胞裂解效率较低。超声波空化效应产生的瞬态高压微射流可有效破碎植物细胞壁,促使细胞内的总黄酮迅速释放到溶剂中,大幅提升了提取效率,使 DLBL 总黄酮得率达 15.2 mg/g;Sendi 等^[18]采用超声波提取白蒿中黄酮总含量高达 102.49 mg CE/g DM。不同提取方法下总黄酮含量呈显著梯度差异,可能与各处理方法的物理场作用强度和细胞破壁效能密切相关。综上,UAE 与 MAE 的 DLBL 和 FLBL 总黄酮得率显著高于 ATPS 的($P < 0.05$)。

2.2 枸杞叶黄酮结构表征

2.2.1 紫外吸收光谱 由图 2 可知,黄酮类化合物在

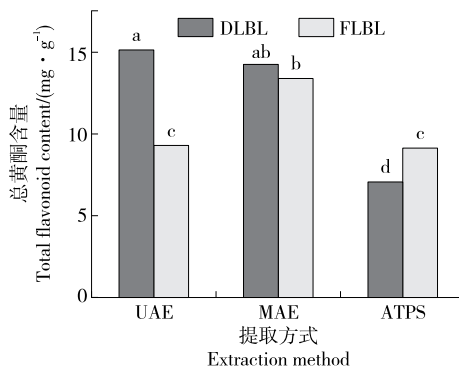


图 1 不同提取方式下枸杞叶的总黄酮含量

Figure 1 Total flavonoid content in *Lycium barbarum* leaves under different extraction methods

240~400 nm 区域呈现特征性双峰吸收;200~280 nm 范围的带 II 峰归属为 A 环苯甲酰基体系的电子跃迁,300~400 nm 范围的带 I 峰则由 B 环桂皮酰基系统电子跃迁引起^[19]。相较于芦丁标准品,U-FLBL、M-FLBL、M-DLBL 及 A-DLBL 的带 II 吸收峰均发生红移,可能是取代反应引入了含未共享电子对的基团。同时,M-DLBL、A-DLBL、M-FLBL 及 A-FLBL 的带 II 吸收峰发生蓝移,这与生色团羰基碳原子空间位阻导致共轭体系缩短有关;与 DLBL 相比,FLBL 的吸收峰发生宽化,可能由于 B 环与吡喃酮环羰基共轭效应减弱,致使桂皮酰基系统(带 I)和苯甲酰基系统(带 II)电子跃迁强度下降^[20]。枸杞鲜叶提取物的带 II 吸收强度略高于带 I,且带 I 峰型较平缓,可能是 A 环苯甲酰基体系中取代基种类与位置的复杂多样性所致,与赵光远等^[21]的研究结论一致。U-FLBL 和 U-DLBL 在带 II 区域未检测到特征吸收峰。芦丁标准品与枸杞干叶样品在 357 nm 处均呈现最大吸收峰($\lambda_{\max}$)重叠,并具有相似的双峰特征,符合黄酮类物质的典型紫外

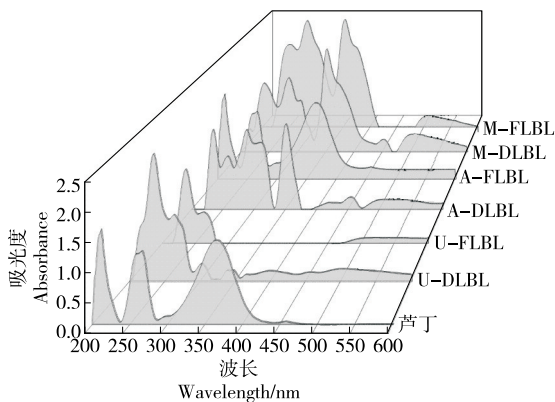


图 2 不同提取方式下枸杞叶黄酮的紫外—可见光谱图

Figure 2 UV-Vis spectra of flavonoids from *Lycium barbarum* leaves under different extraction methods

吸收光谱^[22]。343~371 nm处存在强吸收峰(带Ⅰ),227~269 nm处出现次级吸收峰(带Ⅱ),该双峰特征表明枸杞干叶黄酮母核结构中B环存在氧取代而A环无氧取代,与黄酮类化合物构效关系理论相符。MAE与UAE的黄酮得率显著高于ATPS的,这与黄酮的光谱图强度和特征结果相一致。

2.2.2 傅里叶变换红外光谱 由图 3~图 4 可知,UAE、MAE 及 ATPS 获得的 DLBL 和 FLBL 黄酮官能团特征存在差异。所有样品在 $3\,200\sim 3\,400\text{ cm}^{-1}$ 区域均呈现宽峰,归属于酚羟基或糖环羟基的 O—H 伸缩振动^[22-23]。峰形较宽可能是黄酮分子上的羟基或样品中的结合水较多^[24]。而 $2\,950\sim 2\,850\text{ cm}^{-1}$ 范围的 C—H 伸缩振动峰提示亚甲基结构,亚甲基结构不仅能增强芦丁分子的稳定性使其在氧化环境中更不易被降解,从而维持其抗氧化活性。此外,电子效应影响芦丁分子中酚羟基的电子密度,也会影响其清除自由基的能力。对于新鲜枸杞叶提取物,A-FLBL 与 M-FLBL 在 $2\,975\text{ cm}^{-1}$ 附近出现强吸收峰,表明 MAE 及 ATPS 提取物中烯烃 C—H 伸缩振动强度升高。烯烃 C—H 键的振动频率和强度与其电子分布有关。不饱和键的存在使得分子更容易通过电子转移或自由基捕获机制发挥抗氧化作用。因此,烯烃 C—H 伸缩振动强度的升高可能与分子中不饱和键的减少有关,进而削弱了抗氧化能力。 $2\,870\sim 2\,990\text{ cm}^{-1}$ 区域,ATPS(A-DLBL/A-FLBL)呈现双峰特征,而 UAE(U-FLBL/U-DLBL)的仅为单峰,这可能与提取物浓度梯度及甲基反对称拉伸振动强度相关^[25]。6 种提取物在 $1\,630\sim 1\,690\text{ cm}^{-1}$ 处均出现酰胺 I 带特征性 C=O 伸缩振动峰, $1\,400\text{ cm}^{-1}$ 附近的 O—H 面内弯曲振动及苯环骨架振动证实酚类结构存在(酚类双键伸缩振动)^[26-27]。当 O—H 振动峰强度增强和苯环振动峰强度增强时,分子中羟基或苯环数量增加,能够提供更多的氢原子与自由基反应或能够稳定更多的自由基中间体,从而增强抗氧化能力。黄酮提取物在 $1\,465\sim 1\,340\text{ cm}^{-1}$ 范围内存在多个 C—H 变角振动吸收峰^[28]。C—O 伸缩振动($1\,300\sim 1\,060\text{ cm}^{-1}$)及指纹区特征峰($1\,023.8, 1\,079.8, 1\,082.8\text{ cm}^{-1}$)进一步佐证黄酮糖苷结构。 $998\sim 562\text{ cm}^{-1}$ 区间的吸收峰位移差异反映苯环取代基位置多样性^[29]。而 $861.1\sim 947.2, 600\sim 680\text{ cm}^{-1}$ 区域的峰分别对应芳香环 C—H 面内及面外弯曲振动。 $3\,400\text{ cm}^{-1}$ 处强 O—H 峰及特征振动模式进一步说明提取物中富含黄酮醇类成分。

2.2.3 黄酮组成 就单一成分而言,芦丁属于黄酮苷类,其对超氧阴离子自由基、羟自由基等的清除能力低于槲皮素、绿原酸及维生素C^[30],其与槲皮素复配可协同提升抗氧化活性。由表1可知,MAE通过微波能量加速溶剂渗透和细胞壁破裂,且微波加热能够均匀地作用于样品,促进溶剂与目标化合物的接触,减少热降解^[31]。ATPS法

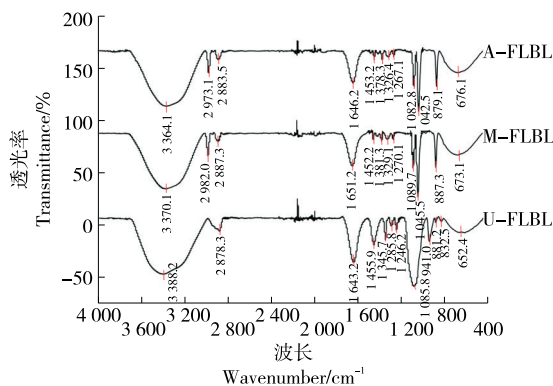


图3 不同提取方式下新鲜枸杞叶黄酮的红外光谱图

Figure 3 FT-IR spectra of flavonoids in fresh *Lycium barbarum* leaves under different extraction methods

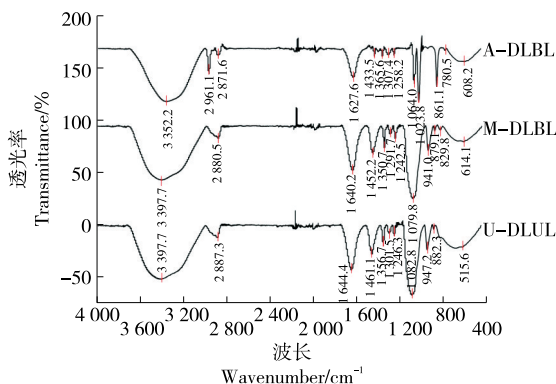


图4 不同提取方式下干燥枸杞叶黄酮的红外光谱图

Figure 4 FT-IR spectra of flavonoids in dried *Lycium barbarum* leaves under different extraction methods

被广泛应用于黄酮类提取物的纯化,但对芦丁提取量最低,为 (1.37 ± 0.12) mg/g。槲皮素作为黄酮醇类化合物,是芦丁的苷元,具有强抗氧化性,其羟自由基清除能力优于山萘酚,且通过 Bcl-2/Bax 通路抑制细胞凋亡^[32-33]。槲皮素具有良好的共轭结构与强电子转移能力,可有效地提供电子,增强体系的抗氧化能力。因此,槲皮素的自由基清除率显著高于绿原酸和芦丁^[34]。提取方式对细胞的破碎、成分释放效果不同,MAE 法利用微波的热效应和非热效应,快速加热样品并破坏细胞壁,从而加速槲皮素的溶出^[35]。UAE 法可促进溶剂渗透到植物细胞中,在长时间和高功率的条件下,致使 M-DLBL 中含量最高,U-FLBL 中含量最低。绿原酸由咖啡酸与奎宁酸酯化形成,代谢后主要转化为咖啡酸及其衍生物^[32]。绿原酸能够增强超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等重要抗氧化酶活性,进而清除自由基,提升机体抗氧化防御能力^[36]。MAE 利用微波的快速加热及高效能量的传递,可

有效破坏植物细胞壁,促进绿原酸的释放,绿原酸含量达 (2.83 ± 0.07) mg/g。咖啡酸是羟基肉桂酸衍生物,在植物中常以游离或结合态存在,微波的热效应可以破坏植物细胞壁,使咖啡酸等有效成分更易溶出^[37]。咖啡酸通过螯合金属离子来阻止金属离子催化脂质过氧化反应,从而起到抗氧化作用,其总抗氧化能力显著高于BHT和维生素C^[38]($P<0.01$)。对香豆酸属于羟基肉桂酸类,与阿魏酸结构相似(缺少甲氧基),光照可诱导对香豆酸在苦荞芽中积累,与阿魏酸协同抑制沙门氏菌生物膜形成并参与植物酶促褐变^[39]。UAE可显著促进对香豆酸的溶出,对香豆酸含量达 (0.19 ± 0.02) mg/g,而ATPS的样品中未检出该物质。阿魏酸是含甲氧基的羟基肉桂酸,在U-DLBL中含量最高,M-FLBL中含量最低。在Fenton反应

中, Fe^{2+} 可催化 H_2O_2 产生 $\cdot\text{OH}$,阿魏酸能与体系中的金属离子充分结合,形成稳定的螯合物,抑制金属离子的催化活性,减少自由基的产生,进而增强枸杞叶黄酮的抗氧化稳定性^[40]。山奈酚是黄酮类化合物,主要通过清除自由基、调节氧化还原酶活性等途径表现出强抗氧化性。不同提取方式能够显著影响枸杞叶黄酮多酚类成分的溶出率与含量分布。各单体成分依靠其独特的分子结构与作用机制,在抗氧化、抗损伤及疾病预防等方面表现出差异化功效。干燥可使枸杞叶细胞壁和细胞膜的结构发生变化,细胞更加脆弱,有利于溶剂渗透和活性成分的释放^[41],而鲜叶的细胞结构完整,溶剂渗透阻力较大,且鲜叶中含有大量水分会稀释提取溶剂,导致黄酮类化合物溶出率较低。

表 1 枸杞叶黄酮组分指标[†]

Table 1 Component indexes of flavonoids from <i>Lycium barbarum</i> leaves						mg/g
多酚黄酮类	U-DLBL	U-FLBL	M-DLBL	M-FLBL	A-DLBL	A-FLBL
芦丁	3.37 ± 0.12^b	3.47 ± 0.15^b	2.74 ± 0.59^c	3.83 ± 0.54^a	1.37 ± 0.12^d	2.97 ± 0.12^{bc}
槲皮素	3.63 ± 0.21^a	1.63 ± 0.58^d	3.87 ± 0.21^a	3.51 ± 0.13^a	2.56 ± 0.15^b	2.04 ± 0.11^c
绿原酸	2.77 ± 0.13^{ab}	1.23 ± 0.56^c	2.83 ± 0.07^a	2.53 ± 0.58^b	0.71 ± 0.08^d	0.79 ± 0.1^d
咖啡酸	0.45 ± 0.01^c	0.41 ± 0.01^{cd}	0.46 ± 0.02^c	0.32 ± 0.02^d	0.55 ± 0.05^b	0.65 ± 0.13^a
对香豆酸	0.19 ± 0.02^a	0.12 ± 0.02^c	0.17 ± 0.07^b	0.22 ± 0.01^a	nd	nd
阿魏酸	0.95 ± 0.04^a	0.54 ± 0.02^b	0.88 ± 0.02^a	0.31 ± 0.01^c	0.84 ± 0.03^a	0.63 ± 0.06^b
山奈酚	2.60 ± 0.12^a	1.54 ± 0.06^b	2.67 ± 0.06^a	2.10 ± 0.14^a	0.77 ± 0.06^c	1.54 ± 0.07^b
合计	13.91 ± 0.60^a	8.94 ± 0.33^b	13.61 ± 0.49^a	12.81 ± 0.35^a	6.65 ± 0.46^c	8.57 ± 0.56^b

[†] nd表示未检出。

2.3 抗氧化性分析

由图 5 可知,UAE因超声空化效应引发的细胞壁破裂及机械振动效应显著促进了溶质传质效率,使DLBL、FLBL的DPPH自由基清除率分别达84.31%和43.75%。其优异的抗氧化活性可能是由于空化作用促使酚羟基空间构象改变,提升了自由基捕获能力^[42]。MAE通过微波

介电加热引发分子高速振动,加速酚类物质溶出动力学过程,使DLBL、FLBL的DPPH自由基清除率分别为82.87%和35.40%,其作用机制可能与羰基和甲氧基等官能团的变化有关,且协同作用增强了抗氧化效应^[43]。ATPS因相分离动力学缓慢及聚合物空间位阻效应,导致酚羟基扩散受限,DLBL、FLBL的DPPH自由基清除率仅

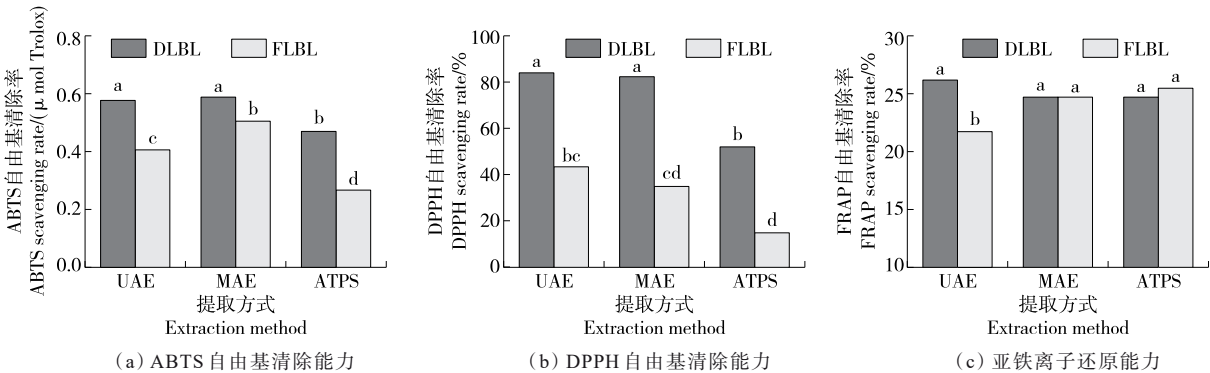


图 5 不同提取方式下枸杞叶黄酮的体外抗氧化特性

Figure 5 *In vitro* antioxidant properties of flavonoids from *Lycium barbarum* leaves under different extraction methods

为52.53%和15.48%,这与双相界面传质阻力及表面活性剂分子包埋作用密切相关^[44]。此外,DLBL提取物的DPPH自由基清除效果明显强于FLBL,可能是干燥过程引发的细胞膜透性改变及水分蒸发导致的活性成分浓缩,使DLBL总酚溶出率增加。其中,U-DLBL与M-DLBL的DPPH自由基清除力、ABTS自由基清除能力和FRAP还原力显著高于其他组,说明提取方法介导的细胞破壁效率与活性成分溶出动力学呈正相关。UAE因作用时间短、结构破坏小,有效保持了黄酮类化合物的完整性,使U-DLBL表现出最强的亚铁离子还原能力。由于微波参数需要精准性,作用时间和温度波动可能会引起黄酮结构的改变,使M-DLBL和M-FLBL的亚铁离子还原力分别降至24.74%和24.73%^[45]。ATPS因温和的提取条件保留了黄酮原本结构,其提取物A-DLBL和A-FLBL在干燥过程中保持稳定,亚铁离子还原力分别达25.8%和25.5%。综上,提取工艺与单体组成的差异显著影响提取物整体的抗氧化活性,其中UAE对干叶的处理能获得较高的抗氧化活性。

3 结论

探讨了超声波辅助乙醇提取、微波辅助乙醇提取和双水相萃取法3种提取方式对枸杞叶黄酮的得率、单体溶出及抗氧化活性的影响。结果表明,超声波辅助乙醇提取法能够通过快速破坏植物细胞壁,促进黄酮单体的释放,实现枸杞叶黄酮的高效提取,且黄酮醇类物质的显著富集能够增强提取物的体外抗氧化活性。然而,研究仅评价了提取物的体外抗氧化活性,未对其体内抗氧化效果进行研究,尚不能全面揭示其抗氧化应用潜力。后续研究可补充体内试验,深入阐明其抗氧化机制,进一步提升研究的科学性与应用价值。

参考文献

- [1] 刘海燕,曹藩荣.茶叶中黄酮类化合物对肠道的保护作用的研究概况[J].广东茶业,2021(3):2-7.
Liu H Y, Cao F R. Research overview of the protective effects of flavonoids in tea on the intestinal tract[J]. Guangdong Tea Industry, 2021(3): 2-7.
- [2] 张杰,郑万财,党斌,等.处理方式对黑青稞酚类物质含量及体外抗氧化活性的影响[J].食品与机械,2025,41(11):109-117.
Zhang J, Zheng W C, Dang B, et al. Effects of different treatments on phenolic content and *in vitro* antioxidant activity in black highland barley[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 109-117.
- [3] 莫红芳,石宗承,刘磊,等.植物类黄酮的药理作用及其在畜禽生产中的应用[J].动物医学进展,2024,45(9):119-122.
Mo H F, Shi Z C, Liu L, et al. Pharmacological effects of plant

- flavonoids and their application in livestock and poultry production[J]. Progress in Veterinary Medicine, 2024, 45(9): 119-122.
- [4] 崔今.枸杞叶黄酮的组成及对淀粉利用酶的抑制作用研究[D].北京:北京林业大学,2018.
Cui J. Composition and starch-utilization enzyme inhibitory effect of flavonoids from *Lycium barbarum* L. leaves[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [5] 戴昊昕,杨大伟.显齿蛇葡萄叶提取物黄酮化合物鉴定及抗氧化活性研究[J].食品与机械,2026,42(1):139-144.
Dai H X, Yang D W. Flavonoid identification and antioxidant activity of *Ampelopsis grossedentata* leaf extract[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 139-144.
- [6] 熊颖,舒曼,欧光梅,等.成熟期对蓝莓果实外观特征、生物活性成分及抗氧化能力的影响[J].食品与机械,2025,41(3):126-133.
Xiong Y, Shu M, Ou G M, et al. Effects of maturity on appearance characteristics, bioactive components, and antioxidant capacity of blueberry fruits[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 126-133.
- [7] 张婉萍,张志远,张冬梅,等.艾叶提取物的功效性能[J].食品与机械,2023,39(4):37-43.
Zhang W P, Zhang Z Y, Zhang D M, et al. Study on efficacy and performance of *Artemisia argyi* extracts[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 37-43.
- [8] 李明,金刚,朱俊义,等.超声波辅助提取大叶子总黄酮工艺研究[J].通化师范学院学报,2014,35(8):12-13,54.
Li M, Jin G, Zhu J Y, et al. Research on ultrasound-assisted extraction process of total flavonoids from *Daphnia magna*[J]. Journal of Tonghua Normal University, 2014, 35(8): 12-13, 54.
- [9] 贾晓凤,高蝶,刘金旺,等.超声波辅助双水相法提取枸杞叶黄酮及其胰脂肪酶抑制活性[J].食品与机械,2024,40(8):144-151.
Jia X F, Gao D, Liu J W, et al. Extraction of flavonoids from Goji (*Lycium barbarum* L.) leaves by ultrasonic-assisted two-phase aqueous method and the inhibitory activity of the extract on pancreatic lipase[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 144-151.
- [10] 范艳丽,龚媛,梁飞,等.微波辅助法提取枸杞叶黄酮的工艺研究[J].中国食品添加剂,2013,24(4):83-89.
Fan Y L, Gong Y, Liang F, et al. Study on the extraction process of flavonoids from *Lycium barbarum* L. leaves[J]. China Food Additives, 2013, 24(4): 83-89.
- [11] 张继斌,江丹,王玉,等.不同桑叶提取物对 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和蔗糖酶的抑制作用研究[J].中国食品添加剂,2024,35(9):146-153.
Zhang J B, Jiang D, Wang Y, et al. Study on the inhibitory effects of different mulberry leaf extracts on α -amylase, α -glucosidase and sucrase[J]. China Food Additives, 2024, 35(9): 146-153.

- [12] 陈瑾, 陈晶华, 刘利平, 等. 枸杞叶黄酮提取物的纯化及组成结构分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 28-34, 40.
- Chen J, Chen J H, Liu L P, et al. Purification and structural analysis of flavonoids from lycium barbarum leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(18): 28-34, 40.
- [13] Liang X J, An W, Li Y K, et al. Effects of different nitrogen application rates and picking batches on the nutritional components of *Lycium barbarum* L. fruits[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1355832.
- [14] 廖霞, 杨小兰, 李瑶, 等. 响应面法优化复凝聚法制备槲皮素微胶囊工艺及其理化性质[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 20-27.
- Liao X, Yang X L, Li Y, et al. Response surface optimization of preparation of microencapsulated quercetin using complex coacervation and its physicochemical properties[J]. Food Science, 2016, 37(22): 20-27.
- [15] 董宇, 林翰清, 缪松, 等. 酶法提取多糖的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 351-358.
- Dong Y, Lin H Q, Miao S, et al. Advances in enzymatic extraction of polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 351-358.
- [16] 李竹嘉, 徐静雯, 赵勇. 紫菜活性成分提取技术及其功能特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 437-446.
- Li Z J, Xu J W, Zhao Y. Research progress on extraction technology and functional characteristics of active components from porphyra[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 437-446.
- [17] Doldolova K, Bener M, Lalikoğlu M, et al. Optimization and modeling of microwave-assisted extraction of curcumin and antioxidant compounds from turmeric by using natural deep eutectic solvents[J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129337.
- [18] Sendi N, Mkadmini-Hammi K, Ben Mansour R, et al. Simultaneous optimization of ultrasound-assisted extraction of flavonoid compounds and antiradical activity from *Artemisia herba-Alba* using response surface methodology[J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2020, 50(9): 943-953.
- [19] 于啊香, 马嘉慕, 程杰, 等. HPLC-DAD-ESI-MS/MS 结合分子网络技术分析彭祖寿柑果肉的化学成分[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 272-287.
- Yu A X, Ma J M, Cheng J, et al. Analysis of the chemical components in citrus reticulata blanco pulp based on HPLC-DAD-ESI-MS/MS combined with molecular network technology[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(3): 272-287.
- [20] 孙美玲, 邱学志, 周婧, 等. 水晶冰菜总黄酮提取工艺优化、结构表征及组成成分分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 196-204.
- Sun M L, Qiu X Z, Zhou J, et al. Optimization of extraction process, structural characterization and component analysis of total flavonoids from mesembryanthemum crystallinum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(4): 196-204.
- [21] 赵光远, 许艳华, 敬思群, 等. 高压微射流对葡聚糖理化性质和结构的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 240-244.
- Zhao G Y, Xu Y H, Jing S Q, et al. Effect of high pressure microfluidization on physical and chemical properties and structure of glucan[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(12): 240-244.
- [22] 刘彩云, 李慧颖, 张倩玮, 等. 基于紫外可见光谱的红葡萄酒关键质量指标快速监测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 401-409.
- Liu C Y, Li H Y, Zhang Q W, et al. Rapid monitoring of key quality indicators of red wines based on UV-vis spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 401-409.
- [23] 赵斗, 杨胜男, 刘楠楠, 等. 菜芙蓉花黄酮微胶囊的制备工艺及其贮藏稳定性[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(5): 508-517.
- Zhao D, Yang S N, Liu N N, et al. Preparation process and storage stability of *Abelmoschus manihot* (L.) medic flowers flavonoids microcapsules[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(5): 508-517.
- [24] 刘淑萍, 王蕾. AB-8 型大孔吸附树脂对栗蓬总黄酮的分离纯化及吸附热力学研究[J]. 中国食品添加剂, 2017, 28(1): 115-120.
- Liu S P, Wang L. Separation and purification of total flavonoids from chestnut by AB-8 macroporous adsorption resin and research on adsorption thermodynamics[J]. China Food Additives, 2017, 28(1): 115-120.
- [25] Lu X N, Wang J, Al-oaidiri H M, et al. Determination of total phenolic content and antioxidant capacity of onion (*Allium cepa*) and shallot (*Allium oschaninii*) using infrared spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2011, 129(2): 637-644.
- [26] 张艳玲, 夏远, 朝格图, 等. 野菊花不同提取物的红外光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(12): 3 225-3 228.
- Zhang Y L, Xia Y, Zhao G T, et al. Study on different extracts of *Chrysanthemum indicum* by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(12): 3 225-3 228.
- [27] 何书美, 乔兰侠, 刘敬兰. 红外光谱法测定芹菜叶提取物中总黄酮的含量[J]. 分析科学学报, 2008, 24(2): 201-204.
- He S M, Qiao L X, Liu J L. Quantitative determination of total flavonoids in the extraction of celery leaves by IR[J]. Journal of Analytical Science, 2008, 24(2): 201-204.
- [28] 张志信, 张仕秀. 瓶尔小草提取物红外光谱解析[J]. 文山学院学报, 2012, 25(6): 30-34.
- Zhang Z X, Zhang S X. Infrared spectrum analysis of extracts of *ophioglossum vlgatum* L[J]. Journal of Wenshan University, 2012, 25(6): 30-34.

- [29] 余先纯, 王向军. 柚皮黄酮的提取工艺及红外光谱分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(4): 137-139.
- Yu X C, Wang X J. Extraction process and infrared spectral analysis of flavonoids from pomelo peel[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(4): 137-139.
- [30] 马伟伟, 黄航君, 毕凯丽, 等. 华北蓝盆花花序中酚类化合物的测定及抗氧化活性[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 637-642.
- Ma W W, Huang H J, Bi K L, et al. Determination of phenols and antioxidant activity of inflorescence from *Scabiosa tschiliensis* Grunning[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2019, 39(6): 637-642.
- [31] Arbianti R, Angelina, Suryapranata B, et al. Combined enzymatic and ultrasound-assisted aqueous two-phase extraction of antidiabetic flavonoid compounds from *Strobilanthes crispus* leaves[J]. Communications in Science and Technology, 2023, 8(2): 113-123.
- [32] 胡冬青, 阎兆君. HPLC法同时测定杠板归不同部位中5种成分的含量[J]. 山西医科大学学报, 2024, 55(1): 108-112.
- Hu D Q, Yan Z J. Simultaneous determination of five components in different parts of *Polygonum perfoliatum* L. by HPLC[J]. Journal of Shanxi Medical University, 2024, 55(1): 108-112.
- [33] 史小飞. 枸杞的抗炎活性成分及作用机理[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 151-160.
- Shi X F. Anti-inflammatory active ingredients and mechanisms of action of *Lycii fructus*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 151-160.
- [34] 石艳宾, 鲍佳彤, 王亦萱, 等. 金银花绿原酸与芦丁、槲皮素协同抗氧化作用[J]. 食品工业, 2020, 41(5): 199-202.
- Shi Y B, Bao J T, Wang Y X, et al. Synergistic antioxidant effect among honeysuckle chlorogenic acid, rutin and quercetin [J]. The Food Industry, 2020, 41(5): 199-202.
- [35] Mangilet A D, Capunitan J, Borines M, et al. Comparative study on conventional and microwave-assisted ethanol extraction of phenolics and flavonoids from waste onion leaves [J]. Philippine Journal of Agricultural and Biosystems Engineering, 2021, 17(2): 19-32.
- [36] 黄平情. 绿原酸的抗氧化作用与机理研究[J]. 食品安全导刊, 2024(34): 82-89.
- Huang P Q. Study on antioxidative effect and mechanism of chlorogenic acid[J]. China Food Safety Magazine, 2024(34): 82-89.
- [37] 薛海瑞, 李国秀, 孙意冉, 等. 黑果枸杞花色苷提取工艺优化及抗氧化研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2023, 60(4): 183-194.
- Xue H R, Li G X, Sun Y R, et al. Research on optimization of the extraction process and antioxidant activity of anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2023, 60(4): 183-194.
- [38] 范金波, 蔡茜彤, 冯叙桥, 等. 咖啡酸体外抗氧化活性的研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(3): 65-73.
- Fan J B, Cai X T, Feng X Q, et al. Studies on the antioxidant activity *in vitro* of caffeic acid[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(3): 65-73.
- [39] Xu J G, Hu H X, Chen J Y, et al. Comparative study on inhibitory effects of ferulic acid and p-coumaric acid on *Salmonella Enteritidis* biofilm formation[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2022, 38(8): 136.
- [40] 王璞玉, 吴冰, 卞常鑫, 等. 阿魏酸过渡金属配合物的合成及抗凝血作用研究[J]. 无机化学学报, 2012, 28(8): 1 609-1 616.
- Wang P Y, Wu B, Bian C X, et al. Synthesis and anticoagulant properties of transition metal complexes with ferulic acid[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2012, 28(8): 1 609-1 616.
- [41] Wu D T, Deng W, Li J, et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of phenolic compounds from thinned young kiwifruits and their beneficial effects[J]. Antioxidants, 2023, 12 (7): 1 475.
- [42] 何虹, 杨俊, 王亭杰, 等. 悬浮聚合色粉制备条件及树脂性能控制[J]. 高校化学工程学报, 2001, 15(6): 538-545.
- He H, Yang J, Wang T J, et al. Preparation process and resin properties control of the toner in suspension polymerization[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2001, 15(6): 538-545.
- [43] 陈丛瑾, 黄克瀛, 杨国恩, 等. 香椿叶总黄酮的微波提取及其清除DPPH自由基能力的研究[J]. 中国食品学报, 2008, 8(4): 33-38.
- Chen C J, Huang K Y, Yang G E, et al. Studies on microwave extraction technique and scavenging DPPH free radicals activity of total flavonoid from *toon a sinensis* (a juss.) roem leaves[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2008, 8(4): 33-38.
- [44] 臧慧静, 刘学, 孙亚娟, 等. 双水相萃取法提取地骨皮多酚及抗氧化活性研究[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 855-859, 867.
- Zang H J, Liu X, Sun Y J, et al. Extraction of polyphenols from *Lycii Cortex* based on aqueous two-phase system and evaluation of its antioxidant capacity[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(4): 855-859, 867.
- [45] 汤兴楠, 栾凯文, 王荣香, 等. 微波辅助提取辣木籽总苷工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(4): 246-253.
- Tang X N, Luan K W, Wang R X, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of total glycosides from *moringa oleifera* seeds and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(4): 246-253.