DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250908003
引用格式: 成欢, 阿丽亚·帕拉提, 苏比努尔·阿卜力孜, 等. 不同来源葫芦巴籽化学成分、结构特征与抗氧化活性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(7): 222–234.
CHENG H, ALIYA PLT, SUBINUER ABLZ, *et al*. Analysis of the chemical composition, structure characterization and antioxidant activity of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from different origins [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(7): 222–234. (in Chinese with English abstract).

不同来源葫芦巴籽化学成分、结构特征与抗氧化活性分析

成　欢, 阿丽亚·帕拉提, 苏比努尔·阿卜力孜, 李孟轩, 买尔哈巴·牙生, 马生军, 帕尔哈提·柔孜*

(新疆农业大学食品科学与药学学院, 乌鲁木齐　830052)

摘　要: 目的　探究泰国(A)、河南商丘(B)、新疆农业大学陆港校区(C)、新疆和田学院药材种植基地(D)葫芦巴籽在化学成分、光谱特性、微观形貌和抗氧化活性方面的差异性。**方法**　本研究采用定性、定量分析明确葫芦巴籽中主要成分含量差异, 并利用紫外光谱分析、红外光谱分析、扫描电镜分析其结构特征, 通过体外抗氧化试验测定其对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH)自由基、羟自由基和 2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-biazo-bis(3-ethylbenzothiazolin-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基的清除能力, 以综合评估其抗氧化活性。**结果**　4 种来源的葫芦巴籽化学成分含量不同, 多糖、皂苷、蛋白质、黄酮类、油脂、水分等成分含量最高为 3.89% (B)、1.02% (C)、23.66% (D)、8.81% (A)、7.54% (C)、8.62% (B); 通过能谱分析测得, 其主要组成(重量百分比)中, C、O、N、P、K、S、Cl、Na、Mg 的最高含量分别为 72.36% (D)、43.87% (A)、10.25% (C)、2.01% (C)、3.33% (B)、0.6% (C)、0.33% (B)、0.39% (B)、0.25% (C); 扫描电镜形貌分析表明, 不同来源葫芦巴籽的水提取物和乙醇提取物在微观结构上存在明显差异; 葫芦巴籽水提物、乙醇提取物对 DPPH 自由基、羟自由基和 ABTS 阳离子自由基的半数清除质量浓度分别为: 水提物: 0.23~0.41, 0.65~3.72, 0.24~0.35 mg/mL; 乙醇提取物: 1.77~3.65, 0.16~4.93, 0.76~1.68 mg/mL, 并呈现良好的量效关系。**结论**　4 种来源葫芦巴籽中主要含有多糖、皂苷、蛋白质、黄酮类、油脂等成分, 并含有 C、O、N、P、K、S、Cl、Na、Mg。主成分分析综合评价表明, 新疆乌鲁木齐来源的葫芦巴籽综合品质较佳, 具有较好的抗氧化活性。

关键词: 葫芦巴籽; 化学成分; 含量测定; 结构表征; 抗氧化活性

收稿日期: 2025-09-08
基金项目: 丝绸之路经济带创新驱动发展试验区; 乌昌石国家自主创新示范区科技发展计划项目(2023LQ01002-01)
第一作者: 成欢(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 17590053531@163.com
***通信作者:** 帕尔哈提·柔孜(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: parhatruzi@l26.com

Analysis of the chemical composition, structure characterization and antioxidant activity of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from different origins

CHENG Huan, ALIYA Pa-La-Ti, SUBINUER A-Bu-Li-Zi, LI Meng-Xuan, MAERHABA Ya-Sheng, MA Sheng-Jun, PAERHATI Ro-Zi*

(*College of Food Science and Pharmacy*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the differences in chemical composition, spectral characteristics, microscopic morphology and antioxidant activity of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from Thailand (A), Shangqiu Henan (B), Land Port Campus of Xinjiang Agricultural University (C) and the medicinal herb planting base of Hotan University (D). **Methods** Qualitative and quantitative analyses were conducted to determine the content differences of the main components in *Trigonella foenum-graecum* L. seeds. Structural characteristics were analyzed using ultraviolet and infrared spectroscopy, as well as scanning electron microscopy. *In vitro* antioxidant experiments were performed to measure the scavenging capacity against 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine (DPPH) radical, OH radical and 2,2'-biazo-bis(3-ethylbenzothiazolin-6-sulfonic acid) (ABTS) cationic radical, providing a comprehensive assessment of their antioxidant activity. **Results** The chemical composition of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from the 4 kinds of sources varied. The highest content of polysaccharides, saponins, proteins, flavonoids, oils and moisture were 3.89% (B), 1.02% (C), 23.66% (D), 8.81% (A), 7.54% (C) and 8.62% (B), respectively. Energy-dispersive spectroscopy analysis revealed the highest weight percentages of the main elements as follows: C (72.36%, D), O (43.87%, A), N (10.25%, C), P (2.01%, C), K (3.33%, B), S (0.6%, C), Cl (0.33%, B), Na (0.39%, B) and Mg (0.25%, C). Scanning electron microscopy morphology analysis indicated significant microscopic structural differences in the water and ethanol extracts of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from different sources. The half-maximal scavenging concentration of the water and ethanol extracts against DPPH radical, OH radical and ABTS cationic radical were as follows: Water extracts: 0.23–0.41, 0.65–3.72 and 0.24–0.35 mg/mL, ethanol extracts: 1.77–3.65, 0.16–4.93 and 0.76–1.68 mg/mL, respectively, demonstrating a clear dose-response relationship. **Conclusion** *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from the 4 kinds of origins primarily contain polysaccharides, saponins, proteins, flavonoids, oils and other components, as well as elements such as C, O, N, P, K, S, Cl, Na and Mg. Principal component analysis comprehensively evaluate that *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from Urumqi, Xinjiang, exhibite relatively superior overall quality and demonstrated good antioxidant activity.

KEY WORDS: *Trigonella foenum-graecum* L. seeds; chemical composition; content determination; structural characterization; antioxidant activity

0　引　言

葫芦巴(*Trigonella foenum-graecum* L.)作为一种兼具食用与药用价值的植物, 具有悠久的药用历史[1]。目前, 国内外学者已对葫芦巴种植增产、提取分离鉴定及生物活性进行了研究。埃及、西班牙、印度等国家学者分离鉴定出甾体皂苷类、生物碱类、黄酮类、多糖类和多酚类等成分[2], 并证实其具有抗炎[3]、降血糖[4]、降血脂[5]、抗氧化活性[6]等生物活性; 李琳等[7]从葫芦巴籽中鉴定出 53 种矿物质, 其中包括 11 种人体必需元素。

葫芦巴籽在中成药、食品领域应用广泛[8], 目前葫芦巴籽除了应用于寒喘祖帕颗粒、肾宝片、全鹿丸等中成药, 在食品工业中也广泛用于面包制品、加工肉品、饮料、乳制品及膳食营养补充剂等领域。市场需求量大且产地较广, 新疆与其他主产区葫芦巴籽的品质差异较大[9]。然而, 现有研究多集中在葫芦巴籽的化学成分提取分离鉴定, 缺乏对不同来源葫芦巴籽质量评价及资源开发的研究。由于地理环境和土壤条件的差异, 不同来源葫芦巴籽的生物学特性和活性成分可能存在差异。导致该产区葫芦巴的质量标志物不明确, 品质参差不齐, 限制了其标准化开发与利用。研究表明, 不同产地与来源的药材其品质与有效成分存在显著差异[10−13], 为解决新疆地区药材来源 30%依赖于进口[14], 自治区层面大力推进食药同资源植物的本地化与标准化生产。目前, 先后在甘草、肉苁蓉等特色药材种植方面取得了较好的进展。

因此, 本研究选用 4 种不同来源泰国、河南商丘、新疆农业大学陆港校区(三坪教学实践基地)、新疆和田学院药材种植基地的葫芦巴籽为研究对象, 通过对不同来源葫

芦巴籽供试液的变化反应进行初步判断, 以含量测定系统分析得出葫芦巴籽提取物中所含的水分、皂苷类、黄酮类、糖类、蛋白质类及脂肪等主要成分含量差异, 利用紫外光谱、红外光谱及扫描电镜进行多维度分析, 从而系统阐明不同来源的葫芦巴籽在化学组成、结构与物理形貌上的综合差异。并采用体外化学模型评价其抗氧化能力, 通过测定样品对 1,1- 二苯基 -2- 三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine, DPPH)自由基、羟自由基和 2,2'-联氮-双 (3- 乙基苯并噻唑啉 -6- 磺酸)[2,2'-biazo-bis(3-ethylbenzothiazolin-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基的清除率, 结合总抗氧化能力进行综合评估, 以系统阐明其抗氧化活性强度及作用机制。建立"产地-成分-活性的综合评价体系", 以期为葫芦巴药材质量控制与指导产地优选以提升中成药质量控制标准提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用的 4 种来源葫芦巴种子, 泰国与河南商丘来源的种子由新疆西帕中药材有限公司乌鲁木齐分公司提供; 另两种通过将市售的种子由研究团队分别在新疆农业大学陆港校区(三坪教学实践基地, 来源简称新疆乌鲁木齐)与新疆和田学院药材种植基地(和田市, 来源简称新疆和田)自行种植并采集其种子所得。经植物学形态鉴定, 均为豆科植物葫芦巴的干燥成熟种子。此鉴定由本研究团队共同完成确认。采集信息见表 1。

表 1 葫芦巴籽样品采集信息

Table 1 Sample collection informations of *Trigonella foenum-graecum* L. seed

采集编号	产区	经度	纬度	海拔/m	气候
A	泰国	东经 100°30′	北纬 13°50′	1600	热带季风气候
B	河南商丘	东经 114°49′	北纬 33°43′	30~70	温带季风气候
C	新疆乌鲁木齐	东经 87.6°	北纬 43.8°	580~739	温带大陆性气候
D	新疆和田	东经 79.92°	北纬 37.12°	1300	大陆性干旱气候

1.2 试剂与设备

95%乙醇、酒石酸钾钠、5%氢氧化钠、浓盐酸(分析纯, 四川西陇化工有限公司); 石油醚、双缩脲试剂、斐林试剂、1%三氯化铁溶液、碱性 3,5-二硝基苯甲酸试剂、I_2-KI 试剂、氯化钠-明胶试剂、镁粉、0.2%茚三酮溶液、1%氢氧化钾、乙酸酐-浓硫酸试剂、冰醋酸、无水乙醇、9 mol/L $FeSO_4$ 溶液、9 mol/L 水杨酸溶液、9 mol/L H_2O_2、浓硫酸(分析纯, 天津市致远化学制剂有限公司); BCA 蛋白浓度测定试剂盒(上海碧云天生物技术股份有限公司)。

FA1004 电子天平(精度 0.1 mg, 常州市乐凯电子设备有限公司); DF-101S 恒温加热式磁力搅拌器(上海兴创科学仪器设备有限公司); T6 新世纪紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); FW-135 型高速万能粉碎机(北京市永光明医疗仪器有限公司); RE-52 旋转式蒸发仪(上海亚荣生物化工仪表有限公司); SF-TDL-40D 常温离心机(上海菲恰尔分析仪器有限公司); DHG-9123A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); IR Affinity-1 傅立叶红外光谱仪(日本岛津公司); SM-74190UEC 扫描电子显微镜(日本电子株式会社); Multiskan FC 型全波长酶标仪(美国赛默飞世尔科技公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 前处理

将干燥的葫芦巴籽粉碎并过 60 目筛备用, 采用石油醚、水和乙醇溶液对粉末 1:10 (g:mL)比例加热并进行提取和颜色鉴定, 之后进行过滤干燥。通过紫外光谱分析、红外光谱分析、扫描电镜分析进行含量测定及抗氧化活性测定。

1.3.2 定性试验

根据《天然药物化学实验指导》[15]介绍的植物化学成分系统预实验方法, 采用 3 种极性不同的溶剂, 制备葫芦巴籽粉末石油醚提取液、水提取液和乙醇提取液。用试管法对 3 种提取液中是否含有生物碱、蛋白质、氨基酸、多肽、皂苷、酚类化合物、鞣质、强心苷类、黄酮类、有机酸、醌类、挥发油、香豆素、萜类内酯化合物、甾体、三萜类、油脂和糖类等成分进行检测, 来确认葫芦巴籽中所含化学成分的种类。

1.3.3 结构表征

对 4 种来源不同提取物葫芦巴籽粉末进行紫外光谱分析、红外光谱分析、扫描电镜分析。在常温下, 4 种来源的葫芦巴籽溶液质量浓度为 1 mg/mL, 以蒸馏水作为空白对照, 使用紫外分光光度计在 190~400 nm 波长范围内进行全波长的扫描; 取样品粉末约 1.0 mg, 用傅立叶红外光谱仪在 400~4000 cm^{-1} 区内进行扫描, 绘制红外光谱图并进行分析, 后选取酰胺 I 带(1600~1700 cm^{-1})进行蛋白二级结构分析, 绘制多峰拟合红外谱图; 取样品粉末黏着样品台并镀导电金, 采用冷场发射扫描电镜在 1000 倍和 10000 倍下进行观察并测定成分, 因石油醚提取物中的成分如油脂、挥发油等物质在高真空的扫描电镜腔体内会剧烈挥发和分解, 污染精密设备, 无法获得稳定的图像, 所以试验只观察水、乙醇提取物粉末。

1.3.4 定量试验

水分测定参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》第一法进行测定; 脂肪测定参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》第一法进行测定; 黄酮、皂苷、多糖测定参考杨庆瑞等[16]的方法; 蛋白测定按照 BCA 试剂盒说明书绘制标准曲线并测定样

品的蛋白含量; 灰分测定参考 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》第一法进行测定。

1.3.5　抗氧化活性测定

参考毛静春等[17]的方法并稍作修改, 测定 DPPH 自由基清除能力, ABTS 阳离子自由基清除能力, 羟自由基清除能力。

(1) DPPH 自由基清除能力

配制质量浓度为 4 mg/mL 的样品母液, 梯度稀释至 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 并加入 100 μL 到 96 孔板, 加入 100 μL 现配的 DPPH-甲醇溶液作为样品组(A_i), 室温恒温避光反应 30 min, 测定 OD_{517} nm 值。同时用 100 μL 蒸馏水作为空白组(A_0), 100 μL 甲醇作为对照组(A_j)。DPPH 自由基清除能力计算如公式(1)所示:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\%=(1-\frac{A_i-A_j}{A_0})\times 100\% \quad (1)$$

(2) ABTS 阳离子自由基清除能力

配制质量浓度为 4 mg/mL 的样品母液, 梯度稀释至 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40 mg/mL 并加入 20 μL 到 96 孔板, 加入 180 μL 现配的 ABTS 阳离子溶液作为样品组(A_i'), 室温反应 5 min, 测定 $OD_{734\ nm}$ 值。同时用 180 μL ABTS 溶液和 20 μL 蒸馏水混合作为空白组(A_0'), 20 μL 样品溶液和 180 μL 蒸馏水作为对照组(A_j')。ABTS 阳离子自由基清除能力计算如公式(2)所示:

$$\text{ABTS 阳离子自由基清除率}/\%=(1-\frac{A_i'-A_j'}{A_0'})\times 100\% \quad (2)$$

(3)羟自由基清除能力

配制质量浓度为 4 mg/mL 的样品母液, 梯度稀释至 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL, 加入 250 μL 新制硫酸亚铁溶液与 250 μL 水杨酸-乙醇混合液, 混合后加入 250 μL 过氧化氢溶液, 37 ℃培育 30 min, 测定 $OD_{510\ nm}$ 值。同时用 250 μL 蒸馏水代替样品溶液混合作为空白组(A_0''), 250 μL 蒸馏水代替过氧化氢溶液作为对照组(A_j'')。羟自由基清除能力计算如公式(3)所示:

$$\text{羟自由基清除率}/\%=(1-\frac{A_i''-A_j''}{A_0''})\times 100\% \quad (3)$$

1.4　数据处理

试验所得数据采用 SPSS 22, Origin 2024, prism Chinese 进行实验数据分析, 重复 3 次。因蛋白质、多糖、皂苷、黄酮在不同提取物下进行测定, 所以对不同提取物采用相关性和主成分分析对化学成分含量、组成与抗氧化活性指标进行统计分析, 以综合评价不同来源葫芦巴籽的品质。

2　结果与分析

2.1　化学成分系统预实验

从表 2 葫芦巴籽化学成分预试结果可知, 综合分析葫芦巴籽含有多种化学成分。水提取液对糖苷、还原糖、皂苷、氨基酸、多肽、蛋白质, 乙醇提取液对黄酮、生物碱、鞣质、香豆素, 石油醚提取液对挥发油、油脂呈阳性反应。说明葫芦巴籽含有氨基酸、多糖、有机酸、酚类、皂苷、蛋白质、鞣质、黄酮类、香豆素、内酯、生物碱、挥发油、油脂成分。乙醇提取液对花青素、蒽醌类和强心苷呈阴性, 可能不存在或含量极低未检出。

表 2　化学成分系统预实验结果

Table 2　Pre-experiment results of the chemical composition system

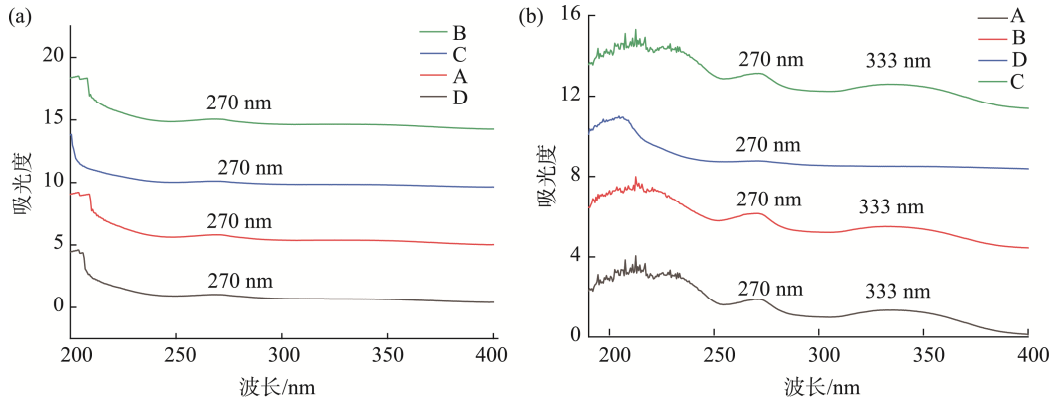
试验项目	正反应指标	结果	推论
Molish 反应*(糖苷)	两液交界处出现紫色环	+	含有糖类或苷类
Fehling 反应*(还原糖)	产生砖红色或黄色沉淀	+	
泡沫试验(皂苷)	产生大量泡沫	+	含有皂苷
$FeCl_3$ 试验*或△(鞣质)	立即显蓝、绿、蓝黑或暗褐色	+	含有酚类
明胶试剂*(鞣质)	产生白色沉淀或混浊	+	含有鞣质
茚三酮试验(氨基酸、多肽或蛋白质)	蓝色或蓝紫色反应	+	含氨基酸
双缩脲反应*(多肽或蛋白质)	呈现紫色、红紫色	+	含多肽、蛋白质
pH 试纸检查*(游离酸或酚性化合物)	呈酸性	pH<7	含有有机酸
溴酚蓝试剂*(有机酸)	蓝色的背景上显黄色的斑点	+	
$FeCl_3$ 试验*或△(鞣质)	显蓝、绿、蓝黑或暗褐色	+	含有鞣质
碘化铋钾试剂*(生物碱)	有沉淀生成	+	含有生物碱
$AlCl_3$ 反应*(黄酮)	黄色斑点或黄色荧光	+	含有黄酮, 不含有花青素
盐酸镁粉反应*(黄酮类或黄酮苷、花青素)	呈现红色	–	
10% KOH 溶液△(蒽醌类)	黄橙或红色荧光	–	不含有蒽醌类
开环闭环反应*(内酯)	加热后溶液变澄清, 酸化后变混浊	+	含有内酯
荧光试验*(香豆素)	蓝色或绿色荧光	+	含有香豆素
Kedde 试验△(强心苷)	红色或紫红色斑点	–	不含有强心苷
醋酐-浓硫酸反应(甾体)	黄→红→紫→青→污绿	+	含有甾体
油斑试验△(挥发油、油脂)	油斑挥发或不挥发	+	油脂

注: +表示阳性反应, – 表示阴性反应; *表示在试管中进行, △表示在滤纸上进行。

2.2 结构表征

2.2.1 紫外光谱分析

两种提取物的紫外光谱扫描结果如图 1 所示。同一种提取物的不同产区在 200~400 nm 范围内的紫外吸收光谱图变化趋势均非常接近，最大吸收波长也基本相同，说明不同来源的葫芦巴籽在主要紫外吸收成分的组成上具有一定的稳定性。图 1(a)结果显示，在 270 nm 处有吸收峰，可能与苯环或共轭体系的化合物有关，存在一些如苯丙氨酸、酪氨酸等芳香族氨基酸[18]。结合本研究的系统预试验其表明含有蛋白质及后续的蛋白质含量测定结果，该吸收峰主要贡献可能来源于蛋白质。图 1(b)结果显示，在 200~250 nm 之间有吸收峰，可能来源于多种官能团，包括部分生物碱中的共轭结构[19]，但鉴于紫外光谱的加和性，此区间的吸收也可能是样品中如有机酸、某些含羰基化合物等其他组分共同贡献的结果。A、B、C 来源在 270 nm 与 333 nm 处有吸收峰，而 D 来源只有在 270 nm 处有吸收峰。说明来源之间有差异性，是许多黄酮类化合物的典型紫外特征[20]，这与系统预试验中黄酮类成分检测呈阳性的结果相互印证。



注: (a)水提取物; (b)乙醇提取物。

图 1 紫外光谱分析

Fig.1 Analysis of ultraviolet spectroscopy

2.2.2 红外光谱分析

图 2(a)显示了葫芦巴籽水提取物的红外光谱。3283 cm^{-1} 主要是多糖类中 O-H 的伸缩振动和蛋白质、氨基酸中 N-H 的伸缩振动吸收峰; 1644 cm^{-1} 对应于酚羟基芳环的骨架伸缩振动峰; 1019 cm^{-1} 处 C-O 的伸缩振动吸收峰。上述一系列吸收峰为蛋白、多糖的特征峰，说明葫芦巴籽含有蛋白质和多糖类。

图 2(b)显示了葫芦巴籽无水乙醇提取物的红外光谱。黄酮红外吸收特征为区段 1800~1350 cm^{-1}，该区段主要包括 C=C 或芳环骨架振动的叠加峰及 1730 cm^{-1} 处的羰基的伸缩振动峰,可认为是黄酮类的特征表现[21]。其中, 1745 cm^{-1} 处的吸收峰是脂肪酸酯、皂苷及黄酮类化合物中的酯羰基 C=O 伸缩振动吸收[22]。1380 cm^{-1} 位置吸收峰可能为黄酮成分特征吸收。上述一系列吸收峰为黄酮类的特征峰，说明葫芦巴籽含有黄酮类。

图 2(c)显示了葫芦巴籽石油醚提取物的红外光谱。在 2924 cm^{-1} 和 2854 cm^{-1} 处峰归因于烷基的 C-H 不对称拉伸振动; 接近 1462 cm^{-1} 处的峰为 C-O-H 键弯曲振动; 1163 cm^{-1} 为油脂和多糖(O)C-O 伸缩振动吸收峰[23–24]; 725 cm^{-1} 是长链亚甲基 C-H 的弯曲振动吸收峰[25]。上述一系列吸收峰为饱和与不饱和脂肪酸酯类分子的特征峰，说明葫芦巴籽中含有大量的油脂。

采用 PeakFit V4.12 软件对 FTIR 结果进行分析，结果表明, 4 种来源中 A、B 和 D 来源蛋白质的红外图谱经分峰拟合后出现 7 个子峰，而 C 来源出现 8 个子峰，根据各子峰峰面积计算各二级结构的比率，各子峰与二级结构对应关系的指认为: 1602~1639 cm^{-1} 为 β-折叠; 1650~1651 cm^{-1} 为 α-螺旋; 1647~1649 cm^{-1} 为无规则卷曲; 1661~1698 cm^{-1} 为 β 转角[26]。根据表 3 可知, A 和 B 来源没有无规则卷曲, C 和 D 来源没有 α-螺旋, C 和 D 来源蛋白二级结构的规整性较 A 和 B 来源样品差。

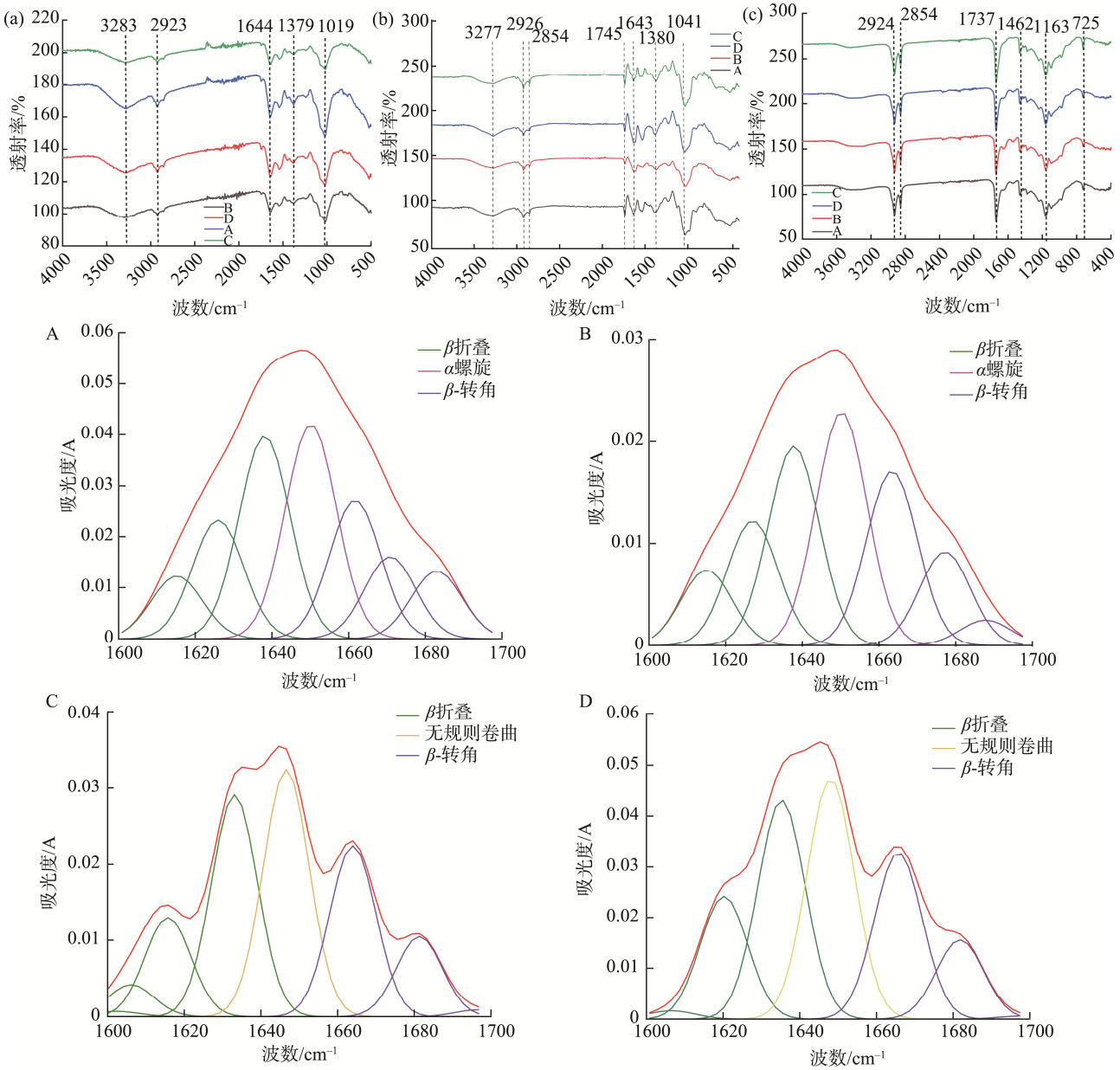
表 3 不同来源样品中蛋白质二级结构含量对比

Table 3 Comparison of protein secondary structure content in samples from different origins

来源	α-螺旋/%	β-折叠/%	β-转角/%	无规则卷曲/%
A	24.23	32.47	43.3	无
B	25.21	31.69	43.1	无
C	无	29.89	41.48	28.63
D	无	29.81	41.53	28.66

2.2.3 扫描电镜分析

由图 3 可知，2 种提取物在不同倍数下的内部形貌有着明显差异。图 3(a)结果表示，4 个来源的乙醇提取物在 1000 倍下呈类聚集小球状且被膜包被。A 和 B 来源结构比



注：(a)水提取物；(b)乙醇提取物；(c)石油醚提取物；(d)不同来源葫芦巴籽水提物蛋白二级结构曲线拟合图；
A. 泰国、B. 河南商丘、C. 新疆乌鲁木齐、D. 新疆和田。

图 2　红外光谱分析

Fig.2　Analysis of infrared spectroscopy

较紧密，表面较粗糙，可能具有更好稳定性但溶解性较差；C 和 D 来源结构比较分散，较为平整，可能更容易溶解但稳定性较差。图 3(b)乙醇提取物放大 10000 倍后，A、B、D 3 个来源结构表面较粗糙，可能成分更复杂，会影响口感与相容性，C 来源结构表面较光滑，可能成分或更单一均匀，在食品应用中口感可能更顺滑。图 3(c)结果表示，4 个来源的水提取物在 1000 倍下呈不规则片状和块状结构，A 来源块状结构较大且聚集，B、C、D 3 个来源块状结构较小且分散，对质地影响更温和；图 3(d)水提取物放大 10000 倍后，A、B、C、D 4 个产区结构表面均粗糙且颗粒大小不一；B、C 两个来源结构出现缝隙，且 B 来源孔隙较大，与其他食品成分相互作用。

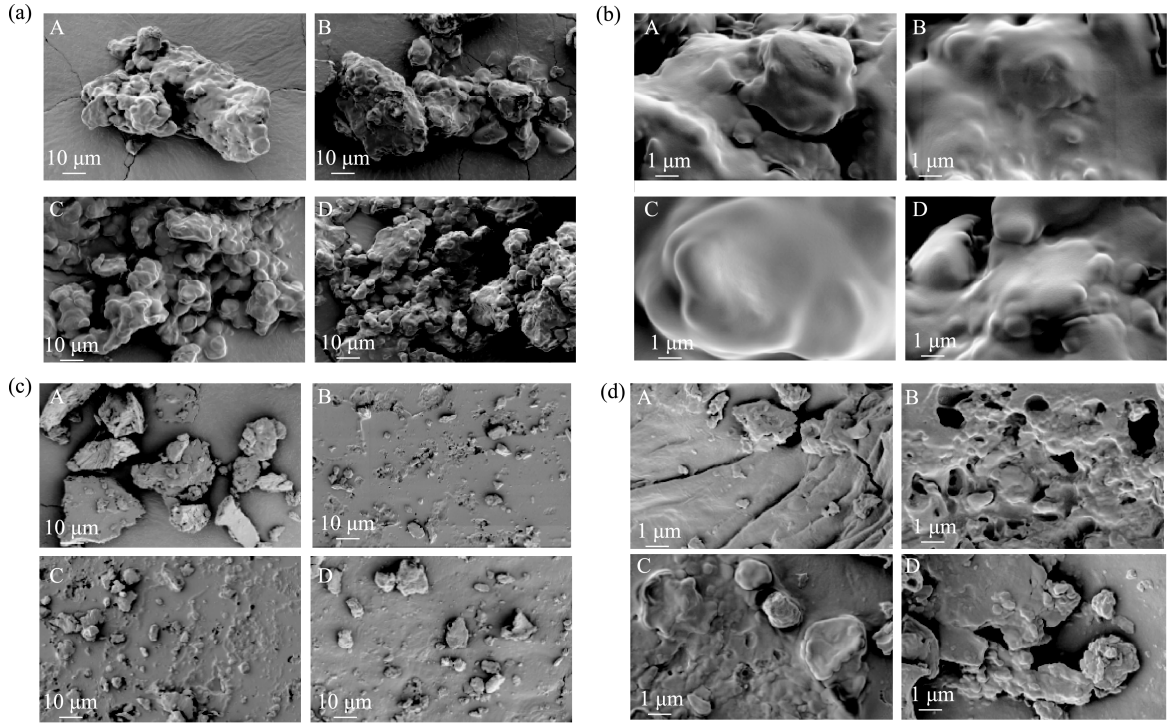
2.3　葫芦巴籽主要成分含量测定

2.3.1　线性关系

分别以蛋白、葡萄糖、齐墩果酸、芦丁对照品溶液质量浓度为横坐标(X，mg/mL)，吸光度为纵坐标(Y)，绘制蛋白、多糖、皂苷、黄酮的总标准曲线。如表 4 所示。

2.3.2　不同来源化学成分含量测定

图 4 是葫芦巴中化学成分含量测定结果，可以看出不同来源的化学成分存在差异。A 来源黄酮含量最高，达 8.81%；



注: (a)乙醇提取物(1000 倍); (b)乙醇提取物(10000 倍); (c)水提取物(1000 倍); (d)水提取物(10000 倍)。

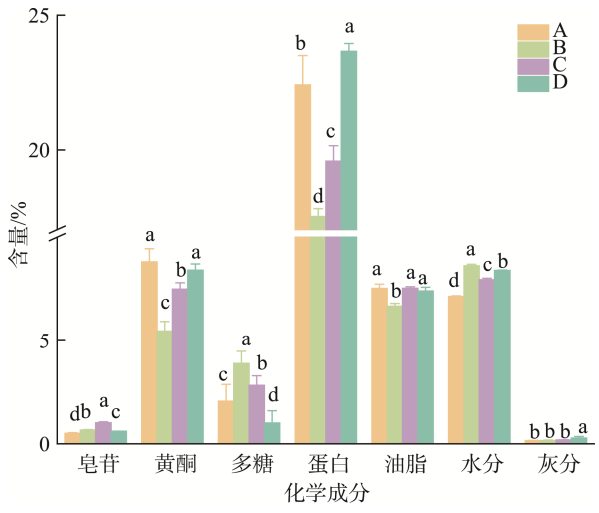
图 3 扫描电镜表征分析

Fig.3 Characterization analysis of scanning electron microscopy

表 4 线性关系

Table 4 Linear relationship

成分	回归方程	r^2	线性范围/(mg/Ml)
蛋白	Y=0.0002X+0.10572	0.9966	0~2.0
多糖	Y=1.6625X+0.0589	0.9961	0.2~1.0
皂苷	Y=1.45578X+0.01485	0.9968	0.1~1.0
黄酮	Y=0.1622X+0.0174	0.9997	1.0~5.0



注: 不同组内小写字母间具有显著性差(P<0.05)。

图 4 不同葫芦巴中化学成分含量

Fig.4 Chemical component content of different *Trigonella foenum-graecum* L.

B 来源多糖、水分含量最高, 达 3.89%、8.62%; C 来源皂苷和油脂含量最高, 分别达到 1.02%和 7.54%; D 来源蛋白、灰分含量最高, 分别达到 23.66%、0.28%。黄慧等[27]研究表明成熟的葫芦巴种子中含有的薯蓣皂苷元约 0.1%~1.5%, 油量约为 6%~8%; 丁建海等[28]以芦丁为对照品, 采用超声波辅助提取葫芦巴中总黄酮, 黄酮含量为 7.86%。

如图 5, 两种提取物的组分均含有 Cl、K、C、O、N、P 6 种, 各组提取物样品的能谱数据中各含量的差异。在水提取物中, C 来源 C、N、P、S、Mg 元素含量最高, 表明该来源可能富含蛋白质、核酸等含氮磷生物大分子。在乙醇提取物中, A 来源不含 S, S 多存在于含硫氨基酸等物质中, 说明 A 来源含硫成分相对缺乏, 可能在风味、生物活性等方面与其他来源有别。

2.4 4 种葫芦巴籽的抗氧化能力测定

2.4.1 DPPH 自由基清除能力测定结果

由图 6 可知, 葫芦巴籽不同提取物对 DPPH 自由基具有一定的清除作用, 且随着样品质量浓度的增加其清除作用增强, 两者呈明显的量效关系。水提取物的整体清除活性显著优于乙醇提取物和石油醚提取物。在 0.8 mg/mL 质量浓度下, 水提取物各来源清除率均超过 70%, 最高达 75.11%, 且对应的半数抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})为 0.23 mg/mL; 而乙醇提取物清除率普遍低于 40%, 且 IC_{50} 较高。这表明水作为提取溶剂, 更易溶出葫芦巴籽中具有 DPPH 自由基清除能力的活性成分。

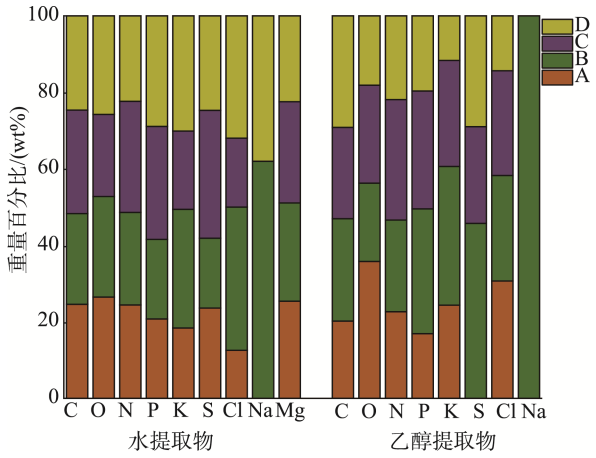


图 5　不同来源葫芦巴籽元素含量

Fig.5　Element content of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds from different origins

2.4.2　羟自由基清除能力测定结果

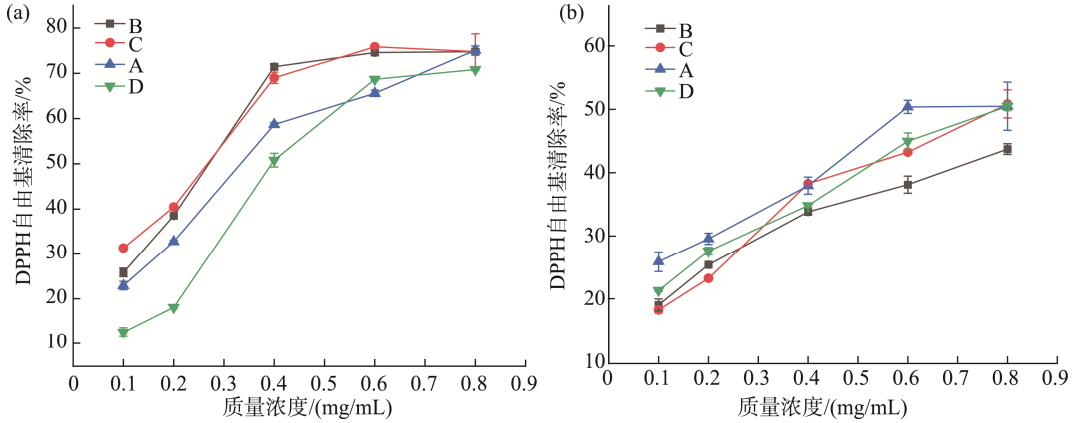
由图 7 可以看出，葫芦巴籽不同提取物随着质量浓度的增大而增大，具有明显的量效关系。乙醇提取物的整体清除活性显著优于水提取物和石油醚提取物。各来源清除率均超过 70%，D 来源最高达 87.69%，IC_{50}最低，为 0.16 mg/mL。水提取物清除率介于 39%~62%之间，且部分来源 IC_{50}较高，整体清除效率较弱。说明乙醇作为溶剂，更易溶出对羟自由基有高效清除能力的活性成分。

2.4.3　ABTS 阳离子自由基清除能力测定结果

由图 8 可以看出，葫芦巴籽不同提取物随着质量浓度的增大而增大，具有明显的量效关系。水提取物各来源清除率均超过 55%，B 来源最高，达 69.65%，整体清除效果最强，说明水溶剂更易溶出高含量的 ABTS 阳离子自由基清除活性成分。乙醇提取物清除率普遍低于 37%，且 IC_{50}较高，整体清除能力和效率均较弱，推测其溶出的活性成分对 ABTS 阳离子自由基的针对性较低。

2.5　葫芦巴化学成分及抗氧化活性相关性分析

采用 Origin 2024 软件对不同来源葫芦巴籽化学成分、抗氧化活性进行皮尔逊相关性分析。图 9 所示，蛋白质与 C、N、S 呈正相关。多糖与 DPPH 自由基清除率、ABTS 阳离子自由基清除率呈极显著正相关(r=0.90，r=0.97，P<0.01)，且与 Mg 正相关(r=0.74)，表明水提法更利于多糖



注: (a)水提取物; (b)乙醇提取物，下图同。

图 6　DPPH 自由基清除率

Fig.6　Scavenging rates of DPPH radical

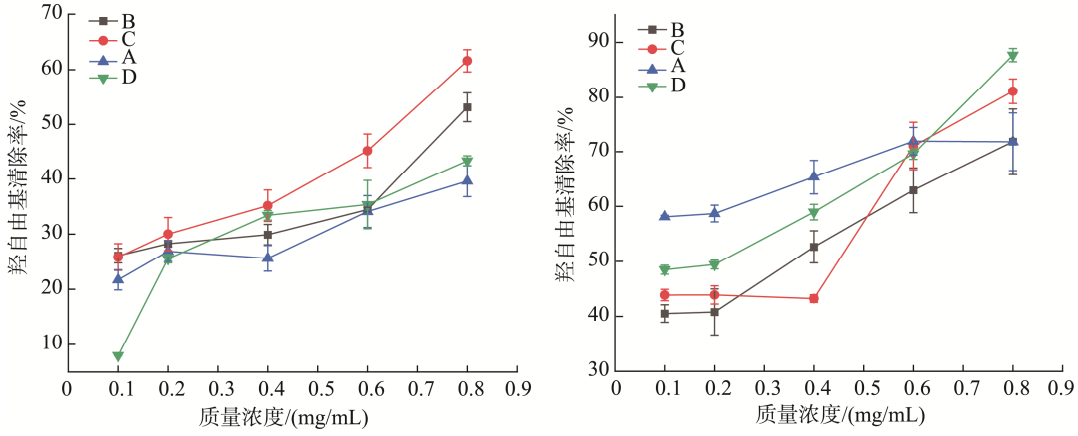


图 7　羟自由基清除率

Fig.7　Scavenging rates of hydroxyl radical

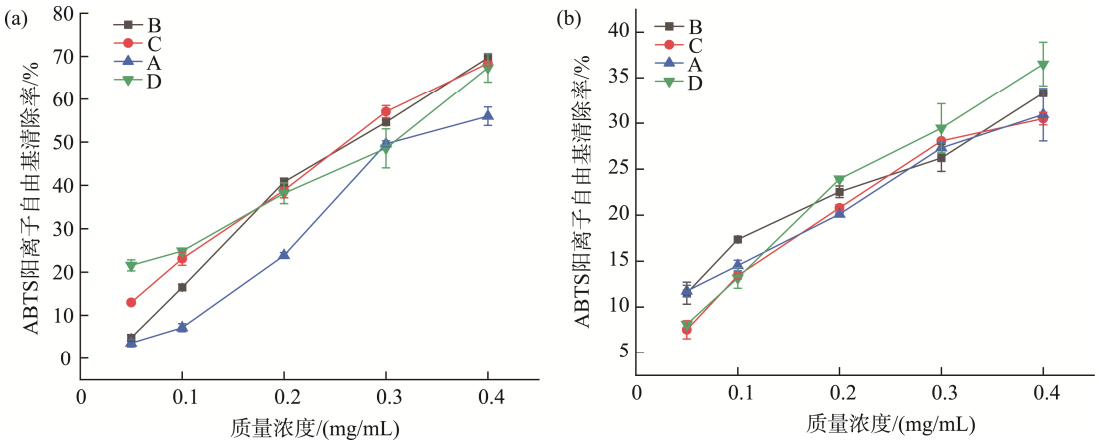


图 8 ABTS 阳离子自由基清除率

Fig.8 Scavenging rates ABTS cationic radical

溶出，并与其抗氧化活性高度一致。DPPH 自由基清除率与 ABTS 阳离子自由基清除率、Mg 呈极显著正相关(P<0.01)，相关系数高达 0.98、0.92。C 与 S、K 与 Cl 和 Na、Cl 与 Na 呈极显著正相关(P<0.01)，相关系数高达 0.97、0.99、0.96、0.97。

如图 10 所示，皂苷与羟自由基清除率呈极显著正相关(r=0.92，P<0.01)，且与 ABTS 阳离子自由基清除率、N 显著正相关(r=0.67，r=0.87)。黄酮与 DPPH 自由基清除率呈极显著正相关(r=0.93，P<0.01)，与 Na 呈极显著负相关(r=–0.93，P<0.01)；且与 ABTS 阳离子自由基清除率、O 呈正相关(r=0.59，r=0.49)；与 P、K、S、呈负相关(r=–0.88，r=–0.79、r=–0.85)。P 与 K、S、Na 呈正相关，相关系数高达 0.75、0.77、0.64。相关性结果总体表明，葫芦巴籽的化学成分在特定提取方法下与抗氧化活性密切相关。

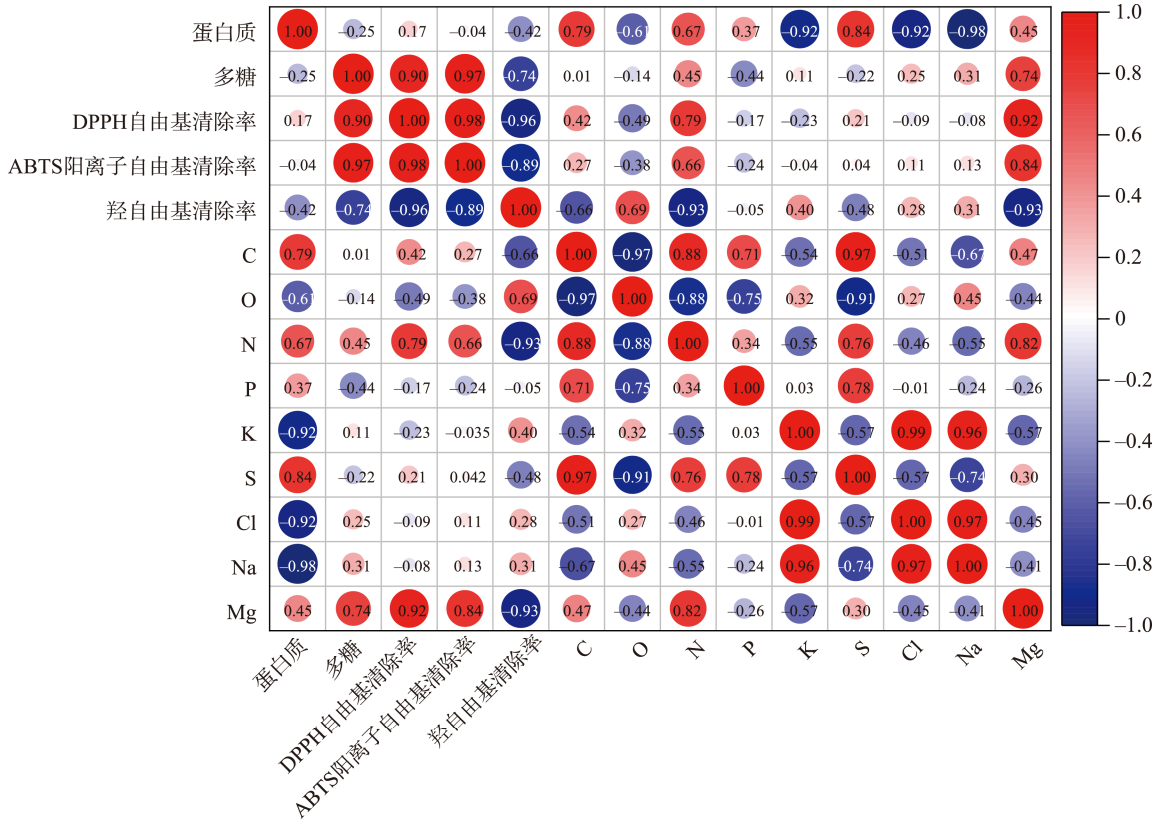


图 9 4 个来源葫芦巴籽水提取物化学成分与抗氧化活性相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between chemical components and antioxidant activity of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds water extracts from 4 origins

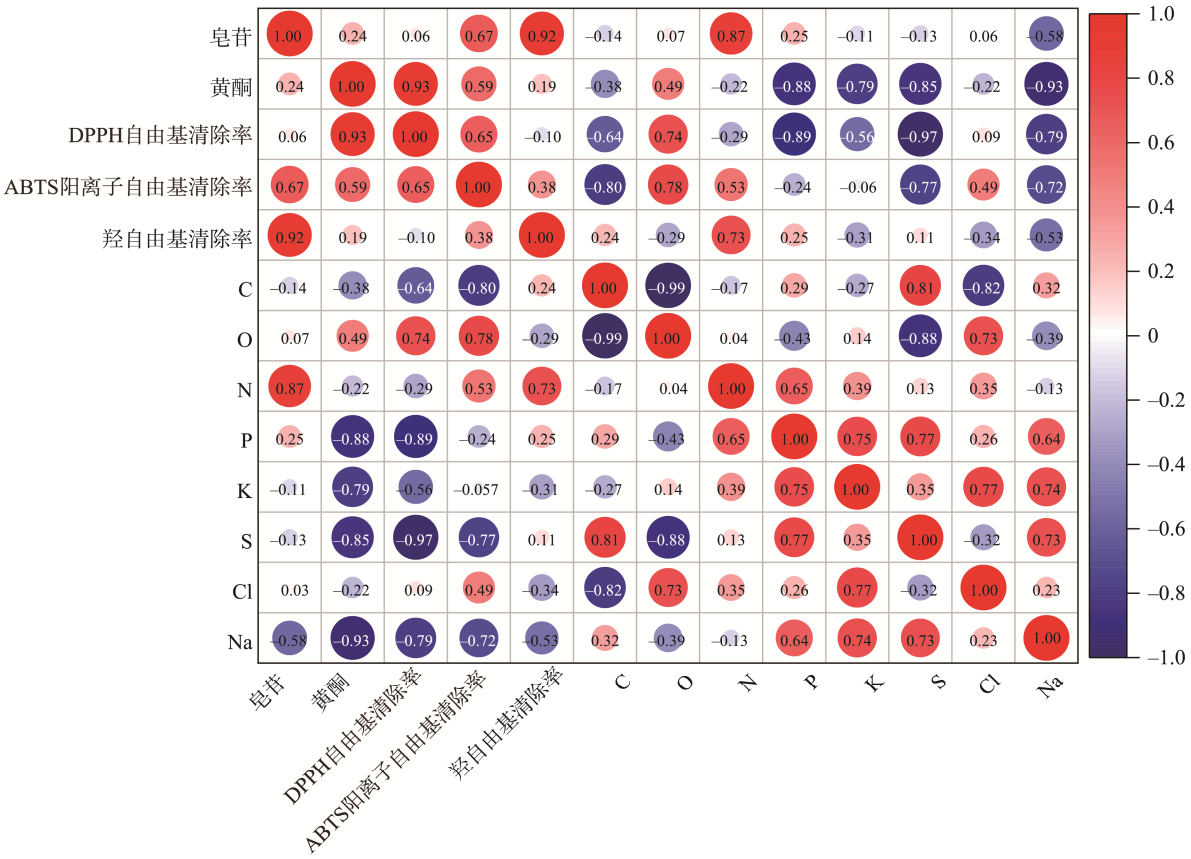


图 10　4 个来源葫芦巴籽乙醇提取物化学成分与抗氧化活性相关性分析

Fig.10　Correlation analysis between chemical components and antioxidant activity of *Trigonella foenum-graecum* L. seeds ethanol extracts from 4 origins

2.6　葫芦巴化学成分及抗氧化活性主成分分析

采用 SPSS 22 数据分析软件对 4 个来源的化学成分和抗氧化活性数据进行主成分分析，表 5~表 8 分别为方差贡献率分析结果表和主成分载荷矩阵表，结合表 5~表 8 数据，以特征值大于 1 的成分进行提取，共提取到 3 个主成分，累计贡献率为 100%，说明 3 个成分所含信息量占总信息量的 100%，保留了原来指标的信息。因此，以这 3 个主成分来综合评价葫芦巴籽的品质，其中水提取物

第一主成分特征值为 7.561，贡献率为 54.007%，该成分主要反映蛋白质、N、C 的信息表达；第二主成分特征值为 4.283，贡献率为 30.594%，该成分主要反映多糖、ABTS 阳离子自由基清除率、DPPH 自由基清除率的信息表达；第三主成分特征值为 2.156，贡献率为 15.399%，该成分主要反映 P、K、C 的信息表达。乙醇提取物第一主成分特征值为 6.198，贡献率为 47.675%，该成分主要反映黄酮、DPPH 自由基清除率、ABTS 阳离子自由基清除率的信息表达；第二主成分特征值为 3.562，贡献率为 27.399%，该成分主要反映 Cl、N、K 的信息表达；第三主成分特征值为 3.24，贡献率为 24.926%，该成分主要反映羟自由基清除率、皂苷、N 的信息表达。结合各主成分特征值和主成分载荷矩阵系数，计算各指标在各成分中的成分权重系数，各得到 3 个主成分的线性组合方程式：

$$F_{水提1}=0.3X_{蛋白质}+0.1X_{多糖}+0.24X_{DPPH自由基清除率}+0.18X_{ABTS阳离子自由基清除率}-0.31X_{羟自由基清除率}+0.33X_{C}-0.3X_{O}+0.35X_{N}+0.12X_{P}-0.27X_{K}+0.3X_{S}-0.24X_{Cl}-0.27X_{Na}+0.29X_{Mg}$$

$$F_{水提2}=-0.25X_{蛋白质}+0.46X_{多糖}+0.36X_{DPPH自由基清除率}+0.42X_{ABTS阳离子自由基清除率}-0.25X_{羟自由基自由基清除率}-0.12X_{C}+0.04X_{O}+0.09X_{N}-0.25X_{P}+0.17X_{K}-0.22X_{S}+0.23X_{Cl}+0.27X_{Na}+0.25X_{Mg}$$

$$F_{水提3}=-0.15X_{蛋白质}-0.03X_{多糖}-0.01X_{DPPH自由基清除率}+0.03X_{ABTS阳离子自由基清除率}-0.03X_{羟自由基清除率}+0.24X_{C}-0.37X_{O}+0.11X_{N}+0.54X_{P}+0.4X_{K}+0.23X_{S}+0.39X_{Cl}+0.26X_{Na}-0.22X_{Mg}$$

$$F_{酊提1}=0.12X_{皂苷}+0.37X_{黄酮}+0.39X_{DPPH自由基清除率}+0.33X_{ABTS阳离子自由基清除率}+0.04X_{羟自由基清除率}-0.29X_{C}+0.32X_{O}-0.01X_{N}-0.31X_{P}-0.19X_{K}-0.39X_{S}+0.07X_{Cl}-0.35X_{Na}$$

$$F_{酊提2}=0.26X_{皂苷}-0.19X_{黄酮}-0.11X_{DPPH自由基清除率}+0.29X_{ABTS阳离子自由基清除率}+0.1X_{羟自由基清除率}-0.3X_{C}+0.22X_{O}+0.43X_{N}+0.33X_{P}+0.41X_{K}-0.02X_{S}+0.44X_{Cl}+0.08X_{Na}$$

$$F_{酊提3}=0.46X_{皂苷}+0.1X_{黄酮}-0.08X_{DPPH自由基清除率}+0.11X_{ABTS阳离子自由基清除率}+0.54X_{羟自由基清除率}+0.23X_{C}-0.25X_{O}+0.33X_{N}+0.12X_{P}-0.24X_{K}+0.12X_{S}-0.29X_{Cl}-0.27X_{Na}$$

式中：$X_{蛋白质}$、$X_{多糖}$、$X_{皂苷}$、$X_{黄酮}$、$X_{DPPH自由基清除率}$、$X_{ABTS阳离子自由基清除率}$、$X_{羟自由基清除率}$、X_{C}、X_{O}、X_{N}、X_{P}、X_{K}、X_{S}、X_{C}、X_{Na}、X_{Mg} 表示对原始变量标准化后的变量。

根据各成分得分和贡献率为权重建立综合得分线性方程为：$Y_{水提取物}=0.54007Y_{水提1}+0.30594Y_{水提2}+0.15399Y_{水提3}$、$Y_{乙醇提取物}=0.47675Y_{水提1}+0.27399Y_{水提2}+0.24926Y_{水提3}$ 各样本成分得分、

表 5 水提取物主成分特征值和贡献率

Table 5 Characteristic values and contribution rates of principal components of aqueous extracts

主成分分析	初始特征率			提取平方载入		
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
成分 1	7.561	54.007	54.007	7.561	54.007	54.007
成分 2	4.283	30.594	84.601	4.283	30.594	84.601
成分 3	2.156	15.399	100.000	2.156	15.399	100.000

表 6 乙醇提取物主成分特征值和贡献率

Table 6 Characteristic values and contribution rates of main components of ethanol extract

主成分分析	初始特征率			提取平方载入		
	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
成分 1	6.198	47.675	47.675	6.198	47.675	47.675
成分 2	3.562	27.399	75.074	3.562	27.399	75.074
成分 3	3.240	24.926	100.000	3.240	24.926	100.000

表 7 水提取物主成分载荷矩阵

Table 7 Loading matrix of main components in water extract

成分	主成分 1	主成分 2	主成分 3
蛋白	0.826	–0.518	–0.223
多糖	0.285	0.958	–0.043
DPPH 自由基清除率	0.670	0.742	–0.011
ABTS 阳离子自由基清除率	0.508	0.860	0.051
羟自由基清除率	–0.849	–0.525	–0.051
C	0.902	–0.244	0.356
O	–0.833	0.079	–0.547
N	0.969	0.191	0.157
P	0.331	–0.521	0.786
K	–0.730	0.357	0.583
S	0.822	–0.457	0.340
Cl	–0.660	0.479	0.578
Na	–0.739	0.561	0.375
Mg	0.789	0.527	–0.317

表 8 乙醇提取物主成分载荷矩阵

Table 8 Load matrix of main components in ethanol extract

成分	主成分 1	主成分 2	主成分 3
皂苷	0.294	0.488	0.822
黄酮	0.917	–0.357	0.179
DPPH 自由基清除率	0.967	–0.207	–0.148
ABTS 阳离子自由基清除率	0.814	0.544	0.203
羟自由基清除率	0.092	0.192	0.977
C	–0.714	–0.559	0.421
O	0.786	0.423	–0.451
N	–0.037	0.805	0.592
P	–0.760	0.614	0.211
K	–0.478	0.769	–0.424
S	–0.977	–0.036	0.209
Cl	0.185	0.829	–0.527
Na	–0.859	0.153	–0.488

综合得分及排名见表 9 和表 10。由表 9 和表 10 可知, 4 种来源的水提取物综合得分范围为–1.77~2.44, 综合评分顺序为 C>B>A>D, C、B 来源综合评分均为正值。乙醇提取物综合得分范围为–1.96~2.06, 综合评分顺序为 C>A>D>B, C、A 来源综合评分均为正值。表明 4 个来源 C 来源的活性成分、抗氧化的综合品质较其余 3 个来源较佳, 因此在新疆乌鲁木齐陆港校区种植的葫芦巴籽更具有潜在的应用价值。

表 9 水提取物主要得分及综合排名

Table 9 Major scores and overall ranking of aqueous extracts

地区	主成分得分			综合得分	排名
	Y_1	Y_2	Y_3		
A	0.10	–0.26	–0.33	–1.50	3
B	–0.80	0.88	0.02	0.83	2
C	2.04	–0.04	0.13	2.44	1
D	–1.34	–0.59	0.17	–1.77	4

表 10 乙醇提取物主要得分及综合排名

Table 10 Major scores and overall rankings of ethanol extracts

地区	主成分得分			综合得分	排名
	Y_1	Y_2	Y_3		
A	1.36	0.04	–0.43	0.61	2
B	–1.54	0.12	–0.33	–1.96	4
C	0.20	0.54	0.48	2.06	1
D	–0.03	–0.71	0.28	–0.71	3

3 讨 论

本研究对 4 个来源的葫芦巴籽进行化学成分系统预试验、结构表征、含量测定及体外抗氧化活性测定, 结合相关分析和主成分分析法对数据进行对比。结果显示葫芦巴籽主要含有多糖、皂苷、蛋白质、黄酮类、油脂等成分,

含有 C、O、N、P、K、S、Cl、Na、Mg。A 来源黄酮含量最高, 可能由于 A 来源属于热带季风气候, 全年高温, 年平均气温在 27 ℃左右, 研究表明气候干旱、光照充足等因素, 葫芦巴中的黄酮类化合物含量可能相对较高[29]; B 来源多糖、水分含量最高, 可能由于 B 来源属于温带季风气候, 四季分明, 炎热潮湿, 研究表明炎热潮湿环境下, 葫芦巴植株可能会产生应激反应, 调节自身的代谢过程, 导致多糖的合成增加[30]。C 来源皂苷与油脂含量高, 可能由于 C 来源属于温带大陆性气候, 日照时间最长、太阳辐射最强, 逆境胁迫下产生的防御性次生代谢产物[30]。D 来源蛋白、黄酮、皂苷、水分含量大致排在前两位, 并与黄慧等[27]研究的相应最高化学成分含量结果相近。

在抗氧化活性方面, 本研究中葫芦巴籽不同提取物的清除能力随质量浓度升高而增强。对比水、乙醇溶剂提取物, 水提取物对 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基的清除效率显著优于乙醇提取物。与许华祯[31]研究结果契合, 水易溶出多糖、蛋白质等水溶性成分, 通过提供氢质子、金属螯合等机制发挥协同抗氧化效应。乙醇提取物对羟基自由基的清除活性表现出特定优势, 与毛传亮等[32]研究结果契合, 乙醇易溶出黄酮、皂苷等脂溶性成分, 通过清除自由基、抑制氧化链反应发挥作用。主成分分析结果显示, C 来源(新疆乌鲁木齐)在水提取物与乙醇提取物是综合排名第一。结合载荷矩阵分析, 其较高的黄酮在乙醇提取物中表现出的较强 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除能力是其主要贡献因素。本研究结果表明, C 来源的葫芦巴籽综合品质较佳。

4　结　论

不同来源葫芦巴籽的品质存在显著差异。通过系统预试验、紫外光谱、红外光谱、扫描电镜、含量测定及体外抗氧化评价, 结合相关性分析与主成分分析, 构建了“产地-成分-活性”的综合评价体系。结果显示, 来源 C(新疆乌鲁木齐)的葫芦巴籽因其较高的黄酮和综合抗氧化能力, 表现出最佳的品质。因此, 表明其在新疆乌鲁木齐的特定环境下具有良好的开发潜力, 为葫芦巴药材的质量控制、产地优选提供科学依据。

参考文献

[1] 周佳, 唐超. 葫芦巴的应用及研究进展[J]. 广东饲料, 2019, 28(4): 32–33.
ZHOU J, TANG C. Application and research progress of *Trigonella foenum-graecum* L. [J]. Guangdong Feed, 2019, 28(4): 32–33.

[2] REGLERO GMD, NAVARRO DHJ. Chemical characterization and bioaccessibility of bioactive compounds from saponin-rich extracts and their acid-hydrolysates obtained from fenugreek and quinoa [J]. Foods, 2020, 9(9): 1159.

[3] SHARMAN SD. Trigonella seed extract ameliorates inflammation via regulation of the inflammasome adaptor pro-tein, ASC [J]. Frontiers in Bioscience, 2017, 9(9): 246–257.

[4] 王君花. 胡芦巴降血糖组分的制备及活性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018
WANG JH. Preparation and activity study of hypoglycemic components from *Trigonella foenum-graecum* L. [D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[5] SADEGHIPOUR MMFSK. Trigonella foenum-graecum seed extract modulates expression of lipid metabolism-related genes in HepG2 cells [J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2019, 9(60): 240–248.

[6] 付赛赛, 宋志甫. 葫芦巴提取物对肉兔生长性能、免疫功能和抗氧化能力的影响[J]. 中国饲料, 2023(12): 18–21.
FU SS, SONG ZF. Effects of *Trigonella foenum-graecum* L. extract on growth performance, immune function and antioxidant capacity of meat rabbits [J]. China Feed, 2023(12): 18–21.

[7] 李琳, 高建德, 陈正君, 等. 胡芦巴化学成分及其药理作用研究进展[J]. 甘肃中医药大学学报, 2018, 35(2): 98–101.
LI L, GAO JD, CHEN ZJ, *et al*. Research progress on chemical components and pharmacological effects of *Trigonella foenum-graecum* L. [J]. Journal of Gansu University of Chinese Medicine, 2018, 35(2): 98–101.

[8] 陈凤真. 葫芦巴碱提取与测定方法研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2019(9): 145–149.
CHEN FZ. Research progress on extraction and determination methods of trigonelline [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(9): 145–149.

[9] 代红军, 冯君. 不同地域宁夏种源胡芦巴品质的测定[J]. 宁夏农林科技, 2006(4): 19-34.
DAI HJ, FENG J. Determination of quality of *Trigonella foenum-graecum* L. from different geographical provenances in Ningxia [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2006(4): 19-34.

[10] 靳元元, 马生军, 徐万里, 等. 不同产地黄芪活性成分与硒含量比较分析[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(5): 873–881.
JIN YY, MA SJ, XU WL, *et al*. Comparative analysis of active components and selenium content of Astragalus membranaceus from different producing areas [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58(5): 873–881.

[11] 王曼茹, 毕钰桢. 中药质量控制方法与技术现代研究进展[J]. 当代医药论丛, 2025, 23(29): 23–25.
WANG MR, BI YZ. Modern research progress on quality control methods and techniques of traditional Chinese medicine [J]. Contemporary Medical Symposium, 2025, 23(29): 23–25.

[12] 吴春莲, 照日格图. 五味沙棘散方剂解读及应用前景分析[J]. 中国民族医药杂志, 2025, 31 (6): 26–29.
WU CL, ZHAO RGT. Interpretation and application prospect analysis of Wuwei Shaji San prescription [J]. Journal of Medicine and Pharmacy of Chinese Minorities, 2025, 31(6): 26–29.

[13] 王贺伟, 刘亭阳, 任盈盈, 等. 茴芹果饮片标准汤剂质量标准研究[J]. 中南药学, 2025, 23(3): 725–729.
WANG HW, LIU TY, REN YY, *et al*. Study on quality standard of standard decoction of *Foeniculi fructus* prepared pieces [J]. Central South Pharmacy, 2025, 23(3): 725–729.

[14] 周钢, 单莲莲, 王亚丽, 等. 新疆民族药质量标准研究现状及展望[J]. 中国药事, 2024, 38(1): 28–34.
ZHOU G, SHAN LL, WANG YL, *et al*. Research status and prospects of quality standards for ethnic medicines in Xinjiang [J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2024, 38(1): 28–34.

[15] 四朗玉珍, 班旦, 拉巴次旦, 等. 藏藁吾地上部分的化学成分系统预试验[J]. 中兽医医药杂志, 2019, 38(3):11–13.
SILANG YZ, BAN D, LA BCD, *et al*. Systematic preliminary test on chemical components of aerial parts of *Ligularia rumicifolia* [J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2019, 38(3): 11–13.

[16] 杨庆瑞, 陈婧, 田彩云, 等. 不同来源黄精的化学成分分析[J]. 人参研究, 2025, 37(4): 34–36.
YANG QR, CHEN J, TIAN CY, *et al*. Analysis of chemical constituents in *Polygonati rhizoma* from different sources [J]. Ginseng Research, 2025, 37(4): 34–36.

[17] 毛静春, 罗发美, 代腾云, 等. 6 种可食用花卉化学成分的测定及其抗氧化活性对比分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 294–302.
MAO JC, LUO FM, DAI TY, *et al*. Determination of chemical components and comparative analysis of antioxidant activities of 6 kinds of edible flowers [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 294–302.

[18] 于淑池, 赖卓慧. 金鲳鱼骨明胶的提取工艺及性质研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(3): 159–165.
YU SC, LAI ZH. Study on extraction process and properties of gelatin from golden pomfret bones [J]. Food Research and Development, 2020, 41(3): 159–165.

[19] 董兆威, 杨静, 黄勤挽, 等. 胆黄连的炮制历史沿革及现代研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2026, 32(2): 269–278.
DONG ZW, YANG J, HUANG QW, *et al*. Historical evolution of processing and modern research progress of bile-processed *Coptidis rhizoma* [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2026, 32(2): 269–278.

[20] 宋彦显, 陈一晴, 闵玉涛. 花叶滇苦菜黄酮的大孔树脂纯化及其抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 154–160.
SONG YX, CHEN YQ, MIN YT. Purification of flavonoids from *Sonchus asper* (L.) Hill by macroporous resin and study on its antioxidant activity [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(9): 154–160.

[21] 彭游, 叶志刚, 邓泽元. 沙棘黄酮光波干法辅助提取及其机理研究[J]. 食品科技, 2011, 36(4): 197–200.
PENG Y, YE ZG, DENG ZY. Study on light-wave dry-assisted extraction of seabuckthorn flavonoids and its mechanism [J]. Food Science and Technology, 2011, 36(4): 197–200.

[22] 洪庆红, 李丹婷, 郝朝运. 应用 FTIR 直接测定法鉴定大豆的品种[J]. 光谱学与光谱分析, 2005(8): 1246–1249.
HONG QH, LI DT, HAO CY. Identification of soybean varieties by FTIR direct determination [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005(8): 1246–1249.

[23] 周妍宇. 拉曼和红外光谱评估坚果油脂氧化的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
ZHOU YY. Study on evaluation of nut oil oxidation by Raman and infrared spectroscopy [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.

[24] 郑钧文. 不同因素对银杏叶片及种子影响的 FTIR 光谱研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
ZHENG JW. FTIR spectral study on effects of different factors on *Ginkgo biloba* leaves and seeds [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2023.

[25] 陈灶鑫. 灵芝红外光谱规律及灵芝微量含量的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2013.
CHEN ZX. Study on infrared spectral regularity and trace element content of *Ganoderma lucidum* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.

[26] 郭汝杞, 朱秀清, 王颖. 谷朊蛋白对绿豆蛋白凝胶特性及结构的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 34–42.
GUO RQ, ZHU XQ, WANG Y. Effects of wheat gluten protein on gel properties and structure of mung bean protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 34–42.

[27] 黄慧, 王霞, 贺建华, 等. 葫芦巴活性成分提取工艺及其生物活性作用研究进展[J]. 中兽医医药杂志, 2021, 40(5): 37–42.
HUANG H, WANG X, HE JH, *et al*. Research progress on extraction technology and biological activities of active components from fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) [J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2021, 40(5): 37–42.

[28] 丁建海, 牛浩军, 刘世巍, 等. 分光光度法测定葫芦巴中总黄酮含量[J]. 广州化工, 2017, 45(9): 125–127.
DING JH, NIU HJ, LIU SW, *et al*. Determination of total flavonoids content in *Trigonella foenum-graecum* L. by spectrophotometry [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2017, 45(9): 125–127.

[29] 贺诗茹, 王茜, 阿依努尔·白克热, 等. 新疆桑葚总黄酮含量与其抗氧化活性的研究[J]. 陕西农业科学, 2023, 69(9): 13–21, 74.
HE SR, WANG Q, AYINUER BKR, *et al*. Study on total flavonoids content and antioxidant activity of mulberry in Xinjiang [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2023, 69(9): 13–21, 74.

[30] SHAHRAJABIAN MH, KUANG Y, CUI H, *et al*. Metabolic changes of active components of important medicinal plants on the basis of traditional chinese medicine under different environmental stresses [J]. Current Organic Chemistry, 2023, 27(9): 782–806.

[31] 许华祯. 甘草和黄芪活性成分的提取分离与体外抗氧化协同作用研究[D]. 广州: 暨南大学, 2021.
XU HZ. Study on the extraction, separation and in vitro antioxidant synergy of active ingredients from licorice and astragalus [D]. Guangzhou: Jinan University, 2021.

[32] 毛传亮, 黄宏亮, 董国庭, 等. 青钱柳叶提取物的抗氧化活性及其与黄酮含量的关系研究[J]. 浙江林业科技, 2021, 41(3): 32–38.
MAO CL, HUANG HL, DONG GT, *et al*. Antioxidant activity of Cyclocarya paliurus leaf extract and its relationship with flavonoid content [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2021, 41(03): 32–38.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)