

微波预处理八月瓜籽油成分及抗氧化活性影响的研究

常淼淼, 牛阳雨, 杨舒曼, 唐盛梅, 李若楠, 蒋黎艳
(湖南科技学院化学与生物工程学院, 永州 425199)

摘要: 为了提高八月瓜籽的深度加工和高值化利用, 以未经处理的八月瓜籽为对照组, 考察不同微波功率和微波时间对压榨八月瓜籽油成分和抗氧化活性的影响。结果表明, 对照组的出油率为 24.82%, 微波预处理组的出油率为 25.76%~27.91%, 证明微波预处理能有效提高八月瓜籽油出油率, 但对其脂肪酸组成无影响; 随着微波功率的增加和处理时间的延长, 八月瓜籽油的酸价和过氧化值呈上升趋势; 与对照组相比, 微波预处理能够显著提高八月瓜籽油中活性成分的含量, 其总酚含量在 0.55~0.77 mg/g 之间、类胡萝卜素含量在 4.06~6.38 mg/kg 之间、总黄酮含量在 0.51~0.55 mg/g 之间、总甾醇含量在 1.07~2.41 mg/g 之间; 微波预处理也能够提升八月瓜籽油的 DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺ 自由基清除能力和羟基自由基能力, 并都在 540 W 微波功率预处理 9min 达到最大值, 其清除率分别为 75.29%、73.08%、64.78%。Pearson 相关性分析显示抗氧化活性与总酚、总黄酮、类胡萝卜素和总甾醇含量均呈一定的正相关性。偏相关性显示抗氧化活性仅与总黄酮和总甾醇含量呈显著相关性。适当的微波预处理能够提高八月瓜籽油的品质。

关键词: 微波预处理; 八月瓜籽油; 活性成分; 抗氧化活性

DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001270

中图分类号: TS224.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-0174(2026)01-0136-09

网络首发时间: 2025-11-17 15:42:01

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251117.1452.006>

Effects of microwave pretreatment on components and antioxidant activity of *Akebia trifoliata* seed oil

Chang Miaomiao, Niu Yangyu, Yang Shuman, Tang Shengmei, Li Ruonan, Jiang Liyan

(College of Chemistry and Bioengineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199)

Abstract: To improve the deep processing and high-value utilization of *Akebia trifoliata* seeds, the effects of different microwave power and microwave time on the composition and antioxidant activity of pressed *Akebia trifoliata* seed oil were investigated by taking the untreated *Akebia trifoliata* seeds as the control group. The results showed that the oil yield of the control group was 24.82%, while that of the microwave pretreatment groups ranged from 25.76% to 27.91%, indicating that microwave pretreatment could effectively increase the oil yield of *Akebia trifoliata* seed oil but had no effect on the fatty acid composition of *Akebia trifoliata* seed oil. With the increase of microwave power and the extension of processing time, the acid value and peroxide value of *Akebia trifoliata* seeds oil showed an upward trend. Compared with the control group, microwave pretreatment could significantly increase the contents of active ingredients in *Akebia trifoliata* seed oil; the total phenolic content ranged from 0.55 to 0.77 mg/g, carotenoid content ranged from 4.06 to 6.38 mg/kg, total flavonoid content ranged from 0.51 to 0.55 mg/g, and total sterol content ranged from 1.07 to 2.41 mg/g. Microwave pretreatment could also enhance the DPPH free radical scavenging ability, ABTS⁺ free radical scavenging ability and hydroxyl free radical scavenging ability of *Akebia trifoliata* seed oil, all of which reached the maximum when pretreated with 540 W microwave power for 9 min, with the scavenging

基金项目: 湖南省大学生创新创业训练计划项目(湘教通[2025]-141), 湖南省自然科学基金项目(2024JJ7192), 湖南省教育厅科学研究项目(24C0472)

收稿日期: 2025-06-03

第一作者: 常淼淼, 女, 2005年出生, 学士, 食品质量与安全, 1582450529@qq.com

通信作者: 蒋黎艳, 女, 1989年出生, 副教授, 天然产物提取与油脂化学, lyj5423@163.com

rates of 75.29% , 73.08% and 64.78% , respectively. Pearson correlation analysis showed that antioxidant activity was positively correlated to a certain extent with the contents of total phenols, total flavonoids, carotenoids and total sterols. Partial correlation analysis showed that antioxidant activity was only significantly correlated with the contents of total flavonoids and total sterols. Proper microwave pretreatment could improve the quality of *Akebia trifoliata* seed oil.

Key words: microwave pretreatment; *Akebia trifoliata* seed oil; active ingredient; antioxidant activity

八月瓜(*Akebia trifoliata*)属木通科藤本植物,学名为三叶木通,又名八月炸、八月扎、野香蕉等,是天然药食两用资源^[1],主要生长在陕西省秦岭地区、河南省、湖北省及贵州省等地区^[2]。八月瓜果实营养丰富,富含矿物质、VC、有机酸、可溶性糖和人体必需氨基酸等,有益于强身健体、减肥瘦身、养颜美容、加速肠道消化吸收等^[3]。八月瓜果皮厚韧且籽粒众多,平均每果含籽量为200颗左右^[4],籽多数为扁卵形,种皮红褐色或黑褐色,稍有光泽^[5]。研究表明八月瓜籽含油率为38.83%~43.00%,且籽油中脂肪酸主要为棕榈酸、油酸和亚油酸,氨基酸以谷氨酸和天冬氨酸为主,氨基酸成分及含量与成人氨基酸模式相似^[6-8]。其油脂的酸值、过氧化值、碘值等主要理化性质指标均符合国家食用油脂标准^[2]。

微波预处理作为一种油脂制取预处理技术,通过微波的电磁波辐射加热油脂,导致油脂分子发生振动和反应,从而改变油脂的物理和化学变化,进而提高油脂的加工效率和质量^[9]。这一预处理方法在植物油脂加工中得到广泛应用。Rezig等^[10]发现微波处理能显著提升南瓜籽油的氧化稳定性,并增加甾醇和总酚含量,同时也能增强其营养成分。Huang等^[11]发现微波处理对紫苏籽油中脂肪酸的影响较小,其氧化稳定性随着微波处理强度的增加而增加,还能显著提高紫苏油的总甾醇含量、美拉德反应产物和DPPH自由基清除活性。Yan等^[12]研究发现适当微波处理也能提高菜籽油的氧化稳定性。然而,不当的处理强度也可能导致油脂品质下降,如奇亚籽经不同功率的微波加热后,其品质指标损失较大,随着微波功率的增加,油脂中脂肪酸和生育酚的含量均降低^[13]。因此,微波预处理的条件选择对油脂品质的影响至关重要。

针对八月瓜籽油的研究主要集中在制备方法、理化性质和脂肪酸组成等方面。高晓龙等^[14]和李伟业等^[15]研究了八月瓜籽油的提取工艺;胡伯凯等^[16]对不同产地八月瓜籽油脂肪酸指纹图谱进行了构建;马传国等^[17]分析了八月瓜籽成分及八月瓜籽油的理化指标。此外,冯萃萃等^[18]研究发现

八月瓜籽粗脂肪质量分数为46.83%,精炼前后八月瓜籽油的主要脂肪酸(棕榈酸、油酸、亚油酸)含量与常见食用油(如花生油、玉米油、芝麻油)相当。然而,关于微波预处理对八月瓜籽油成分和抗氧化活性的研究鲜见报道。本研究以八月瓜籽为原料,探讨微波预处理(功率和时间)对压榨八月瓜籽油的理化性质、脂肪酸组成、活性成分和抗氧化活性的影响,旨在为八月瓜籽油的深度开发与高效利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

八月瓜籽来自湖南永州蓝山,纬度25°01'02"~25°37'08",经度111°54'15"~112°27'08"之间。筛选颗粒饱满、大小均匀一致,且表面不得存在腐败、霉菌或破损等情况新鲜健康的种子。其中,八月瓜籽原料的水质量分数为(7.20±0.02)%,脂肪质量分数为(39.19±0.72)g/100g。

1.1.2 试剂

正己烷为色谱纯,石油醚、无水乙醇、氢氧化钠、氢氧化钾、无水硫酸钠、甲醇、福林酚、3,5-二羟基水杨酸、芦丁、1,1-二苯基-2-苦基肼(DPPH)、2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、异辛烷、没食子酸,均为分析纯, β -胡萝卜素标准品(纯度≥98%),豆甾醇分析标准品(色谱级,≥95%)。

1.2 主要设备与设备

JA3003分析天平、电热鼓风干燥箱、RG-312榨油机、GC2021Plus气相色谱仪、UV-1800紫外分光光度计、FW-177粉碎机、KH19A高速离心机、WD800CTL23-2H微波炉。

1.3 实验方法

1.3.1 八月瓜籽预处理及八月瓜籽油的制备

称取一定质量的八月瓜籽(m),平铺在烤盘上,放入微波炉中进行微波预处理。将八月瓜籽分别在

380、540、700 W 下微波 3、6、9 min^[11], 冷却至室温, 然后采用螺旋压榨机进行制油, 以 6 000 r/min 离心 10 min, 过滤得到八月瓜籽油样品, 称量质量 (m_1) 后装入棕色瓶密封, 并在 4 °C 冰箱进行保存, 按式 (1) 计算出油率 ($y/\%$)。

$$y = \frac{m_1}{m} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 脂肪酸组成

参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》测定八月瓜籽油中脂肪酸含量。

1.3.3 理化指标的测定

酸价的测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中的冷溶剂指示剂滴定法; 过氧化值的测定参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的滴定法。

1.3.4 活性成分测定

1.3.4.1 总酚测定

参考 Yang 等^[19]的方法测定八月瓜籽油中的总酚含量, 结果以没食子酸当量表示。

1.3.4.2 类胡萝卜素的测定

参考 Suri 等^[20]的方法测定八月瓜籽油中的类胡萝卜素含量。

1.3.4.3 总黄酮测定

参考 Thanonkaew 等^[21]的方法测定八月瓜籽油中的总黄酮含量。

1.3.4.4 总甾醇测定

参考曹子伦等^[22]的方法测定八月瓜籽油中的总甾醇含量。

1.3.5 抗氧化活性测定

1.3.5.1 DPPH 自由基清除率测定

参考孔凡等^[23]的方法测定八月瓜籽油中的 DPPH 自由基清除率。

1.3.5.2 ABTS⁺ 自由基清除率测定

参考孔凡等^[23]的方法测定八月瓜籽油中的 ABTS⁺ 自由基清除率。

1.3.5.3 羟基自由基清除率测定

参考 Liu 等^[24]的方法测定八月瓜籽油中的羟基自由基清除率。

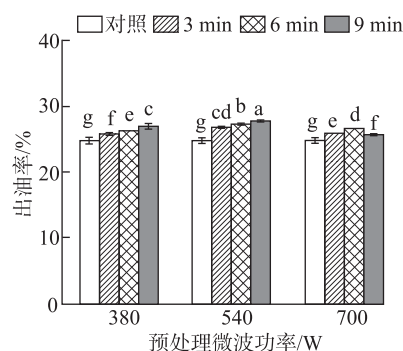
1.4 数据处理与分析

采用软件 Excel 2010、SPSS 24.0 工具进行数据统计处理, 采用 Origin2021 软件进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 微波预处理对八月瓜籽油得率的影响

微波预处理对八月瓜籽出油率的影响由图 1 可见。对照组的出油率为 24.82%, 微波预处理对八月瓜籽的出油率有显著影响。在 380 W 和 540 W 微波处理下, 八月瓜籽的出油率随微波时间的增加而增加, 分别从 25.76% 和 26.83% 上升至 26.99% 和 27.91%; 这可能是由于微波预处理使其内部压力增大, 导致细胞壁和细胞膜破裂, 形成了持久的孔隙, 使机械压榨过程中其组织更易破裂, 因此提高了油脂得率^[25]。这一结果与 Bakhshabadi 等^[26]报道的适当微波预处理可以提高黑孜然种子的出油率的研究相一致。而在 700 W 微波辐射下, 随着微波时间的延长, 八月瓜籽的出油率呈现先上升后下降的趋势。这可能与较高的温度和较长的预处理时间导致油籽发生热聚合和羧基化有关^[11]。



注: 图中的小写字母不同表示差异性显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 1 微波预处理对八月瓜籽出油率的影响

2.2 微波预处理对八月瓜籽油脂肪酸组成的影响

微波预处理对八月瓜籽油的脂肪酸组成及含量的影响由表 1 可见。八月瓜籽油中共检测出 8 种脂肪酸: 棕榈酸 (质量分数 21.12% ~ 21.70%)、硬脂酸 (质量分数 1.41% ~ 1.80%)、油酸 (质量分数 39.92% ~ 40.90%)、亚油酸 (质量分数 25.02% ~ 26.33%)、 α -亚麻酸 (质量分数 0.15% ~ 0.28%)、花生二烯酸 (质量分数 5.02% ~ 5.19%)、花生五烯酸 (3.09% ~ 3.40%)、二十二碳二烯酸 (质量分数 1.99% ~ 2.25%), 其中饱和脂肪酸质量分数在 22.53% ~ 23.50% 之间, 以棕榈酸为主; 不饱和脂肪酸质量分数在 75.19% ~ 78.35%, 以油酸和亚油酸为主, 这一结果与胡伯凯等^[16]报道的八月瓜籽油的主要脂肪酸组成基本相似。不同微波处理的八月瓜籽油中棕榈酸、硬脂酸、油酸、和亚油酸的质量分数保持在 89.08% ~ 89.61%。此外, 微波预处理后的八月瓜

表1 微波预处理对八月瓜籽油脂肪酸组成及其质量分数的影响/%

功率/W	时间/min	棕榈酸(16:0)	硬脂酸(18:0)	油酸(18:1)	亚油酸(18:2)	α -亚麻酸(18:3w3)	花生二烯酸(20:2)	花生五烯酸(20:5)	二十二碳二烯酸(22:2)
对照	-	21.42 ± 0.03 ^b	1.68 ± 0.05 ^c	40.90 ± 0.10 ^a	25.02 ± 0.06 ^f	0.15 ± 0.01 ^g	5.09 ± 0.23 ^d	3.14 ± 0.07 ^f	1.99 ± 0.19 ^g
380	3	21.12 ± 0.12 ^d	1.75 ± 0.04 ^b	40.88 ± 0.45 ^a	25.57 ± 0.16 ^g	0.28 ± 0.01 ^a	5.03 ± 0.48 ^g	3.25 ± 0.28 ^d	2.16 ± 0.26 ^d
	6	21.27 ± 0.10 ^c	1.74 ± 0.04 ^b	40.78 ± 0.14 ^b	25.54 ± 0.15 ^g	0.23 ± 0.00 ^{bc}	5.16 ± 0.11 ^b	3.23 ± 0.10 ^e	2.06 ± 0.22 ^f
	9	21.30 ± 0.11 ^c	1.80 ± 0.01 ^a	40.68 ± 0.02 ^c	25.55 ± 0.02 ^g	0.20 ± 0.03 ^{de}	5.12 ± 0.01 ^c	3.28 ± 0.05 ^e	2.07 ± 0.12 ^e
540	3	21.67 ± 0.13 ^a	1.68 ± 0.01 ^c	39.94 ± 0.33 ^g	25.94 ± 0.12 ^c	0.17 ± 0.04 ^{fg}	5.06 ± 0.65 ^{df}	3.29 ± 0.50 ^{bc}	2.25 ± 0.56 ^b
	6	21.70 ± 2.07 ^a	1.60 ± 0.03 ^d	40.35 ± 0.17 ^d	25.75 ± 0.13 ^c	0.17 ± 0.05 ^{fg}	5.08 ± 0.02 ^{de}	3.28 ± 0.04 ^e	2.07 ± 0.47 ^e
	9	21.44 ± 3.27 ^b	1.61 ± 0.01 ^d	40.18 ± 0.41 ^e	25.85 ± 0.27 ^d	0.22 ± 0.02 ^{cd}	5.02 ± 0.12 ^g	3.40 ± 0.06 ^a	2.27 ± 1.05 ^a
700	3	21.68 ± 3.16 ^a	1.72 ± 0.03 ^b	39.92 ± 0.20 ^g	25.29 ± 0.29 ^b	0.19 ± 0.01 ^{ef}	5.04 ± 0.12 ^{fg}	3.30 ± 0.08 ^b	2.16 ± 0.71 ^c
	6	21.67 ± 1.46 ^a	1.41 ± 0.29 ^d	39.99 ± 0.89 ^f	26.32 ± 0.66 ^a	0.25 ± 0.06 ^b	5.19 ± 1.34 ^a	3.12 ± 0.82 ^g	2.06 ± 0.58 ^f
	9	21.61 ± 1.58 ^a	1.63 ± 0.12 ^d	39.92 ± 0.21 ^g	26.33 ± 0.19 ^a	0.25 ± 0.01 ^b	5.09 ± 0.05 ^d	3.09 ± 0.04 ^h	2.08 ± 0.45 ^e

注:表中的小写字母不同表示差异性显著($P < 0.05$)。下同。

籽油中棕榈酸、油酸和亚麻酸的含量与对照组相比均有显著性差异($P < 0.05$),但是对照组和微波预处理组的脂肪酸组成无明显差异,这与 Amakhmakh 等^[27]发现微波焙烧对石榴籽油脂脂肪酸组成没有显著影响的结果一致。

2.3 微波预处理对八月瓜籽油酸价、过氧化值的影响

微波预处理对八月瓜籽油酸价和过氧化值的影响如表2所示,微波预处理对八月瓜籽油的酸价和过氧化值有显著影响($P < 0.05$),在不同程度的微波预处理条件下,八月瓜籽油的酸价和过氧化值均呈增加趋势,但均符合 GB 2716—2018 中植物原油酸值(KOH)(≤ 4 mg/g)和过氧化值[≤ 0.25 g/100 g (9.85 mmol/kg)]的要求。这可能是因为随着微波处理程度的加深,部分磷脂和甘油三酯水解为游离脂肪酸,从而使酸价增高^[28];同时不饱和脂肪酸在微波辐射下易生成过氧化物,从而使过氧化值升高^[23]。这与张丽霞等^[29]发现随着微波温度的升高,芝麻油的酸价和过氧化值呈上升趋势的结果一致。

表2 不同微波预处理时间下八月瓜籽油的酸价、过氧化值的影响

微波功率/W	微波时间/min	酸价/mg/g	过氧化值/mmol/kg
对照	0	1.05 ± 0.01 ^g	1.01 ± 0.04 ⁱ
380	3	1.09 ± 0.01 ^f	1.30 ± 0.03 ^g
	6	1.15 ± 0.02 ^e	1.18 ± 0.03 ^h
	9	1.21 ± 0.02 ^d	1.38 ± 0.02 ^f
540	3	1.08 ± 0.01 ^{fg}	1.49 ± 0.01 ^e
	6	1.21 ± 0.02 ^d	1.59 ± 0.02 ^d
	9	1.34 ± 0.05 ^c	1.65 ± 0.03 ^c
700	3	1.22 ± 0.01 ^d	1.80 ± 0.02 ^b
	6	1.46 ± 0.03 ^b	1.80 ± 0.04 ^b
	9	1.62 ± 0.03 ^a	1.95 ± 0.01 ^a

2.4 微波预处理对八月瓜籽油活性成分的影响

2.4.1 微波预处理对八月瓜籽油总酚含量的影响

微波预处理对八月瓜籽油总酚含量的影响如图

2所示。微波预处理对八月瓜籽油的总酚含量有显著影响($P < 0.05$)。在380 W和540 W条件下,随着微波时间的增加,总酚含量均呈上升趋势,均在9 min时达到最大值,分别为0.60 mg/g和0.77 mg/g,这可能是由于微波预处理破坏了八月瓜籽种子的细胞结构^[11],同时微波还可以使与酚类化合物结合的蛋白质变性,使结合的酚转化为更容易在油中释放的游离酚,从而促进更多的多酚释放^[30]。但是在700 W条件下,随着微波时间的延长,总酚含量呈现下降趋势,这可能与多酚类物质在高温下容易氧化分解有关^[27]。

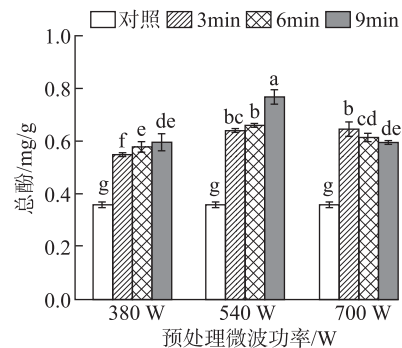


图2 微波预处理对八月瓜籽油总酚含量的影响

2.4.2 微波预处理对八月瓜籽油类胡萝卜素含量的影响

微波预处理对八月瓜籽油类胡萝卜素含量的影响由图3可见,微波预处理对八月瓜籽油的类胡萝卜素含量有显著影响($P < 0.05$)。不同微波预处理的八月瓜籽油的类胡萝卜素含量在4.06~6.38 mg/kg之间,而对照组类胡萝卜素含量为3.84 mg/kg。在380 W和540 W条件下,随着微波时间延长,八月瓜籽油的类胡萝卜素含量呈上升的趋势,并在540 W处理9 min时类胡萝卜素含量达到最高。这可能与热

诱导的种子内部细胞结构破坏有关,包括蛋白质变性等,从而提高了类胡萝卜素的溶解度^[31]。但在700 W条件下,随着微波时间的延长,八月瓜籽油的类胡萝卜素呈现下降趋势。这与Rekas等^[32]发现油菜籽经高功率(800 W)微波预处理后,随着时间的延长,其总类胡萝卜素含量呈现下降趋势的结果一致。

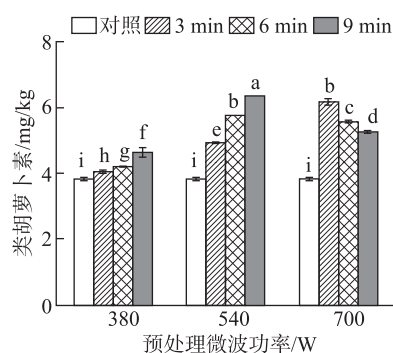


图3 微波预处理对八月瓜籽油类胡萝卜素含量的影响

2.4.3 微波预处理对八月瓜籽油总黄酮含量的影响

微波预处理对八月瓜籽油总黄酮含量的影响由图4可见,微波预处理对八月瓜籽油的总黄酮含量有显著影响($P < 0.05$)。不同微波预处理的八月瓜籽油的总黄酮含量在0.51~0.55 mg/g之间,而对照组总黄酮含量为0.44 mg/g。在380 W和540 W条件下,随着微波时间的增加,八月瓜籽油总黄酮含量均呈上升趋势,这可能是因为适当的微波辐射可以破坏细胞壁,从而提高黄酮化合物的溶出率和溶解度^[33]。但在700 W条件下,随着微波时间的增加,八月瓜籽油中的总黄酮含量呈现下降趋势。这与Hayat等^[34]报道的茴香籽油总黄酮含量随着微波功率(300 W和500 W)和时间的增加而增加,但在700 W微波处理下,随着时间的延长,其总黄酮含量呈现下降趋势的结果保持一致。

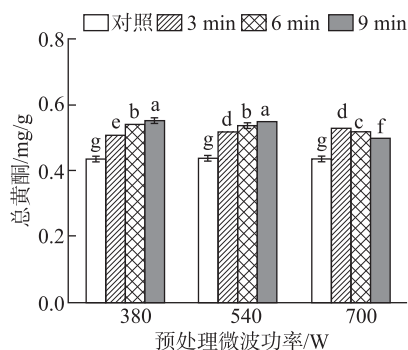


图4 微波预处理对八月瓜籽油总黄酮含量的影响

2.4.4 微波预处理对八月瓜籽油总甾醇含量的影响

微波预处理对八月瓜籽油中总甾醇含量的影响由图5可见。微波预处理可显著提高八月瓜籽油的总甾醇含量($P < 0.05$)。不同微波预处理的八月瓜籽油的总甾醇含量在1.66~2.41 mg/g之间,而对照组的总甾醇含量为0.76 mg/g。在380 W和540 W的条件下,随着微波时间的延长,总甾醇含量均呈上升的趋势,这可能是因为微波处理使八月瓜籽的细胞膜完整性被破坏,而植物甾醇是细胞膜的主要成分,因此,甾醇的溶出增加,使甾醇含量升高^[35]。这一结果与Sundar等^[36]发现经180 W和540 W微波预处理后,大麻籽油总甾醇含量随微波时间增加而增加,并且明显高于对照组的结果一致。但在700 W条件下,随着时间的延长,八月瓜籽油总甾醇含量呈下降趋势。这一结果与Oubannin等^[37]发现在750 W微波处理下,随着时间的延长,黑草种子油的总甾醇含量呈下降趋势的结果一致。

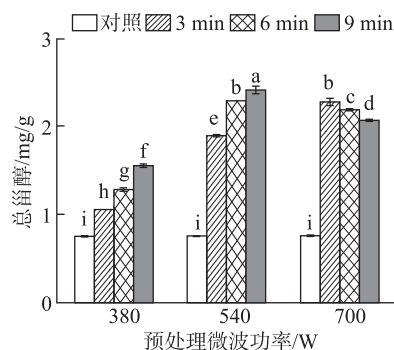


图5 微波预处理对八月瓜籽油总甾醇含量的影响

2.5 微波预处理对八月瓜籽油抗氧化活性的影响

2.5.1 微波预处理对八月瓜籽油 DPPH 自由基清除率的影响

微波预处理对八月瓜籽油 DPPH 自由基清除率的影响由图6可见,八月瓜籽油 DPPH 自由基的清除能力范围在66.54%~75.29%之间,其中微波处理组的清除率均显著高于对照组($P < 0.05$),表明微波预处理能增加八月瓜籽油清除 DPPH 自由基的能力。在380 W和540 W条件下,其 DPPH 自由基的清除能力随微波辐射强度的增加而增强,在540 W微波处理9 min时达到最高,比对照组提高19.91%。此结果与孔凡等^[23]发现550 W微波处理9 min得到的南瓜籽油 DPPH 自由基清除能力最高的结论一致。这可能与微波预处理有助于酚类物质释放或美拉德反应产物形成有关^[38]。在700 W条件下,随着微波

处理时间的增加,八月瓜籽油清除 DPPH 自由基的能力呈现逐渐下降的趋势,这与微波焙烧对杏仁及杏油生物活性成分、抗氧化活性及脂肪酸组成影响^[39]的研究结果保持一致,即在 720 W 微波处理下的杏仁油,其抗氧化活性和总酚含量均显著降低。这可能是因为随着微波功率的升高,抗氧化分子运动加剧,细胞间摩擦增加,有利于细胞破裂和抗氧化物质溶出;但温度过高则容易导致清除 DPPH 自由基物质的结构破坏或被氧化。

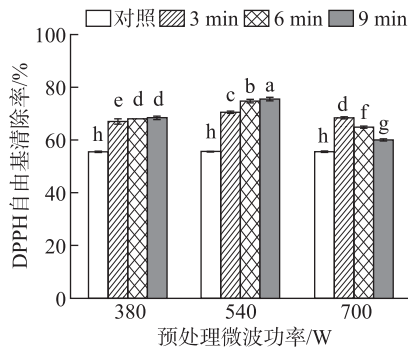


图6 微波预处理对八月瓜籽油 DPPH 自由基清除率的影响

2.5.2 微波预处理对八月瓜籽油 ABTS⁺ 自由基清除率的影响

微波预处理对八月瓜籽油 ABTS⁺ 自由基清除率的影响由图 7 可见。八月瓜籽油对 ABTS⁺ 自由基的清除能力在 61.06% ~ 73.08% 之间波动,微波预处理组的 ABTS⁺ 自由基的清除活性均显著高于对照组 ($P < 0.05$),说明微波预处理对八月瓜籽油清除 ABTS⁺ 自由基的活性有积极影响。在 380 W 和 540 W 条件下,其 ABTS⁺ 自由基的清除能力随微波辐射强度的增加而增强,在 540 W 条件下处理 9 min 时 ABTS⁺ 自由基的清除活性最高,比对照组提高 19.71%,这可能是八月瓜籽油中的抗氧化物发挥了作用^[19]。在 700 W 的微波处理条件下,随着时间的增加,八月瓜籽油的 ABTS⁺ 自由基清除率呈现下降

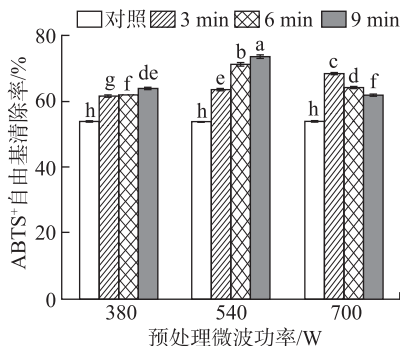


图7 微波预处理对八月瓜籽油 ABTS⁺ 自由基清除率的影响

趋势。这与孔凡等^[23]研究发现在微波 700 W 功率处理下,6 min 后随着微波时间的增加,南瓜籽油的 ABTS⁺ 自由基清除率呈现下降趋势的结果一致。

2.5.3 微波预处理对八月瓜籽油羟基自由基清除率的影响

微波预处理对八月瓜籽油羟基自由基清除率的影响由图 8 可见。八月瓜籽油的羟基自由基清除率在 54.01% ~ 64.78% 之间,与对照组相比,微波预处理组的羟基自由基清除率均增加,且存在显著性差异 ($P < 0.05$)。在 380 W 和 540 W 的微波条件下,随着微波预处理时间的增加,八月瓜籽油对羟基自由基的清除率逐渐上升,并在 540 W 微波处理 9 min 条件时,八月瓜籽油的羟基自由基清除率达到最高,比对照组高 17.63%。但是在 700 W 的微波处理条件下,随着微波时间的延长,八月瓜籽油的羟基自由基清除率呈现下降趋势。

适当的微波预处理可以提高八月瓜籽油的抗氧化能力,这可能是因为微波加热可破坏细胞壁或脂蛋白结构,释放更多游离的酚类物质,从而增强其抗氧化能力,同时微波加热可促进油脂中微量糖类或蛋白质与脂质的美拉德反应,这些美拉德产物具有自由基清除能力。但是过度微波处理,可能会导致酚类物质被破坏,氧化产物积累,使八月瓜籽油的抗氧化性能下降。

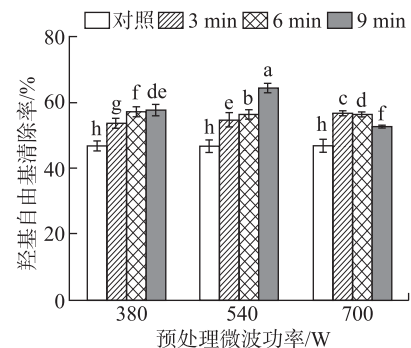


图8 微波预处理对八月瓜籽油羟基自由基清除率的影响

2.6 八月瓜籽油中活性成分与抗氧化活性的相关性分析

2.6.1 八月瓜籽油中活性成分与抗氧化活性的 Pearson 相关性分析

由表 3 可知,总酚含量与 DPPH、ABTS⁺ 以及羟基自由基的清除能力之间存在显著的相关性。尤其是总酚含量与 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除能力呈现出极显著的相关关系。类胡萝卜素含量与 ABTS⁺ 自由基清除能力为极显著相关性。这说明总酚含量和

类胡萝卜素含量对八月瓜籽油的抗氧化能力具有显著影响,可能是因为抗氧化化合物能有效地阻断热氧化反应的发生^[40]。总黄酮含量、总甾醇含量分别与羟基自由基清除能力和 ABTS⁺ 自由基清除能力呈显著相关性。

表3 微波预处理对八月瓜籽油活性成分与抗氧化活性的 Pearson 相关性分析

指标	总酚	总黄酮	类胡萝卜素	总甾醇
DPPH 自由基清除能力	0.684 *	0.586	0.357	0.269
ABTS ⁺ 自由基清除能力	0.908 **	0.291	0.831 **	0.740 *
羟基自由基清除能力	0.808 **	0.717 *	0.524	0.389

注: * 为显著相关($P < 0.05$); ** 为极显著相关($P < 0.01$)。

2.6.2 八月瓜籽油中活性成分与抗氧化活性的偏相关性分析

由表4可见,DPPH 自由基清除能力与总酚含量呈中度正相关,说明总酚含量对 DPPH 自由基清除能力有一定积极影响,但与总黄酮、类胡萝卜素和总甾醇含量的相关性较小。ABTS⁺ 自由基清除能力同样与总酚含量呈中度正相关,与黄酮含量无相关性,与类胡萝卜素和总甾醇含量有较低相关性。而总酚、总黄酮、类胡萝卜素和总甾醇含量均对羟基自由基清除能力有积极影响,其中总黄酮与总甾醇含量对其有显著正相关性,可能是因为总黄酮类物质能抑制脂质过氧化并与过氧化自由基反应,从而终止自由基连锁反应^[41],同时,某些天然抗氧化物质(—OH、—C=C—)与自由基结合,最终增强清除自由基能力^[42]。

表4 微波预处理对八月瓜籽油活性成分与抗氧化活性的偏相关性分析

指标	总酚	总黄酮	类胡萝卜素	总甾醇
DPPH 自由基清除能力	0.569	0.162	0.015	0.270
ABTS ⁺ 自由基清除能力	0.592	/	0.436	0.400
羟基自由基清除能力	0.619	0.751 *	0.697	0.769 *

注:/表示无相关性。

3 结论

研究微波预处理对八月瓜籽油品质特性的影响,发现适当的微波预处理(功率 380 ~ 700 W,时间 3 ~ 9 min)能显著提高八月瓜籽油的出油率,且不影响其脂肪酸组成,酸值和过氧化值均符合国家标准。

在 540 W 微波处理 9 min 的条件下,八月瓜籽油的活性成分(总酚、类胡萝卜素、总黄酮、总甾醇)含量和抗氧化活性(DPPH、ABTS⁺、羟基自由基清除率)均达到最大值,并显著高于对照组。相关性分析表明抗氧化活性与总黄酮和总甾醇含量呈显著正相关。因此,微波预处理,尤其是 540 W 处理 9 min,是提升八月瓜籽油品质的有效方法。

参考文献

- [1]刘永玲,刘向炼,陶欣,等. 八月瓜果皮多糖提取工艺优化及其体外抗氧化、降糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19):17-24
- [2]李朝阁. 八月瓜酒酿造及籽油、多酚提取和抗氧化性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016: 1-7
- [3]韩宗运. 八月瓜的营养价值与栽培技术探讨[J]. 种子科技, 2023, 41(18):100-102
- [4]Jiang Y, Yin H, Zheng Y, et al. Structure, physicochemical and bioactive properties of dietary fibers from *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. seeds using ultrasonication/shear emulsifying/microwave-assisted enzymatic extraction[J]. Food Research International, 2020, 136:109348
- [5]马玉华,王荔. 三叶木通特性研究进展[J]. 江西农业学报, 2011, 23(5):71-73
- [6]Du Y, Jiang Y, Zhu X, et al. Physicochemical and functional properties of the protein isolate and major fractions prepared from *Akebia trifoliata* var. *australis* seed[J]. Food Chemistry, 2012, 133(3):923-929
- [7]庞发虎,赵旗峰,张俊民,等. 一种值得开发的野生果树: 三叶木通[J]. 山西果树, 2002(3):9
- [8]孙宇昊,王珍珍,戴静,等. 三叶木通果发酵过程中氨基酸组成及营养价值评价[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(20):172-182

- Sun Y, Wang Z, Dai J, et al. Evaluation of amino acid composition and nutritional value of *Akebia trifoliata* fruits during fermentation[J]. Food Research and Development, 2024, 45(20):172–182
- [9] 陈楚滢. 紫苏籽微波预处理及美拉德反应产物对其油脂氧化稳定性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 1–5
Chen C. Effects of microwave pretreatment of *Perilla* seeds and Maillard reaction products on the oxidation stability of its oil[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 1–5
- [10] Rezig L, Harzalli Z, Gharsallah K, et al. Microwave and roasting impact on pumpkin seed oil and its application in full-fat mayonnaise formula[J]. Foods, 2022, 11(18): 2732
- [11] Huang J, Chen C, Song Z, et al. Effect of microwave pretreatment of *Perilla* seeds on minor bioactive components content and oxidative stability of oil[J]. Food Chemistry, 2022, 388:133010
- [12] Yan B, Meng L, Huang J, et al. Changes in oxidative stability of rapeseed oils under microwave irradiation: the crucial role of polar bioactive components[J]. LWT – Food Science and Technology, 2023, 185:115100
- [13] Musa Ö M, Al – Juhaimi F Y, Mohamed A I A, et al. Effect of different microwave power setting on quality of *Chia* seed oil obtained in a cold press [J]. Food Chemistry, 2019, 278:190–196
- [14] 高晓龙, 徐巍, 李颖, 等. 制油工艺对三叶木通籽油活性成分及抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(8):155–159
Gao X, Xu W, Li Y, et al. Effects of different processes on active components and antioxidant activities of *Akebia trifoliata* seed oil[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8):155–159
- [15] 李伟业, 吴海顺, 于华忠. 三叶木通籽油提取方法对比及超临界 CO₂ 萃取法工艺优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10):203–208
Li W, Wu H, Yu H. Comparison of different extraction methods of *Akebia trifoliata* oil and optimization of supercritical CO₂ extraction process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(10):203–208
- [16] 胡伯凯, 税会霞, 张东亚. 不同产地三叶木通籽油脂脂肪酸指纹图谱的构建[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 101–107
Hu B, Shui H, Zhang D. Construction of fatty acid fingerprint of *Akebia trifoliata* seed oil from different origins[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5):101–107
- [17] 马传国, 董学工, 程亚芳. 三叶木通籽成分及三叶木通籽油的理化指标分析[J]. 中国油脂, 2009, 34(9): 77–79
Ma C, Dong X, Cheng Y. Components of *Akebia trifoliata* seed and the physicochemical indexes of the seed oil[J]. China Oils and Fats, 2009, 34(9):77–79
- [18] 冯萃萃, 郭晓成, 闫欣鹏, 等. 三叶木通籽油精炼前后理化指标及脂肪酸组成分析[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(1):71–74
Feng L, Guo X, Yan X, et al. Analysis of the physicochemical indexes and fatty acid composition of *Akebia trifoliata* seed oil before and after refining[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(1):71–74
- [19] Yang M, Zheng C, Zhou Q, et al. Minor components and oxidative stability of cold-pressed oil from rapeseed cultivars in China[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 29(1):1–9
- [20] Suri K, Singh B, Kaur A, et al. Influence of dry air and infrared pre-treatments on oxidative stability, Maillard reaction products and other chemical properties of linseed (*Linum usitatissimum* L.) oil[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(1):366–376
- [21] Thanonkaew A, Wongyai S, McClements D J, et al. Effect of stabilization of rice bran by domestic heating on mechanical extraction yield, quality, and antioxidant properties of cold-pressed rice bran oil (*Oryza sativa* L.) [J]. LWT – Food Science and Technology, 2012, 48(2):231–236
- [22] 曹子伦, 雷芬芬, 郑竞成, 等. 不同产地南瓜籽油组成及氧化稳定性的差异[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 283–289
Cao Z, Lei F, Zheng J, et al. Comparative analysis of main components and oxidation stability of pumpkin seed oil from different geographic regions[J]. Food Science, 2022, 43(12):283–289
- [23] 孔凡, 杨晨, 雷芬芬, 等. 微波预处理对压榨南瓜籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(11):1–6
Kong F, Yang C, Lei F, et al. Effect of microwave pretreatment on quality of pressed pumpkin seed oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(11):1–6
- [24] Liu S, Zhao C, Cao Y, et al. Comparison of chemical compositions and antioxidant activity of essential oils from *Litsea Cubeba*, cinnamon, anise, and *Eucalyptus* [J]. Molecules, 2023, 28(13):5051
- [25] Uquiche E, Jeréz M, Ortíz J. Effect of pretreatment with microwaves on mechanical extraction yield and quality of vegetable oil from Chilean hazelnuts (*Gevuina avellana* Mol) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(4):495–500
- [26] Bakhshabadi H, Mirzaei H, Ghodsvali A, et al. The effect of microwave pretreatment on some physico-chemical prop-

- erties and bioactivity of Black cumin seeds' oil[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 97:1 - 9
- [27] Amakhmakh M, Hajib A, Belmaghraoui W, et al. Assessment of the impact of microwave roasting on nutrient content, lipid profile, and oxidative stability of pomegranate seed oil[J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 24:101875
- [28] Inchingolo R, Cardenia V, Rodriguez - Estrada M T. The effects of microwave heating on edible oils and lipid - containing food[J]. *Lipid Technology*, 2013, 25(3):59 - 61
- [29] 张丽霞, 张勋, 宋国辉, 等. 微波干燥对芝麻品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(2):260 - 264
- Zhang L, Zhang X, Song G, et al. Effect of microwave drying on quality of sesames[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(2):260 - 264
- [30] Rekas A, Ścibisz I, Siger A, et al. The effect of microwave pretreatment of seeds on the stability and degradation kinetics of phenolic compounds in rapeseed oil during long - term storage[J]. *Food Chemistry*, 2017, 222:43 - 52
- [31] Vaidya B, Choe E. Effects of seed roasting on tocopherols, carotenoids, and oxidation in mustard seed oil during heating[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2011, 88(1):83 - 90
- [32] Rekas A, Siger A, Wroniak M. The effect of microwave pre - treatment of rapeseed on the degradation kinetics of lipophilic bioactive compounds of the oil during storage[J]. *Grasas y Aceites*, 2018, 69(1): e233
- [33] Hossain M B, Brunton N P, Patras A, et al. Optimization of ultrasound assisted extraction of antioxidant compounds from marjoram (*Origanum majorana* L.) using response surface methodology[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19(3):582 - 590
- [34] Hayat K, Abbas S, Hussain S, et al. Effect of microwave and conventional oven heating on phenolic constituents, fatty acids, minerals and antioxidant potential of fennel seed [J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 140:111610
- [35] Azadmard - Damirchi S, Habibi - Nodeh F, Hesari J, et al. Effect of pretreatment with microwaves on oxidative stability and nutraceuticals content of oil from rapeseed[J]. *Food Chemistry*, 2010, 121(4):1211 - 1215
- [36] Sundar S, Singh B, Kaur A. Microwave roasting effects on phenolic, tocopherol, fatty acid and phytosterol profiles, physicochemical, oxidative and antioxidant properties of hemp seed oil[J]. *Food Chemistry Advances*, 2024, 4: 100596
- [37] Oubannin S, Jadouali S M, Atifi H, et al. Antioxidant activity, physico - chemical properties, and bioactive compounds of *Nigella sativa* seeds and oil impacted by microwave processing technique[J]. *Heliyon*, 2024, 10(18): e37603
- [38] Kaur M, Singh B, Kaur A. Microwave processing effects on physico - chemical, functional properties, phenolic profile, and Maillard products of flaxseed flour and flaxseed press cake flour[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 218: 118900
- [39] Al Juhaimi F, Musa özcan M, Ghafoor K, et al. The effect of microwave roasting on bioactive compounds, antioxidant activity and fatty acid composition of apricot kernel and oils [J]. *Food Chemistry*, 2018, 243:414 - 419
- [40] Song X, Sui X, Jiang L. Protection function and mechanism of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) extract on the thermal oxidative stability of vegetable oils[J]. *Foods*, 2023, 12(11):2177
- [41] 孙江怡, 王豆豆, 魏骊霏, 等. 核桃分心木总黄酮的提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. *粮食与油脂*, 2025, 38(2):97 - 102
- Sun J, Wang D, Wei L, et al. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Diaphragma juglandis* fructus and analysis of its antioxidant activity[J]. *Cereals & Oils*, 2025, 38(2):97 - 102
- [42] 艾洪湖, 程艳芬, 云少君, 等. 香菇中麦角甾醇的提取纯化、表征及其抗氧化活性[J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(20):25 - 34
- Ai H, Cheng Y, Yun S, et al. Extraction, purification, characterization, and antioxidant activity of ergosterol in *Lentinus edodes* [J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(20):25 - 34.