综合利用

DOI：10.19902/j.cnki.zgyz.1003－7969.240460

低共熔溶剂提取葵花籽饼中绿原酸和总黄酮的工艺优化

李志成，任曼曼，刘　伟，梁少华，杨瑞楠，孙　聪

（河南工业大学 粮油食品学院，郑州 450001）

摘要：旨在促进葵花籽饼的高值化利用，采用低共熔溶剂（DES）提取葵花籽饼中绿原酸和总黄酮。以 60% 乙醇提取法为对照，绿原酸和总黄酮得率为评价指标，先从 11 种 DES 中确定最佳提取溶剂，在此基础上进一步考察提取时间、料液比、提取温度、DES 含水量对绿原酸和总黄酮提取效果的影响，从而确定绿原酸和总黄酮的最优提取工艺。结果表明：综合考虑提取效果和成本，确定氯化胆碱－乳酸（物质的量比 1∶2）为最佳提取溶剂；绿原酸的最优提取工艺条件为提取时间 60 min、提取温度 70 ℃、料液比 1∶30 和 DES 含水量 30%，总黄酮的最优提取工艺条件为提取时间 40 min、提取温度 80 ℃、料液比 1∶40 和 DES 含水量 50%；在最优工艺条件下，绿原酸和总黄酮得率分别达到 18.88 mg/g 和 38.04 mg/g，明显高于 60% 乙醇提取法。综上，采用 DES 法可有效提取葵花籽饼中的绿原酸和总黄酮，提取效果均优于传统乙醇提取法。

关键词：葵花籽饼；绿原酸；总黄酮；低共熔溶剂

中图分类号：TS229；TS201.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003－7969（2025）12－0083－07

Optimization of extraction process of chlorogenic acid and total flavonoids from sunflower seed cake with deep eutectic solvent

LI Zhicheng, REN Manman, LIU Wei, LIANG Shaohua, YANG Ruinan, SUN Cong

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to promote the high－value utilization of sunflower seed cake, chlorogenic acid and total flavonoids were extracted from sunflower seed cake by deep eutectic solvent (DES). Using 60% ethanol extraction method as the control, and the yields of chlorogenic acid and total flavonoids as the evaluation indexes, the optimal extractant was determined from 11 DES firstly. On this basis, the effects of extraction time, material－liquid ratio, extraction temperature and water content in DES on the extraction efficiency were further investigated to determine the optimal extraction processes of chlorogenic acid and total flavonoids. The results showed that considering both extraction effect and cost, choline chloride－lactic acid (molar ratio 1∶2) was determined as the optimal extractant. The optimal extraction conditions for chlorogenic acid were obtained as follows: extraction time 60 min, extraction temperature 70 ℃, material－liquid ratio 1∶30 and water content in DES 30%. The optimal extraction conditions for total flavonoids were obtained as follows: extraction time 40 min, extraction temperature 80 ℃, material－liquid ratio 1∶40 and water content in DES 50%. Under these conditions, the yields of chlorogenic acid and total flavonoids could reach 18.88 mg/g and 38.04 mg/g, respectively, which were significantly higher than those of the 60% ethanol extraction method. In conclusion, the DES method is more effective in extracting

收稿日期：2024－07－27；**修回日期：**2025－06－09

基金项目：河南省 A 类专业创建建设专项（HN－HautFood－97）；“十四五”国家重点研发计划项目（2023YFD2100403）

作者简介：李志成（2001），男，在读本科，食品科学与工程专业（E-mail）2789315274@qq.com。

通信作者：孙　聪，讲师，硕士生导师（E-mail）suncong0511@126.com。

chlorogenic acid and total flavonoids from sunflower seed cake than the traditional ethanol extraction method.

Key words: sunflower seed cake; chlorogenic acid; total flavonoids; deep eutectic solvent

葵花籽是世界四大油料作物之一向日葵的籽实[1]。葵花籽饼是葵花籽榨油后的副产物,其不仅富含粗蛋白质和粗纤维,还含有丰富的酚类物质[2]。葵花籽饼中绿原酸含量为1.1% ~4.5%,这不但使葵花籽饼呈深褐色或棕褐色,而且会影响动物对蛋白质的吸收,降低了其饲用价值[3-4]。然而,绿原酸是一种重要的生物活性物质,具有抗菌、抗肿瘤、降血脂、降血糖等多种药理作用[5]。同时,黄酮类化合物也广泛存在于葵花籽饼中[6],其具有多种生物学功能和较高的药用价值,如抗癌、肾脏保护、营养、保护心血管、抗炎、抗辐射、镇痛、解热、护肝等[6]。因此,从葵花籽饼中提取绿原酸和黄酮,不仅可避免葵花籽饼色泽深、饲用价值下降等问题,也可提高葵花籽饼的利用价值和经济效益。

目前,主要采用有机溶剂法和水提法从天然植物中提取绿原酸和黄酮。张维农等[7]采用两次醇提法从葵花籽仁中提取绿原酸,确定最佳工艺条件为浸提次数2次(料液比分别为1∶15和1∶10)、每次浸提时间40 min、pH 4.5、提取温度70 ℃、乙醇体积分数70%。张国栋等[8]采用水提法提取柴葛根中总黄酮,确定最佳提取条件为提取时间100 min、料液比1∶25、葛根颗粒大小0.25 cm。有机溶剂法能耗低、应用范围广,但存在环境污染、溶剂消耗量大等问题。水提法虽所需设备简单,但提取时间长、提取率低、产物含杂量高[9]。

低共熔溶剂(DES)作为一种新型绿色提取溶剂,具有制备简单、低毒或无毒、价廉易得、可生物降解、可回收利用等优点,未来有望替代传统溶剂从天然植物中提取活性成分[10]。Wu等[11]采用超声辅助DES萃取法从葵花盘中提取绿原酸,绿原酸得率可达6.16 mg/g,优于70%乙醇提取法。目前未见DES法提取葵花籽饼中绿原酸和总黄酮的研究报道。因此,本文以葵花籽饼为原料,绿原酸和总黄酮得率为评价指标,先对11种常见的DES进行筛选,确定最佳提取溶剂,在此基础上进一步考察提取时间、料液比、提取温度、DES含水量对二者提取效果的影响,从而确定绿原酸和总黄酮的最优提取工艺,以期为葵花籽饼的高值化利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

葵花籽饼,中粮油脂有限公司提供;绿原酸标准品(HPLC,≥98%),上海源叶生物科技有限公司;芦丁标准品(99.0%),坛墨质检科技股份有限公司;氢氧化钠(粒状)(AR)、无水乙醇(AR),天津市恒兴化学试剂制造有限公司;硝酸铝(99.0%),郑州艾克姆化工有限公司;亚硝酸钠(AR),天津市大茂化学试剂厂;尿素(AR),天津市凯通化学试剂有限公司;氯化胆碱(AR,98%)、*DL*-乳酸(AR,85% ~90%)、*DL*-苹果酸(AR,99.5%)、丙二酸(AR,99.5%)、柠檬酸〔≥99.5%(T)〕、无水葡萄糖(生物技术级,99%)、三乙二醇(AR)、1,6-己二醇(99.5%)、1,4-丁二醇(AR,98%)、甘油(AR,99%)、乙酰丙酸(AR,99.0%),上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.1.2 仪器与设备

DF-101S集热式恒温磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;KQ-300DE数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;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;SHZ-D循环水式多用真空泵,河南佰泽仪器有限公司;HZT-A2000电子天平,郑州华志科学仪器有限公司;SartoriusBSA224S电子分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;RCT数显加热磁力搅拌器,德国IKA公司;WGL-125B电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;XW-80A涡旋振荡器,海门市其林贝尔仪器制造有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 60%乙醇提取葵花籽饼中绿原酸和总黄酮

参考文献[12-13]并稍作修改,将葵花籽饼粉碎,过0.425 mm(40目)筛后,精准称取1 g葵花籽饼粉末,加入20 mL体积分数60%的乙醇,在60 ℃下提取2.5 h,然后抽滤得到滤液,并用体积分数60%的乙醇定容至50 mL,即得葵花籽饼乙醇提取液,于4 ℃冷藏待用。

1.2.2 DES的制备

制备有机酸类、多元醇类、糖类三类氯化胆碱基DES,11种DES具体配比如表1所示。按照特定物

质的量比分别称取适量的氢键受体和氢键供体，放入圆底烧瓶中，在 80 ℃下油浴加热并进行磁力搅拌，直至形成均一透明的液体，然后将其冷却至室温，得到 DES。该方法制备的 DES 均可在室温下以液态形式稳定存在。

表 1　DES 的组成及氢健受体与氢键供体物质的量比

Table 1　Composition and the molar ratio of hydrogen bond acceptor to hydrogen bond donor of DES

编号	氢键受体	氢键供体	物质的量比	参考文献
DES－1	氯化胆碱	*DL*－乳酸	1∶2	［14］
DES－2	氯化胆碱	无水葡萄糖	2∶1	［15］
DES－3	氯化胆碱	三乙二醇	1∶4	［14］
DES－4	氯化胆碱	柠檬酸	2∶1	［14］
DES－5	氯化胆碱	尿素	1∶2	［15］
DES－6	氯化胆碱	1,6－己二醇	1∶7	［16］
DES－7	氯化胆碱	1,4－丁二醇	1∶2	［17］
DES－8	氯化胆碱	*DL*－苹果酸	1∶2	［18］
DES－9	氯化胆碱	丙二酸	1∶2	［19］
DES－10	氯化胆碱	甘油	1∶2	［20］
DES－11	氯化胆碱	乙酰丙酸	1∶2	［14］

1.2.3　DES 提取葵花籽饼中绿原酸和总黄酮

将葵花籽饼粉碎，过 0.425 mm(40 目)筛后，精准称取 1 g 葵花籽饼粉末，按一定料液比加入一定含水量的 DES，在一定温度下提取一定时间。提取结束后对混合物进行抽滤，滤液用体积分数 60% 的乙醇定容，即得葵花籽饼 DES 提取液。

1.2.4　绿原酸得率的测定

精确称取 5 mg 绿原酸标准品，置于 50 mL 容量瓶中，用体积分数 60% 的乙醇溶解并定容，配制成 100 μg/mL 的绿原酸储备液。分别移取 0、0.4、0.6、0.8、1.2 mL 和 1.3 mL 绿原酸储备液于 10 mL 容量瓶中，加入体积分数 60% 的乙醇，定容，配制成一定质量浓度梯度的系列标准溶液，使用紫外可见分光光度计在 328 nm 波长下测其吸光度。以吸光度(A)为纵坐标，绿原酸标准溶液质量浓度(c)为横坐标绘制标准曲线，得标准曲线回归方程 $A = 0.057\ 6c + 0.024\ 8$，$R^2 = 0.999\ 5$。

按 1.2.1 或 1.2.3 方法提取绿原酸，当料液比为 1∶40、1∶50 时，滤液用体积分数 60% 的乙醇定容至 100 mL 作为提取液，准确移取 0.50 mL 提取液至 10 mL 容量瓶中；其余料液比条件下，滤液均用体积分数 60% 的乙醇定容至 50 mL 作为提取液，准确移取 0.25 mL 提取液至 10 mL 容量瓶中。用体积分数为 60% 的乙醇定容，摇匀，并按照上述方法测其吸光度。按公式(1)计算绿原酸得率(Y)[21－22]。

$$Y = \frac{c \times N \times V}{m} \tag{1}$$

式中：c 为根据标准曲线方程计算得到的待测液中绿原酸质量浓度，mg/mL；N 为待测液的稀释倍数；V 为提取液的体积，mL；m 为葵花籽饼粉末的质量，g。

1.2.5　总黄酮得率的测定

参考文献[23]采用 $NaNO_2 - Al(NO_3)_3 - NaOH$ 比色法测定总黄酮含量，并稍作修改。

精确称取 7.5 mg 芦丁标准品置于 50 mL 容量瓶中，用体积分数 60% 的乙醇溶解并定容，配制成 150 μg/mL 芦丁储备液。分别移取 0、1.0、1.2、1.5、2.0、2.5、3.5 mL 和 4.2 mL 芦丁储备液置于 10 mL 容量瓶中，加入体积分数 60% 的乙醇，定容，配制成一定质量浓度梯度的系列标准溶液。各量取上述标准溶液 0.5 mL 至 10 mL 容量瓶中，加入体积分数 60% 的乙醇至 5 mL，再加入 0.3 mL 质量浓度为 5 g/100 mL 的 $NaNO_2$ 溶液，摇匀后反应 6 min，随后加入 0.3 mL 质量浓度为 10 g/100 mL 的 $Al(NO_3)_3$，反应 6 min 后，再加入 2 mL 1.0 mol/L 的 NaOH 溶液，用 60% 乙醇溶液定容，混合摇匀后，暗处静置 15 min 进行充分反应，最后采用紫外可见分光光度计在 510 nm 波长下测其吸光度。以吸光度(A)为纵坐标，芦丁标准液质量浓度(c)为横坐标绘制标准曲线，得标准曲线回归方程 $A = 0.012\ 2c + 0.004$，$R^2 = 0.999\ 4$。

按 1.2.1 或 1.2.3 方法提取总黄酮，当料液比为 1∶40、1∶50 时，滤液用体积分数 60% 的乙醇定容至 100 mL 作为提取液；其余料液比条件下，滤液均用体积分数 60% 的乙醇定容至 50 mL 作为提取液。准确移取 0.50 mL 提取液至 10 mL 容量瓶中，并按照上述方法进行上述显色反应，并测其吸光度。参考公式(1)计算总黄酮得率。

1.2.6　数据处理与分析

实验结果以“平均值 ± 标准差”表示，采用 Origin 2022 软件绘图，并用 SPSS 27.0 软件进行数据处理和分析。

2　结果与分析

2.1　DES 的筛选

为了筛选出提取葵花籽饼中绿原酸和总黄酮的最适 DES，在料液比 1∶20、提取时间 80 min、提取温度 60 ℃和 DES 含水量 30% 的条件下，研究 11 种 DES 对葵花籽饼中绿原酸和总黄酮得率的影响，同时以 60% 乙醇提取法作对比，结果如图 1 所示。

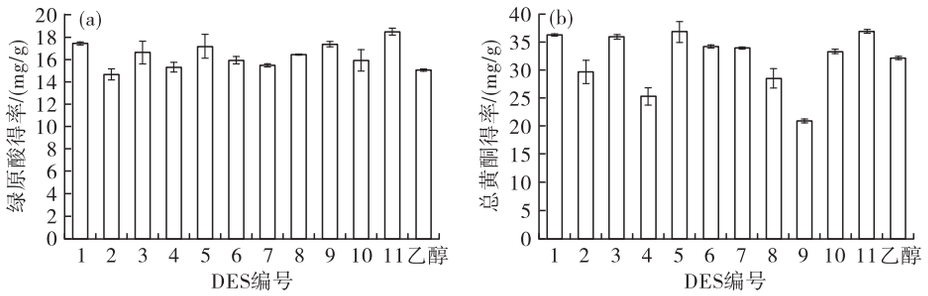

图 1 DES 种类对绿原酸和总黄酮得率的影响

Fig. 1 Influence of DES types on the yields of chlorogenic acid and total flavonoids

由图 1a 可知,60% 乙醇提取法的绿原酸得率为 15.04 mg/g,采用 DES 提取绿原酸时,除了 DES－2 的绿原酸得率稍低外(14.66 mg/g),其他 DES 的绿原酸得率均高于 60% 乙醇提取法的。其中 DES－1、DES－5、DES－9 和 DES－11 的绿原酸得率较高,分别为 17.42、17.16、17.37 mg/g 和 18.47 mg/g。

由图 1b 可知,采用 DES 提取黄酮类化合物时,DES－2、DES－4、DES－8、DES－9 的总黄酮得率分别为 29.76、25.37、28.57、21.03 mg/g,均低于 60% 乙醇提取法的(32.22 mg/g),而其他 DES 的总黄酮得率均高于 60% 乙醇提取法的。其中,DES－1、DES－3、DES－5、DES－11 的总黄酮得率较高,分别为 36.36、36.03、36.89、37.01 mg/g。

由上述分析可知,在采用不同种类氢键供体与同种氢键受体(氯化胆碱)配制的 DES 提取绿原酸和总黄酮时,氯化胆碱－乳酸(DES－1)、氯化胆碱－尿素(DES－5)和氯化胆碱－乙酰丙酸(DES－11)提取绿原酸和总黄酮效果均较好,但考虑到氯化胆碱－尿素形成的 DES 黏度较大,导致提取液的抽滤效果不佳,以及乙酰丙酸价格相对较高,最终确定氯化胆碱－乳酸(物质的量比 1∶2)为最佳提取溶剂。

2.2 DES 提取葵花籽饼中绿原酸和总黄酮的工艺优化

2.2.1 提取时间对绿原酸和总黄酮得率的影响

以氯化胆碱－乳酸(物质的量比 1∶2)为提取溶剂,在料液比 1∶20、提取温度 60 ℃、DES 含水量 30% 的条件下,研究提取时间对绿原酸和总黄酮得率的影响,结果如图 2 所示。

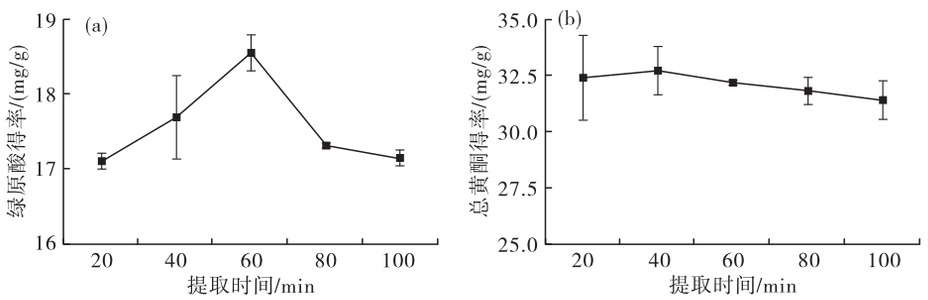

图 2 提取时间对绿原酸和总黄酮得率的影响

Fig. 2 Influence of extraction time on the yields of chlorogenic acid and total flavonoids

由图 2a 可知:随着提取时间的延长,绿原酸得率先增大,并在 60 min 时达到最高值(18.55 mg/g),说明在该时间段内绿原酸提取较为充分;当提取时间超过 60 min 后,绿原酸得率随提取时间的延长呈下降趋势,可能是提取时间过长导致绿原酸的结构因热效应而遭到破坏[24]。因此,确定提取绿原酸的最优时间为 60 min。

由图 2b 可知,随着提取时间的延长,总黄酮得率先缓慢升高再逐渐降低,并在 40 min 时达到最高值(32.75 mg/g),说明适当延长提取时间有利于目标产物的提取,但提取时间过长会使黄酮类化合物的结构因热效应而遭到破坏,从而使总黄酮得率下降[24]。因此,确定提取总黄酮的最优时间为 40 min。

2.2.2 料液比对绿原酸和总黄酮得率的影响

以氯化胆碱－乳酸(物质的量比 1∶2)为提取溶剂,在提取时间 60 min、提取温度 60 ℃、DES 含水量 30% 的条件下,研究料液比对绿原酸和总黄酮得率的影响,结果如图 3 所示。

由图 3a 可知:当料液比从 1∶5 降低到 1∶30 时,绿原酸得率由 15.23 mg/g 增至 18.43 mg/g;当料液比进一步降低至 1∶50 时,绿原酸得率变化不大。当料液比较高时,DES 黏度较大,原料与 DES 接触不充分,提取效果较差,而当料液比过小时,不仅会造

成溶剂的浪费，也会使 DES 与目标产物之间的氢键作用减弱，进而影响提取效果。因此，确定提取绿原酸的最优料液比为 1∶30。

由图 3b 可知，随着料液比的减小，总黄酮得率先增大，并在料液比 1∶40 时达到最高值（36.23 mg/g），随后略有下降。熊苏慧等[25]采用醋酸钠－乳酸（物质的量比 1∶5）配制的 DES 提取玉竹总黄酮时，观察到的料液比对总黄酮得率的影响趋势与本研究一致。因此，确定提取总黄酮的最优料液比为 1∶40。

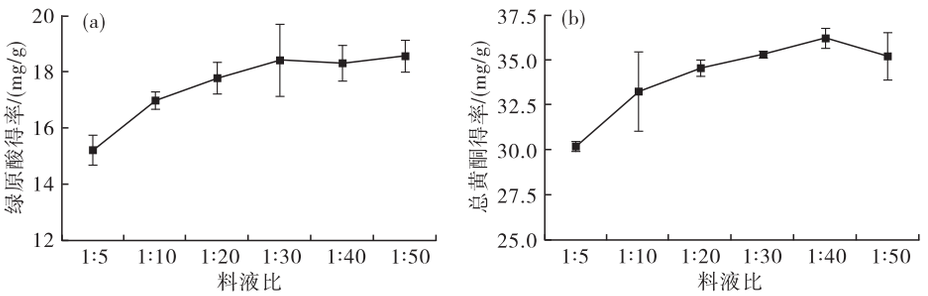

图 3　料液比对绿原酸和总黄酮得率的影响

Fig. 3　Influence of material－liquid ratio on the yields of chlorogenic acid and total flavonoids

2.2.3　提取温度对绿原酸和总黄酮得率的影响

以氯化胆碱－乳酸（物质的量比 1∶2）为提取溶剂，在提取时间 60 min、料液比 1∶30、DES 含水量 30% 的条件下，研究提取温度对绿原酸和总黄酮得率的影响，结果如图 4 所示。

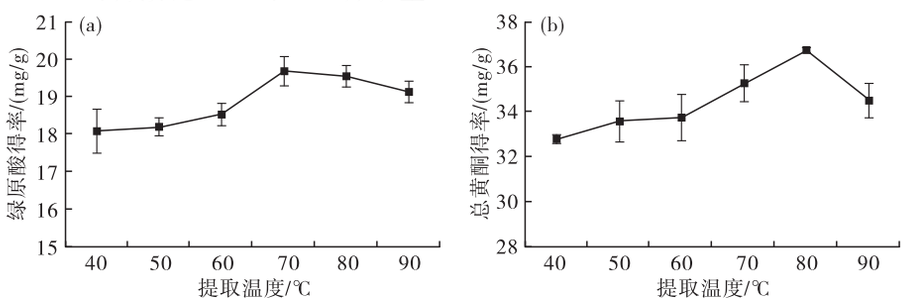

图 4　提取温度对绿原酸和总黄酮得率的影响

Fig. 4　Influence of extraction temperature on the yields of chlorogenic acid and total flavonoids

由图 4a 可知，随着提取温度的升高，绿原酸得率先缓慢增加，并在 70 ℃时达到最高值，随后逐渐下降。适当升高温度可促使绿原酸溶解度增大，分子运动加快，加速了目标产物的溶出，但温度过高会导致热敏性的绿原酸降解，其得率下降。王玉洁[26]以 60% 乙醇为溶剂提取金银花中绿原酸并进行工艺优化时，得出的提取温度对绿原酸得率影响趋势与本研究一致。因此，确定提取绿原酸的最优温度为 70 ℃。

由图 4b 可知，随着提取温度的升高，总黄酮得率先增加，并在 80 ℃时达到最高值，随后明显下降。在温度较低时，随着温度升高，黄酮类化合物溶解度增大，因而总黄酮得率增加，但温度过高会加速热敏性的黄酮类化合物的降解，使其得率下降。因此，确定提取总黄酮的最优温度为 80 ℃。

2.2.4　DES 含水量对绿原酸和总黄酮得率的影响

以氯化胆碱－乳酸（物质的量比 1∶2）为提取溶剂，在提取时间 60 min、料液比 1∶30、提取温度 70 ℃ 的条件下，研究 DES 含水量对绿原酸和总黄酮得率的影响，结果如图 5 所示。

由图 5a 可知，随着 DES 含水量的升高，绿原酸得率先增加后降低，并在 DES 含水量 30% 时达到最高值（18.88 mg/g）。说明适量水的加入会降低 DES 的黏度和表面张力，有益于绿原酸的提取，但过量的水会改变 DES 的极性，且会使氢键供、受体之间形成氢键的能力下降，从而降低提取效果。因此，确定提取绿原酸的最优 DES 含水量为 30%。

由图 5b 可知：当 DES 含水量从 20% 提高到 50% 时，总黄酮得率从 33.03 mg/g 提高到 36.81 mg/g；当 DES 含水量进一步提高到 60% 时，总黄酮得率降至 35.49 mg/g。说明适量水的加入会改变 DES 的理化性质，有利于 DES 与目标产物结合，使黄酮类化合物更易溶出，但过量的水会改变 DES 的极性，使氢键供、受体之间形成氢键的能力下降，从而降低总黄酮的提取效果。因此，确定提取总黄酮的最优 DES 含水量为 50%。

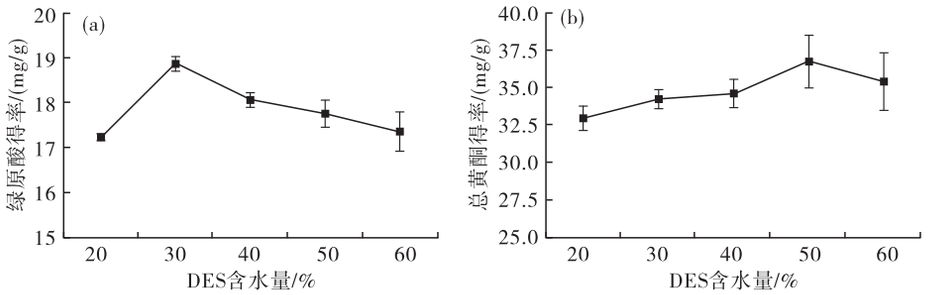

图 5 DES 含水量对绿原酸和总黄酮得率的影响

Fig. 5 Influence of water content in DES on the yields of chlorogenic acid and total flavonoids

2.2.5 验证实验

根据上述单因素实验结果,确定 DES 法提取绿原酸的最优条件为提取时间 60 min、提取温度 70 ℃、料液比 1∶30、DES 含水量 30%,在此条件下进行验证实验,绿原酸得率达 18.88 mg/g,明显高于传统的 60% 乙醇提取法(15.04 mg/g)。DES 法提取总黄酮的最优条件为提取时间 40 min、提取温度 80 ℃、料液比 1∶40、DES 含水量 50%,在此条件下进行验证实验,总黄酮得率为 38.04 mg/g,也明显高于 60% 乙醇提取法(32.22 mg/g)。由此可见,DES 法提取葵花籽绿原酸和总黄酮的效果均优于 60% 乙醇提取法。

3 结 论

采用 DES 法提取葵花籽饼中绿原酸、总黄酮,以绿原酸和总黄酮的得率为评价指标,筛选出氯化胆碱-乳酸(物质的量比 1∶2)为最佳提取溶剂,考察提取时间、料液比、提取温度、DES 含水量对二者提取效果的影响,确定绿原酸的最优提取工艺条件为提取时间 60 min、提取温度 70 ℃、料液比 1∶30、DES 含水量 30%,总黄酮的最优提取工艺条件为提取时间 40 min、提取温度 80 ℃、料液比 1∶40、DES 含水量 50%。在最优条件下,绿原酸、总黄酮得率分别达到了 18.88、38.04 mg/g,均高于传统的 60% 乙醇提取法。

参考文献:

[1] GUPTA R K, ARORA G, SHARMA R. Aerodynamic properties of sunflower seed (*Helianthus annuus* L.)[J]. J Food Eng, 2007, 79(3): 899-904.

[2] 敖燕妮, 刘君悟, 刘光泽, 等. 葵花籽粕的深加工研究现状与建议[J]. 农产品加工, 2023(17): 74-76, 80.

[3] 王立新, 倪元颖, 安效卓. 葵花蛋白的提取及在食品中的应用[J]. 食品工业科技, 1992, 13(2): 7-11, 6.

[4] 张依量. 葵花籽粕的营养特性及其在畜禽生产上应用的研究[J]. 饲料广角, 2015(2): 42-44.

[5] 张英峰,张立艳,马子川,等. 植物绿原酸的研究进展[J]. 化学教育,2011(4):1-3.

[6] 闵巍巍, 张作法. 黄酮类化合物的药理作用[J]. 蚕桑通报, 2007, 38(4): 1-3.

[7] 张维农, 刘大川, 胡小泓. 葵花籽仁中提取绿原酸的研究[J]. 中国油脂, 2002, 27(2): 76-77.

[8] 张国栋, 王晓彤, 聂文娟, 等. 葛根总黄酮的水提工艺优化研究[J]. 农产品加工, 2023(17): 44-46, 49.

[9] 胡鲜宝,范贵生,吕加平. 绿原酸提取纯化及检测方法的研究进展[J]. 农产品加工:学刊,2009(11):85-88,96.

[10] MURADOR D C, DE SOUZA MESQUITA L M, VANNUCHI N,et al. Bioavailability and biological effects of bioactive compounds extracted with natural deep eutectic solvents and ionic liquids: Advantages over conventional organic solvents[J]. Curr Opin Food Sci, 2019,26:25-34.

[11] WU J F, SU M D, HU A Y, et al. Extraction and recovery of chlorogenic acid from sunflower disks using a high-efficiency system composed of deep eutectic solvents and macroporous resins[J/OL]. J Food Process Pres,2022,46(10):16856[2024-07-27]. https://doi.org/10.1111/jfpp.16856

[12] 李祎, 熊犍, 崔春. 葵花籽粕绿原酸的提取与纯化工艺研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(10): 190-195.

[13] 袁粉粉,余长坡. 葵花籽粕中绿原酸的微波提取工艺研究[J]. 湖南饲料,2018(5):32-36.

[14] 刘正. 低共熔溶剂提取杜仲叶活性成分及绿原酸分子印迹聚合物制备研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.

[15] 曹书萍. 基于低共熔双水相优化 C-PC 纯化及其特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.

[16] JEONG K M, HAN S Y, KIM E M, et al. Deep eutectic solvent-based valorization of spent coffee grounds[J]. Food Chem, 2018, 255: 357-364.

[17] SARAVANA P S, HO T C, CHAE S J, et al. Deep eutectic solvent-based extraction and fabrication of chitin films from crustacean waste[J]. Carbohydr Polym, 2018, 195: 622-630.

[18] 苏靖媛, 张静, 刘欣, 等. 响应面法优化低共熔溶剂提取黑小麦麸皮多酚的工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(3): 22-26.

(下转第 105 页)

analysis of fatty acids and stereo - distribution of triglycerides in human milk from three regions of China[J/OL]. Food Res Int, 2020, 133: 109196[2024 - 11 - 22]. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109196.

[9] 胡盛本, 卓成飞, 邹古月, 等. 氢化大豆油和反刍动物油脂中甘油三酯和磷脂反式脂肪酸的位置分布[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 276 - 283.

[10] 王俊芳, 杨国良, 王荣艳. 婴幼儿配方奶粉中甘油三酯 Sn - 2 位脂肪酸的检测[J]. 中国乳业, 2019(7): 67 - 70.

[11] RUIZ - LOPEZ N, STUBHAUG I, IPHARRAGUERRE I, et al. Positional distribution of fatty acids in triacylglycerols and phospholipids from fillets of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed vegetable and fish oil blends [J]. Mar Drugs, 2015, 13(7): 4255 - 4269.

[12] BREIL C, ABERT VIAN M, ZEMB T, et al. "Bligh and dyer" and folch methods for solid - liquid - liquid extraction of lipids from microorganisms. Comprehension of solvatation mechanisms and towards substitution with alternative solvents [J/OL]. Int J Mol Sci, 2017, 18(4): E708[2024 - 11 - 22]. https://doi.org/10.3390/ijms18040708.

[13] 吴芮, 吴娜, 王锡昌, 等. 固相萃取 - 气相色谱法测定蒸制前后中华绒螯蟹性腺中甘油三酯和磷脂脂肪酸组成[J]. 中国食品学报, 2016, 16(6): 259 - 265.

[14] GRÜNEIS V, FRUEHWIRTH S, ZEHL M, et al. Simultaneous analysis of epoxidized and hydroperoxidized triacylglycerols in canola oil and margarine by LC - MS [J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(36): 10174 - 10184.

[15] 胡劼, 俞博凯, 吕飞, 等. 水相体系中磷脂酶 A_1 酶解南极磷虾磷脂制备溶血磷脂的分析[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 92 - 97.

[16] GOTOH N, MATSUMOTO Y, NAGAI T, et al. Actual ratios of triacylglycerol positional isomers consisting of saturated and highly unsaturated fatty acids in fishes and marine mammals [J]. Food Chem, 2011, 127(2): 467 - 472.

[17] 李金林, 胡祥飞, 万亮, 等. 三种淡水鱼不同部位中甘油三酯脂肪酸的位置分布[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 290 - 296.

[18] 张婷, 向刚, 龙胜兴. 珠江广州虎门段鱼类脂肪酸组成及其食性研究[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(14): 125 - 132.

[19] ZHANG X, NING X, HE X, et al. Fatty acid composition analyses of commercially important fish species from the Pearl River Estuary, China [J/OL]. PLoS One, 2020, 15(1): e0228276[2024 - 11 - 22]. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0228276.

[20] JOHNSON S A, KIRKPATRICK C F, MILLER N H, et al. Saturated fat intake and the prevention and management of cardiovascular disease in adults: An academy of nutrition and dietetics evidence - based nutrition practice guideline[J]. J Acad Nutr Diet, 2023, 123(12): 1808 - 1830.

[21] PARZANINI C, COLOMBO S M, KAINZ M J, et al. Discrimination between freshwater and marine fish using fatty acids: Ecological implications and future perspectives [J]. Environ Rev, 2020, 28(4): 546 - 559.

[22] ARANCETA J, PÉREZ - RODRIGO C. Recommended dietary reference intakes, nutritional goals and dietary guidelines for fat and fatty acids: A systematic review[J]. Br J Nutr, 2012, 107(Suppl 2): S8 - S22.

[23] SWANSON D, BLOCK R, MOUSA S A. *Omega* - 3 fatty acids EPA and DHA: Health benefits throughout life[J]. Adv Nutr, 2012, 3(1): 1 - 7.

[24] WU K, GAO R, TIAN F, et al. Fatty acid positional distribution (sn - 2 fatty acids) and phospholipid composition in Chinese breast milk from colostrum to mature stage[J]. Br J Nutr, 2019, 121(1): 65 - 73.

[25] 张洋. 甘油磷脂代谢通路在代谢组学和基因组学中对结直肠癌患者预后影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

(上接第 88 页)

[19] ZHU P, GU Z, HONG S, et al. One - pot production of chitin with high purity from lobster shells using choline chloride - malonic acid deep eutectic solvent [J]. Carbohydr Polym, 2017, 177: 217 - 223.

[20] 丁小刚. 低共熔溶剂中偏甘油酯脂肪酶 Lipase G50 催化高酸价米糠油脱酸的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2024.

[21] 朱凯豪, 徐中利, 张研, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取朝鲜蓟总多酚工艺优化[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(7): 104 - 108, 129.

[22] 袁恩. 柿叶多酚的低共熔溶剂提取工艺优化及生物活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.

[23] 许中畅. 向日葵花盘总黄酮的提取、纯化及其活性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.

[24] 付佳乐, 耿直. 绿色低共熔溶剂提取黄酮类化合物的研究进展[J]. 化学与生物工程, 2022, 39(7): 8 - 12.

[25] 熊苏慧, 唐洁, 李诗卉, 等. 一种新型天然低共熔溶剂用于玉竹总黄酮的绿色提取[J]. 中草药, 2018, 49(10): 2378 - 2386.

[26] 王玉洁. 金银花绿原酸和总黄酮同步提取工艺及其体外降糖活性研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江东方学院, 2022.