

紫马铃薯花色苷提取工艺优化及稳定性、抗氧化活性分析

张馨月, 赵思毅, 吴明阳, 李 益, 高 涛, 王新惠, 刘 洋

Optimization of Extraction Process of Anthocyanins from Purple-fleshed Potatoes and Its Stability and Antioxidant Activity

ZHANG Xinyue, ZHAO Siyi, WU Mingyang, LI Yi, GAO Tao, WANG Xinhui, and LIU Yang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050067>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紫马铃薯花色苷的提取、纯化及其稳定性研究

Extraction, Purification and Stability of Purple Potato Anthocyanin

食品工业科技. 2020, 41(21): 156-163 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030003>

蓝莓花色苷抗氧化功能及稳定性研究进展

Research progress in antioxidant function and stability of blueberry anthocyanins

食品工业科技. 2018, 39(4): 312-317 <https://doi.org/>

外源添加物质对黑莓清汁花色苷稳定性和抗氧化活性的影响

Effects of Exogenous Compounds on Stability and Antioxidant Activity of Anthocyanins from Blackberry juice

食品工业科技. 2019, 40(4): 56-61 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.04.009>

黑果腺肋花楸花色苷的提取工艺优化及其稳定性

Optimization of Extraction Process and Stability of Anthocyanins from *Aronia melanocarpa*

食品工业科技. 2019, 40(3): 120-126 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.020>

桑葚花色苷的提取纯化及稳定性

Extraction, Purification and Stability of Anthocyanin from Mulberry

食品工业科技. 2018, 39(14): 181-185, 199 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.14.033>

紫娟茶花青素的抗氧化活性及稳定性

Antioxidant Activity and Stability of Anthocyanins from Zijuan Tea

食品工业科技. 2018, 39(18): 17-21 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.18.004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张馨月, 赵思毅, 吴明阳, 等. 紫马铃薯花色苷提取工艺优化及稳定性、抗氧化活性分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 187–196.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050067

ZHANG Xinyue, ZHAO Siyi, WU Mingyang, et al. Optimization of Extraction Process of Anthocyanins from Purple-fleshed Potatoes and Its Stability and Antioxidant Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 187–196. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050067

· 工艺技术 ·

紫马铃薯花色苷提取工艺优化及稳定性、 抗氧化活性分析

张馨月¹, 赵思毅², 吴明阳², 李 益², 高 涛¹, 王新惠^{1,3}, 刘 洋^{1,*}

(1. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106;

2. 达州市农业科学研究院, 四川达州 635000;

3. 成都农业科技中心, 四川成都 610213)

摘要: 以甜菜碱为氢键受体, 有机酸、糖基和醇基分别为氢键供体制备天然绿色的低共熔溶剂, 基于微波辅助提取法, 通过单因素实验并结合响应面分析对紫马铃薯花色苷提取工艺进行优化。主要考察了微波时间、微波功率、溶剂含水量、溶剂摩尔比对紫马铃薯花色苷含量的影响。同时比较低共熔溶剂与常规溶剂提取对紫马铃薯花色苷在不同温度、光照条件下的稳定性, 以及 DPPH、ABTS⁺、OH 自由基清除率评价体外抗氧化能力。结果表明, 以甜菜碱和柠檬酸制备酸性低共熔溶剂, 摩尔比 1:2.1, 含水量为 28.6%, 在微波功率 800 W, 微波时间 28 s 条件下, 紫马铃薯花色苷含量可达到 228.658±1.241 mg/100 g, 较常规提取工艺含量提高了 56.92%。此外通过低共熔溶剂提取所得花色苷在不同光照、温度条件下稳定性均显著提高。其中太阳光对紫马铃薯花色苷影响最大, 避光情况下低共熔溶剂提取花色苷保存率可达 90% 以上, 常规溶剂提取花色苷保存率为 82.78%, 此外, 花色苷含量也随着温度的增加不断降低, 二者保存率均明显下降。抗氧化能力结果表明, 低共熔溶剂提取所得花色苷抗氧化能力更强, 其清除自由基能力 IC₅₀ 值均小于常规溶剂提取。DPPH 自由基清除能力 IC₅₀ 值从 45.95 μg/mL 降至 41.54 μg/mL; ABTS⁺ 自由基清除能力 IC₅₀ 值从 17.81 μg/mL 至 11.30 μg/mL; OH 自由基清除能力 IC₅₀ 值从 162.00 μg/mL 至 22.44 μg/mL。因此紫色马铃薯花色苷含量、稳定性和抗氧化活性与其提取溶剂的选择密切相关, 本提取工艺的研究为紫马铃薯花色苷的利用开发提供了新思路。

关键词: 紫马铃薯花色苷, 低共熔溶剂, 提取工艺, 稳定性, 抗氧化活性

中图分类号: TS205

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)05-0187-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050067

本文网刊:



Optimization of Extraction Process of Anthocyanins from Purple-fleshed Potatoes and Its Stability and Antioxidant Activity

ZHANG Xinyue¹, ZHAO Siyi², WU Mingyang², LI Yi², GAO Tao¹, WANG Xinhui^{1,3}, LIU Yang^{1,*}

(1. College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;

2. Dazhou Academy of Agricultural Sciences, Dazhou 635000, China;

3. Chengdu National Agricultural Science and Technology Center, Chengdu 610213, China)

Abstract: The natural deep eutectic solvent (DES) was prepared by using betaine as hydrogen bond acceptor and organic acid, sugar group and alcohol group as hydrogen bond donor. Based on microwave-assisted extraction method, the extraction process of purple-fleshed potatoes anthocyanins (PPA) was optimized by single factor experiment combined with response surface analysis. The effects of microwave time, microwave power, solvent water content and solvent molar ratio on the extraction content of PPA were investigated. Moreover, the stability of PPA under different temperature and light

收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 达州市科技计划项目 (22DWHZ0005); 成都农业科技中心地方财政专项资金项目 (NASC2023ST05)。

作者简介: 张馨月 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: changxyreal@qq.com。

* 通信作者: 刘洋 (1984-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: shuimu119@126.com。

conditions, and the free radical scavenging rates of DPPH, ABTS⁺ and OH were compared with conventional solvents to determine the antioxidant capacity *in vitro*. The results showed that the acidic deep eutectic solvent with betaine and citric acid (molar ratio of 1:2.1) and a water content of 28.6%, under the conditions of microwave power of 800 W and microwave time of 28 s, the extraction content of PPA could reach 228.658±1.241 mg/100 g, which was 56.92% higher than that of the conventional extraction process. In addition, the stability of PPA obtained by DES was significantly improved under different light and temperature conditions. The sunlight had the biggest effect on the PPA. The results showed that the preservation rate of PPA could reach more than 90% in the case of light avoidance, while the preservation rate of conventional solvent extraction was only 82.78%. Moreover, the content of anthocyanins would decrease continuously with the increase of temperature, and the preservation rate of both decreased significantly. Antioxidant capacity results demonstrated that the antioxidant capacity of PPA obtained from DES was stronger, and the values of IC₅₀ for different radical scavenging capacity were less than the conventional solvent extraction. The IC₅₀ values of DPPH radical scavenging capacity ranged from 45.95 µg/mL to 41.54 µg/mL, ABTS⁺ radical scavenging capacity IC₅₀ values from 17.81 µg/mL to 11.30 µg/mL, OH radical scavenging capacity IC₅₀ values from 162.00 µg/mL to 22.44 µg/mL. Therefore, the content, stability and antioxidant activity of PPA are closely related to the extraction solvent, and our extraction process provides a new idea for the utilization and development of purple-fleshed potatoes anthocyanins.

Key words: purple-fleshed potatoes anthocyanins; deep eutectic solvent; extraction technology; stability; antioxidant activity

紫马铃薯起源于安第斯山脉,近年来引入中国^[1],由于富含花色苷活性物质使其呈现出紫皮紫瓤^[2]。紫马铃薯花色苷(Purple-fleshed potatoes anthocyanins, PPA)作为食品天然活性物质,是一种水溶性天然色素^[3],以糖苷键与多糖结合而成^[4],广泛应用于功能膳食开发中^[5]。研究表明,花色苷不仅可以赋予食品诱人的色泽,在维持身体健康方面也发挥着重要作用,例如抗炎、调节血压、降血糖血脂等,有助于多种疾病的预防^[6-7]。目前人们对天然活性物质的需求日益增长,紫马铃薯花色苷可作为良好的天然食品色素来源^[8]。但由于花色苷在加工提取过程中极其不稳定,容易受到提取环境的影响,因此,如何高效地提取花色苷成为该产业所面临的重要问题。

目前在国内外研究中,紫马铃薯花色苷的主要提取方法为常规溶剂浸提(Conventional solvent extraction, CSE),通常采用水浴加热与乙醇溶剂进行提取^[9]。随着食品加工技术发展,更加有效的加工辅助技术开始运用于花色苷的提取,例如超声辅助提取(Ultrasonic assisted extraction, UAE)、微波辅助提取(Microwave assisted solvent extraction, MSE)、酶法和脉冲电场法等。这些新型加工技术可以有效地破坏细胞壁膜,缩短提取时间,提高花色苷含量^[10]。如 Xu 等^[11]通过响应面优化 PPA 微波提取条件,在微波功率 700 W,料液比 15:1,酸化乙醇溶液(0.3% HCl)条件下,得到紫马铃薯花色苷含量为 74.66 mg/100 g。Zhu 等^[12]通过采用 58% 乙醇溶剂(pH2.5),在超声时间为 40 min 条件下提取 PPA,得到花色苷含量 93.52 mg/100 g。但由于常规提取溶剂易挥发导致提取物不稳定不利于产品开发。同时不同提取溶剂也会影响花色苷得率、成分结构以及生物活性^[13]。因此,提取溶剂对花色苷功能活性及生产应用具有很大影响。低共熔溶剂提取法(Deep eutectic solvent, DES)作为当前的热点研究,通过制备新一代

绿色环保高效低共熔混合物^[14],由氢受体与供体通过氢键相互作用,其具有不易挥发、环保和易制备等优点^[15],其不仅绿色环保,还能提高花色苷的生物利用度^[16-17]。如 Da Silva 等^[18]构建三元低共熔溶剂氯化胆碱/丙三醇/柠檬酸(1:4:1)进行提取,使得蓝莓酚类化合物提取量达 76%。目前关于紫马铃薯花色苷低共熔溶剂提取研究,以及不同提取方法对 PPA 生物利用度对比研究较少。

因此,本研究以紫马铃薯总花色苷含量为指标,比较不同紫马铃薯干燥方式、不同提取溶剂、不同辅助技术对其影响。为紫马铃薯产业实际生产加工提供理论依据。并对所得最大花色苷含量工艺进行响应面优化,确定紫马铃薯花色苷提取的最佳工艺条件。同时在相同提取条件下,比较不同溶剂对于紫马铃薯花色苷提取物稳定性和抗氧化活性的影响,以此扩展紫马铃薯花色苷在食品、化妆品和医药行业的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

紫马铃薯 西藏凌云生物科技开发有限公司提供;DL-苹果酸、乳酸、无水甜菜碱 上海叶源生物科技有限公司;无水柠檬酸、无水葡萄糖、丙三醇 天津市津东天正精细化学试剂厂;2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)、2,2'-联苯基-1-苦基肼基(DPPH) 上海市麦克林生物科技有限公司;过硫酸钾、三氯化铁等其他常见试剂均为分析纯。

TGL-22S 高速冷冻离心机 四川蜀科仪器有限公司;MKX-H1C1A 实验室微波炉 青岛麦克威微波创新科技有限公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器 上海力辰仪器有限公司;UV-2700 紫外可见分光光度计 日本岛津有限公司;PHS-3E 型 pH 计 上海仪电科学仪器股份有限公司;Multiskan FC 全波长酶标仪 赛默飞世尔科技公司;DV-III 型

粘度计 美国博勒飞有限公司; 101 型电热鼓风干燥箱 北京科伟永兴仪器有限公司; L3.5AB 柜式热泵干燥机 成都一恒科技有限公司; Lab-1A-80 真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理 取无腐烂、无破损的新鲜紫马铃薯、洗净去皮, 切成约 0.5 cm 片状。将预处理后的紫马铃薯切片均匀平铺在样品盘上, 分别用热风干燥 (Hot air drying, HAD)、热泵干燥 (Heat pump drying, HPD) 设备在 40 ℃ 下干燥样品, 隔 2 h 取出紫马铃薯切片样品称重, 直至干燥恒重^[19]。同时, 将紫马铃薯切片于-80 ℃ 下预冻, 使用真空冷冻干燥 (Vacuum freeze drying, VFD) 设备干燥 36 h 至恒重。上述不同干燥方式制得样品, 采用液氮研磨粉碎过 100 目筛。得到三种不同制备方法的紫马铃薯冻干粉末, 并于 4 ℃、干燥、封闭环境下避光储存。

1.2.2 比较不同处理方式对紫马铃薯花色苷含量的影响

1.2.2.1 干燥方式对 PPA 含量的影响 将紫马铃薯热风干燥粉末、紫马铃薯热泵干燥粉末、紫马铃薯冷冻干燥粉末作为提取原料。定量称取不同干燥方式制备所得紫马铃薯粉于离心管中, 采用崔倩^[20]的方法, 稍加修改。根据 1:40 (g/mL) 的料液比, 加入 70% 的乙醇溶剂, 在 40 ℃ 恒温提取 60 min, 冷却至室温后离心 10 min (8000 r/min)。测定上清液中 PPA 的含量。以花色苷含量为指标, 选择最佳的紫马铃薯干燥方法。

1.2.2.2 不同提取方法对 PPA 含量的影响 选择最佳的紫马铃薯干燥方式, 采用不同方法提取紫马铃薯花色苷。CSE: 根据 1.2.2.1 中方法进行。UAE: 采用于雅静等^[21]的方法, 稍加修改; 按照 1:45 (g/mL) 的料液比加入 70% 乙醇溶液。在 30 ℃ 的初始超声温度条件下, 超声功率 80 W 超声提取 20 min, 冷却至室温后 10000 r/min 下离心 10 min, 取上清液, 测定其中 PPA 的含量。MSE: 采用韩东等^[22]的方法, 略有改动; 根据 1:50 (g/mL) 的料液比, 加入 70% 的乙醇溶剂, 在微波功率 700 W 下利用微波仪提取 30 s, 取出后冷却至室温后, 离心 10 min (10000 r/min)。测定 PPA 含量。以 PPA 含量为指标, 选择最佳的紫马铃薯花色苷提取方式。

1.2.3 DES 的制备及理化性质 由于甜菜碱是一种可进行生物降解且价格低无毒害的中性分子^[23], 故由甜菜碱作为氢键受体, 与氢键供体由不同种类的醇基、糖基和酸基组成。按照摩尔比准确称量于锥形瓶中, 在 70 ℃ 水浴下进行磁力搅拌至形成无色透明的均匀液体, 密封后置于室温下保存备用^[24]。DES 的种类及摩尔比如表 1 所示。

其中 DES-1~DES-3 为基于有机酸所制备的酸性低共熔溶剂, DES-4 和 DES-5 分别以丙三醇和葡

表 1 五种低共熔溶剂种类及摩尔比

Table 1 Five types of deep eutectic solvents and molar ratios

编号	溶剂构成		摩尔比
	氢键受体	氢键供体	
DES-1	甜菜碱	乳酸	1:3
DES-2	甜菜碱	柠檬酸	1:2
DES-3	甜菜碱	苹果酸	1:2
DES-4	甜菜碱	丙三醇	1:3
DES-5	甜菜碱	葡萄糖	1:2

萄糖作为醇基和糖基。在含水量为 30% (质量分数) 时, 取所制备不同种类 DES 溶剂 25 mL, 采用粘度计及 pH 计, 在室温下测定粘度和 pH, 探究其理化性质。

1.2.4 DES 的选择 按照 1.2.2.2 中选出的最佳方法提取紫马铃薯花色苷。将 DES 作为提取溶剂, 以 PPA 含量为指标, 选择最佳的 DES。

1.2.5 单因素实验设计 以最佳 DES 为提取溶剂, 紫马铃薯花色苷含量为评价指标, 固定 DES 溶剂摩尔比 1:2, DES 溶剂含水量 30%, 料液比 1:50, 微波功率 700 W, 微波时间 50 s 进行实验。分别考察 DES 的摩尔比 (2:1、1:1、1:2、1:3、1:4); DES 的含水量 (10%、20%、30%、40%、50%); 料液比 (1:30、1:40、1:50、1:60、1:70 g/mL); 微波功率 (500、600、700、800、900 W); 微波时间 (10、30、50、70、90 s) 对花色苷含量的影响。

1.2.6 响应面优化试验设计 根据单因素实验结果, 采用响应面试验的方法优化微波辅助 DES 提取紫马铃薯花色苷工艺, Box-Behnken 试验设计见表 2。采用 Box-Behnken Design 设计 4 因素 3 水平的响应面工艺优化试验方案, 对紫马铃薯花色苷提取工艺参数进行优化。

表 2 响应面试验因素水平

Table 2 Factors and levels of response surface methodology

水平	因素			
	A-微波时间(s)	B-微波功率(W)	C-DES含水量(%)	D-DES摩尔比
-1	10	700	20	1:1
0	30	800	30	1:2
1	50	900	40	1:3

1.2.7 总花色苷含量的测定 采用 pH 示差法测定花色苷含量^[25]。根据公式 (1) 计算花色苷含量, 花色苷含量以紫马铃薯花色苷提取液中含有的矢车菊素-3-葡萄糖苷当量来表示。

$$\text{花色苷含量}(\text{mg}/100\text{ g}) = \frac{A \times M_w \times DF \times V}{\varepsilon \times L \times W_t} \times 100$$

式 (1)

式中: M_w —矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔质量 (449.2 g/mol); A —花色苷吸光度, $A = (A_{535\text{pH}1.0} - A_{700\text{pH}1.0}) - (A_{535\text{pH}4.5} - A_{700\text{pH}4.5})$; DF —稀释倍

数; V —提取液体积(mL); ϵ —矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数(26900 L/mol·cm); L —比色皿宽度(cm); W_t —样品质量(g)。

1.2.8 PPA 稳定性评价指标 以紫马铃薯花色苷的保存率为评价指标,通过测定不同条件下花色苷含量变化,进行稳定性分析,PPA 保存率计算公式(2)如下:

$$\text{保存率}(\%) = \frac{C_1}{C_0} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: C_1 —保存后花色苷含量; C_0 —保存前花色苷含量。

1.2.9 紫马铃薯花色苷稳定性及生物活性的研究 根据响应面优化所得最佳工艺条件下,分别采用不同提取溶剂:70%乙醇溶液(EtOH)以及最佳低共熔溶剂进行提取,对不同提取溶剂所得 PPA 稳定性及抗氧化活性进行比较。

1.2.9.1 不同光照对 PPA 稳定性的影响 分别取不同提取溶剂所得 PPA 提取液样品 3 份各 10 mL,分别置于避光、自然光和太阳光下放置共 8 d,每隔 1 d 进行测定,共平行测定 8 次,测定其吸光度值并计算 PPA 保存率。

1.2.9.2 不同温度对 PPA 稳定性的影响 分别取不同提取溶剂所得 PPA 提取液样品 6 份各 10 mL,分别于 4、20、40、60、80、100 °C 放置共 8 h,每隔 1 h 进行测定,共平行测定 8 次,测定其吸光度值并计算 PPA 保存率。

1.2.9.3 PPA 对 DPPH 自由基清除能力测定 参考 Wang 等^[26]方法,稍加修改进行测定。首先取不同提取溶剂所得 PPA 提取液,配制成不同梯度溶液(50、100、150、200、160、250、300 $\mu\text{g/mL}$)。将 DPPH 试剂(0.5 mmol/L)分别与不同梯度样品溶液 1:1 混合处理。于 35 °C 恒温培养箱中,避光反应 30 min。用酶标仪在 517 nm 处测吸光度,记为样品组 A_1 ;用无水乙醇代替 DPPH 溶液,测得吸光度为对照组 A_2 ;用无水乙醇代替样品为空白对照,测得吸光度为 A_3 ;按照公式计算 DPPH 自由基清除率,D-异抗坏血酸 V_C 配制成与 PPA 溶液相同梯度溶液为阳性对照。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100$$

1.2.9.4 PPA 对 ABTS⁺自由基清除能力测定 参考 Meng 等^[27]实验方法,稍加修改测定。将 7.4 mmol/L ABTS 溶液与 4.5 mmol/L 过硫酸钾溶液等比例混合,避光下反应 12~16 h 制得 ABTS 储备液。再用无水乙醇稀释 ABTS 溶液,使其在 734 nm 处的吸光值为 0.700 ± 0.02 。取 0.1 mL 样品溶液(50~300 $\mu\text{g/mL}$)和 3 mL 的 ABTS 储备液,混匀 30 s 后,室温下避光反应 6 min,在 734 nm 处用酶标仪测定吸光值为 A_1 ;用无水乙醇代替 ABTS 工作液做样品空白对照,测得吸光度为 A_2 ;用无水乙醇代替样品溶液,测

得吸光度为 A_0 。按照公式计算 ABTS⁺自由基清除率, V_C 为阳性对照。

$$\text{ABTS}^+\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

1.2.9.5 PPA 对 OH 自由基清除能力测定 参考 Samsonowicz 等^[28]的方法加以修改。按顺序依次加入 1 mL FeSO_4 溶液(9 mmol/L)、1 mL 水杨酸溶液(9 mmol/L),再加入适量 PPA 提取液(50~300 $\mu\text{g/mL}$)和去离子水,最后加入 1 mL H_2O_2 溶液(8.8 mmol/L)混合,使反应体系总体积为 15 mL。在 37 °C 下避光反应 30 min 后,在 510 nm 下测定吸光度。OH 自由基清除能力按照公式计算,以 V_C 作为阳性对照。式中 A_0 为不加样品的空白对照组吸光度; A_1 为样品组吸光度; A_2 为不加显色剂组的吸光度。

$$\text{OH自由基清除率}(\%) = \left(\frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0}\right) \times 100$$

1.3 数据处理

采用 Microsoft office excel 2019、Design expert 10.0.3 软件进行数据处理;运用 GraphPad Prism 9.0 进行数据图的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式和提取方法对紫马铃薯花色苷含量影响比较

为了评价不同干燥方式对紫马铃薯花色苷含量影响,在相同提取条件下,比较不同干燥方式 HAD、HPD、VFD 对 PPA 含量的影响。结果如图 1(A)所示,采用 VFD 所得的紫马铃薯冻干粉提取花色苷,所得 PPA 含量最高,为 $130.15 \pm 1.27 \text{ mg/100 g}$ ($P < 0.01$)。这是由于 PPA 结构不稳定,在高温加热情况下很容易发生降解。Martynenko 等^[29]通过对蓝莓进行热处理,探究蓝莓花色苷热降解动力学变化,结果显示花色苷对热极为敏感,加热过程中其含量显著降低。而在 VFD 整个干燥过程中紫马铃薯一直处于低温真空的状态,对于易降解的花色苷破坏较小,使其有效保留。比较不同提取方法 CSE、MSE、UAE 对 PPA 提取含量的影响。由图 1(B)可以看出,采用微波辅助提取紫马铃薯花色苷效果最佳。在微波辐射的作用下,花色苷细胞通过离子迁移引起分子运动^[30]在内部快速产生热能,导致细胞组织破裂,得到 PPA 含量为 $154.65 \pm 3.10 \text{ mg/100 g}$ ($P < 0.01$),且用时最短。

2.2 不同种类 DES 对紫马铃薯花色苷含量的影响

2.2.1 DES 的选择及理化性质 不同 DES 体系对 PPA 的含量影响也不同。从图 2(A)五种 DES 理化性质图可以看出,采用有机酸基所制备的 DES 比醇基和糖基制备的 DES 具有更低的 pH,其中采用柠檬酸所制备的溶剂 pH 最小,同时以葡萄糖制备的低共熔溶剂粘度最大。从图 2(B)可知,采用有机酸基所制备的 DES 对 PPA 的含量高于糖基和醇基制备

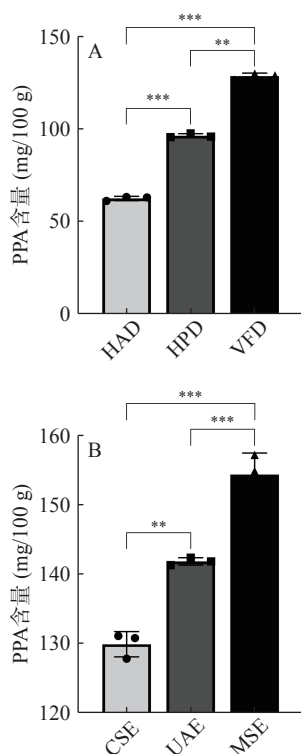


图 1 不同干燥方式(A)和提取方法(B)对 PPA 含量影响

Fig.1 Effect of different drying methods (A) and extraction methods (B) on the content of PPA

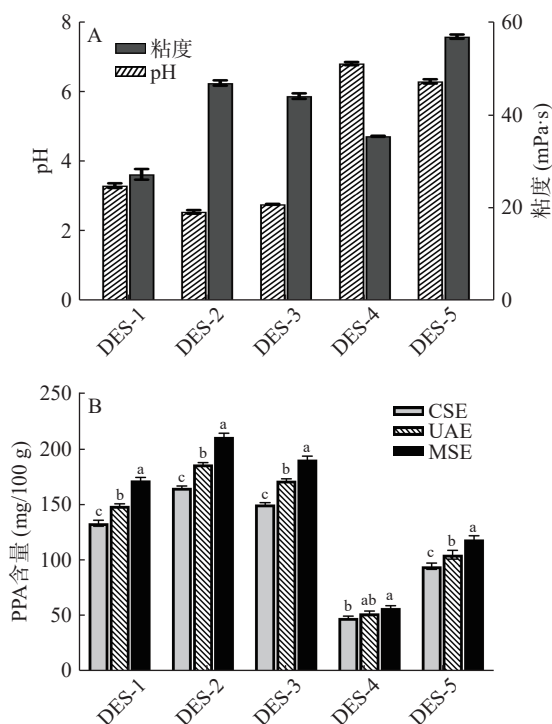
注: ** $P<0.01$; *** $P<0.001$ 。

图 2 不同 DES 溶剂的理化性质(A)和不同 DES 溶剂对 PPA 含量的影响(B)

Fig.2 Physicochemical properties of different DES (A) and effect of different DES on the content of PPA (B)

注: 不同小写字母代表同一提取溶剂下不同提取方法之间具有显著差异($P<0.05$); 图 3 同。的 DES($P<0.05$)。这是由于在酸性条件下花色苷更稳定。同时羧基可以增强低共熔溶剂组分间氢键相

互作用,从而提高提取含量^[31]。因此,本研究选择甜菜碱和柠檬酸所制备的 DES-2 作为提取溶剂。

2.2.2 不同提取溶剂比较 将纯水、60% 甲醇、70% 乙醇溶液在 1.2.2.2 三种不同提取方法下,比较不同提取溶剂对 PPA 含量影响。同时,与最佳低共熔溶剂进行比较。结果如图 3 所示,可以看出三种不同提取方法下,DES-2 作为提取溶剂所得紫马铃薯花色苷含量高于其他溶剂,这与 Bi 等^[32]采用氯化胆碱-乳酸低共熔溶剂提取桑葚花色苷效果一致,花色苷提取含量显著高于乙醇溶液。在微波辅助条件下,DES-2 提取 PPA 含量最高为 211.73 ± 3.35 mg/100 g。同时所制得低共熔溶剂安全性高、挥发性低,绿色环保。

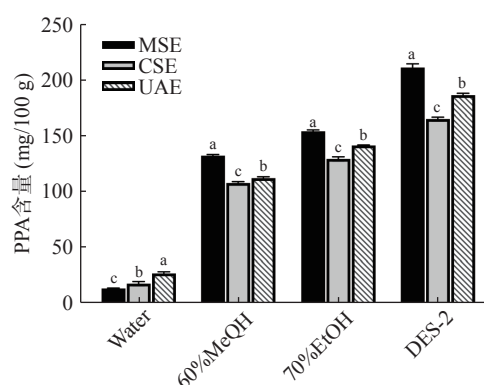


图 3 不同提取溶剂对 PPA 含量影响

Fig.3 Effect of different extraction solvents on PPA content

2.3 单因素实验结果

2.3.1 DES 的摩尔比 本研究考察不同摩尔比对紫马铃薯花色苷含量的影响。如图 4(A)所示,当甜菜碱-柠檬酸体系摩尔比从 2:1 到 1:2 时,PPA 含量逐渐增高。但当摩尔比达到 1:3 时,花色苷含量开始下降。这可能是由于氢键受体体系浓度不断降低,导致与提取物之间的可结合的氢键数量不断减少,从而导致含量降低^[33]。因此,甜菜碱和柠檬酸所组成的最佳 DES 摩尔比为 1:2。

2.3.2 DES 的含水量 由于低共熔溶剂粘度偏大,一般需在制备过程中添加适量水以此降低粘度,提高传质速率。本研究考察了不同含水量(10%、20%、30%、40% 和 50%)的低共熔溶剂对 PPA 含量的影响。如图 4(B)所示,当含水量为 30% 时溶剂体系结构变化不大,但其粘度降低、使得极性增强^[34],PPA 含量最高为 212.70 ± 1.75 mg/100 g。但随着含水量不断增大,会造成氢键受体和氢键供体之间相互作用,从而导致 DES 分子结构受到破坏,使得 PPA 含量下降^[35]。因此,DES 的最佳含水量为 30%。

2.3.3 料液比 由图 4(C)可知,随着液料比的增加,紫马铃薯花色苷含量增加,当液料比超过 1:50 后呈下降趋势。可能是由于 DES 溶剂的增加,增大 PPA 的传质,使 PPA 含量显著增加($P<0.05$)。但随着 PPA 在 DES 溶剂中溶解达到饱和后,同时 DES 体系粘度

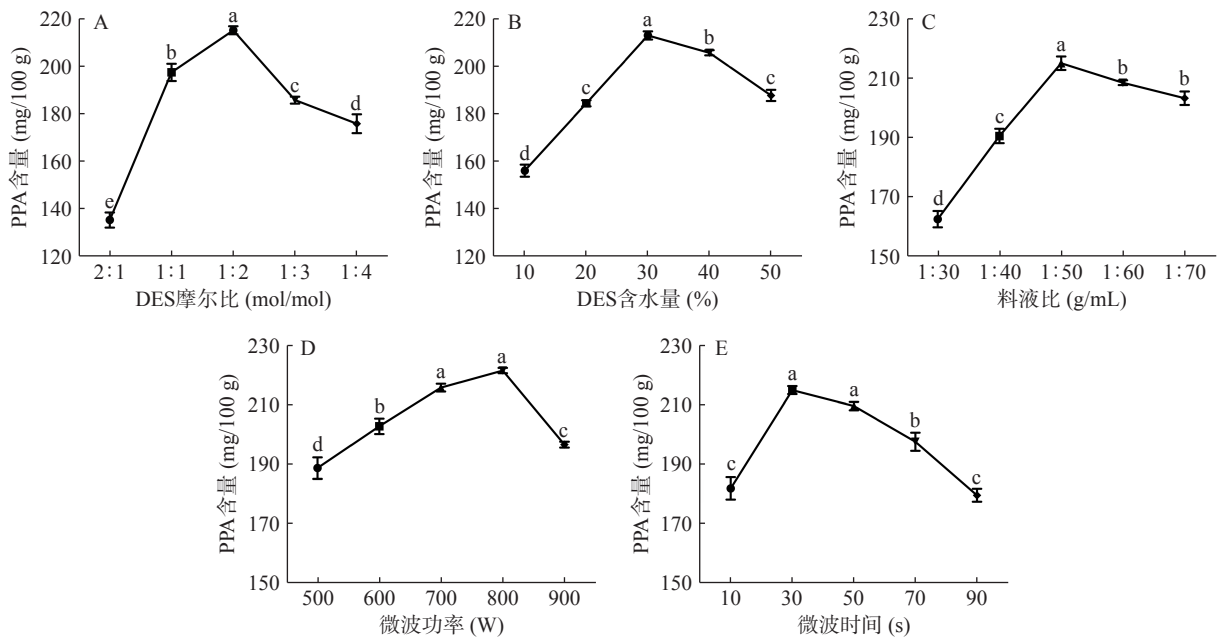


图 4 不同因素对紫马铃薯花色苷含量的影响

Fig.4 Effect of different factors on PPA content

注: 图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

不断增大, 导致紫马铃薯花色苷含量下降。因此, 最佳料液比为 1:50。

2.3.4 微波功率 由图 4(D)可知, 当微波功率从 500 W 增加到 800 W 时, PPA 含量不断提高, 但随着微波功率继续提高后, PPA 含量反而下降。这可能是由于当微波功率不断升高, 微波同时会产生较大的热能, 使得 PPA 出现热降解^[36]。因此, 选择 800 W 为最佳微波功率。

2.3.5 微波时间 考察了不同微波时间(10、30、50、70、90 s)对 PPA 含量的影响。由图 4(E)可知, 微波时间为 30 s 时, PPA 含量最高, 但当微波时间不断增加时, 含量下降。这可能是由于短时微波就能使细胞壁裂解, PPA 溶出含量升高。但随着微波时间的增加, 由于机械效应, 导致微波温度大幅度升高, 花色苷发生热降解。因此, 微波时间选择为 30 s。

2.4 微波辅助提取花色苷响应面优化试验结果

2.4.1 响应面试验结果及方差分析 为了确定最佳提取 PPA 工艺条件, 以微波时间、微波功率、DES 含水量、DES 摩尔比 4 个因素作为主要影响因素, 同时以紫马铃薯花色苷提取含量为响应值进行四因素三水平响应面试验。响应曲面优化试验设计与结果如表 3 所示。

设微波时间、微波功率、DES 含水量和 DES 摩尔比分别为 A、B、C、D, 以 PPA 含量为响应值进行多元回归拟合, 得到二次多项回归方程: $Y_{PPA \text{ 含量}} = 227.59 - 3.37A - 1.77B - 3.47C + 1.87D - 4.43AB - 2.58AC + 0.42AD - 15.58BC + 0.044BD - 3.62CD - 17.1A^2 - 13.92B^2 - 14.53C^2 - 10.54D^2$ 。回归方程方差分析结果见表 4。

由表 4 可知, 该模型差异极显著($P<0.0001$), 决

表 3 响应曲面优化试验设计与结果

Table 3 Design and results of response surface experiment					
试验号	A-微波时间(s)	B-微波功率(W)	C-DES含水量(%)	D-DES摩尔比	PPA含量(mg/100 g)
1	10	700	30	1:2	195.568
2	50	700	30	1:2	198.446
3	10	900	30	1:2	202.666
4	50	900	30	1:2	187.81
5	30	800	20	1:1	198.837
6	30	800	40	1:1	201.818
7	30	800	20	1:3	209.595
8	30	800	40	1:3	198.077
9	10	800	30	1:1	201.59
10	50	800	30	1:1	194.252
11	10	800	30	1:3	206.618
12	50	800	30	1:3	200.942
13	30	700	20	1:2	188.342
14	30	900	20	1:2	217.752
15	30	700	40	1:2	213.468
16	30	900	40	1:2	180.56
17	10	800	20	1:2	202.075
18	50	800	20	1:2	199.486
19	10	800	40	1:2	196.73
20	50	800	40	1:2	183.821
21	30	700	30	1:1	205.364
22	30	900	30	1:1	198.146
23	30	700	30	1:3	207.147
24	30	900	30	1:3	200.103
25	30	800	30	1:2	229.154
26	30	800	30	1:2	225.25
27	30	800	30	1:2	229.36
28	30	800	30	1:2	228.284
29	30	800	30	1:2	225.909

表 4 PPA 含量模型及回归系数的回归分析结果

Table 4 Results of regression analysis of PPA content model and regression coefficients

来源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	4918.77	14	351.34	66.97	<0.0001	**
A-微波时间	136.62	1	136.62	26.04	0.0002	**
B-微波功率	37.8	1	37.8	7.2	0.0178	*
C-DES含水量	144.3	1	144.3	27.5	0.0001	**
D-DES摩尔比	42.09	1	42.09	8.02	0.0133	*
AB	78.62	1	78.62	14.99	0.0017	**
AC	26.63	1	26.63	5.07	0.0408	*
AD	0.69	1	0.69	0.13	0.7222	ns
BC	970.88	1	970.88	185.05	<0.0001	**
BD	7.57E-03	1	7.57E-03	1.44E-03	0.9702	ns
CD	52.56	1	52.56	10.02	0.0069	**
A ²	1895.77	1	1895.77	361.34	<0.0001	**
B ²	1257.72	1	1257.72	239.73	<0.0001	**
C ²	1368.7	1	1368.7	260.88	<0.0001	**
D ²	719.93	1	719.93	137.22	<0.0001	**
残差	73.45	14	5.25			
失拟项	59.09	10	5.91	1.65	0.3337	ns
纯误差	14.36	4	3.59			
总和	4992.23	28				

$R^2=0.9853$ $R^2_{Adj}=0.9706$ $R^2_{Pre}=0.9273$

注: $P<0.05$ 为显著, 用*表示, $P<0.01$ 为极显著, 用**表示, $P>0.05$ 为不显著, 用ns表示。

定系数 R^2 为 0.9853, 说明模型拟合程度优良, 能较为直观地拟合试验结果。失拟项不显著($P>0.05$), 说明模型误差较小, 校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0.9706, 说明模型的相关性和解释度都很好, 可以用此模型进行理论分析和预测。分析各因素对 PPA 含量的影响可知, 一次项微波时间、DES 含水量对 PPA 含量影响极显著($P<0.01$), 微波功率、DES 摩尔比对 PPA 含量具有显著影响($P<0.05$)。4 个影响因素中, 对 PPA 含量影响次序为 $C>A>D>B$, 最大的为 DES 含水量, 其次为微波时间, 而后为 DES 摩尔比, 影响最小的为微波功率。二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对 PPA 含量的影响极显著($P<0.01$), 说明四个因素对 PPA 含量具有非线性的影响。交互项 BC、AB、CD 对 PPA 含量影响极显著($P<0.01$), AC 对 PPA 含量影响显著($P<0.05$)。

2.4.2 提取工艺响应面分析与优化 通过 3D 响应面图可以较为直观地反映出 DES 含水量、DES 摩尔比、微波时间及微波功率变量交互作用对紫马铃薯花色苷含量的影响。根据 3D 响应面形状, 曲面越陡, 说明两因素交互作用越显著, 此模型存在最大值稳定点, 紫马铃薯花色苷含量的最大值出现在中间点^[37]。

如图 5 所示, AB、AC、BC 和 CD 的 3D 响应面图下方的等高线图呈较为扁的椭圆形与方差分析相吻合, 交互作用显著。随着不同因素增加过程中, PPA 含量也呈先增加后降低的趋势, 符合方差分析结果。

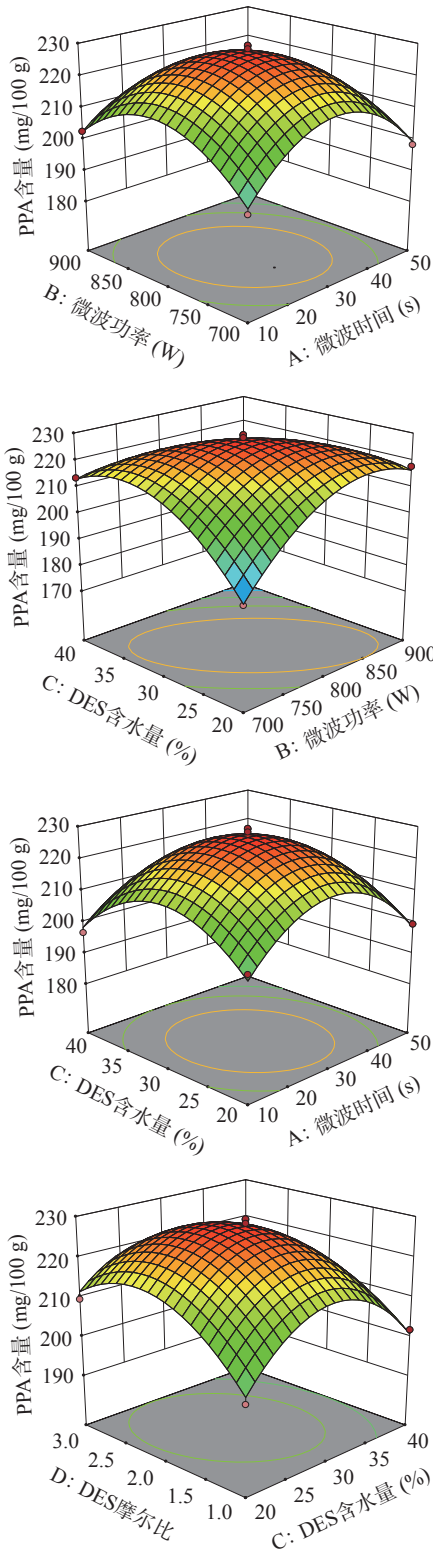


图 5 紫马铃薯花色苷含量与各因素的交互作用 3D 响应面图

Fig.5 3D Response surface plots of the interaction between PPA content and various factors

2.4.3 最佳工艺条件的验证实验 以紫马铃薯花色苷含量最大值为优化目标, 由 Design-Expert 10.0.3 软件对试验进行优化, 得到预测 PPA 含量为 228.067 mg/100 g, 四个因素的预测值分别为微波时间 28.201 s、微波功率为 802.912 W、DES 含水量 28.594%、DES 摩尔比为 1:2.111, 为了确定该模型

的准确性,采用优化后的参数进行验证实验,为方便操作,条件参数设为微波时间 28.0 s、微波功率为 800 W、DES 含水量 28.6%、DES 摩尔比为 1:2.1,该条件下重复实验 3 次,测得 PPA 含量平均值为 228.658 ± 1.241 mg/100 g,较模型预测值差异不大,说明该模型优化得到的工艺参数可靠。同时与传统浸提工艺(CES)相比,PPA 含量提高了 56.92% ($P < 0.01$)。

2.5 不同提取溶剂对紫马铃薯花色苷生物活性的影响

2.5.1 环境条件对紫马铃薯花色苷稳定性影响 根据最佳工艺条件,采用 70% 乙醇溶液(EtOH)和最优低共熔溶剂体系:甜菜碱/柠檬酸(DES-2)对 PPA 进行提取,探究不同提取溶剂对 PPA 稳定性影响。光照条件对 PPA 稳定性的影响见图 6A,可以看出在避光条件下储存 5 d 后,不同溶剂体系提取所得 PPA 均相对稳定,保存率维持在 90% 以上。自然光下 PPA 提取液降解速率较慢,但采用 EtOH 提取所得 PPA 样品下降趋势高于 DES-2。太阳光直射对 PPA 保存率影响最大,长时间光照使不同溶剂提取所得 PPA 都出现明显降解。这与张海霞等^[38]结论一致,研究认为长时间光照会导致花色苷炭骨架结构改变,导致花色苷降解,但短时间光照对花色苷影响不大。温度条件对其稳定性的影响见图 6B,在不同

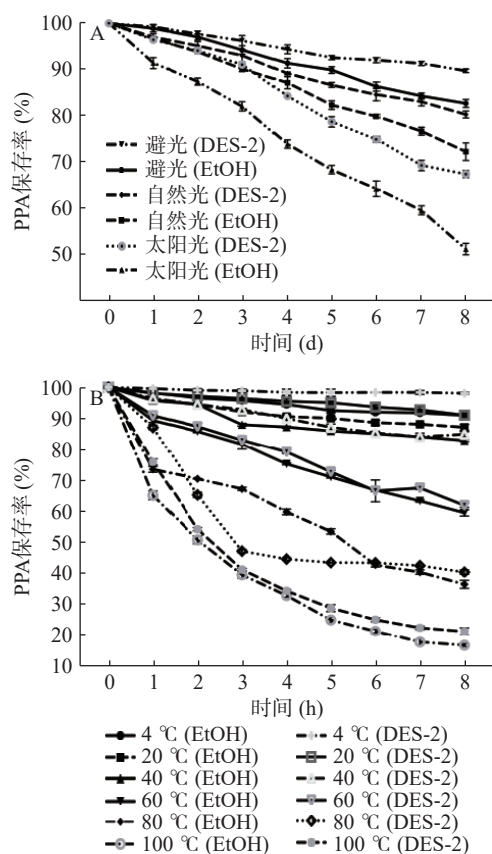


图6 不同提取溶剂对紫马铃薯花色苷在不同环境条件下的影响

Fig.6 Effects of different extraction solvents on PPA under different environmental conditions

温度环境下,PPA 保存率与温度呈反比。储存在 4、20 °C 时,DES 提取所得 PPA 放置 8 h 后保存率均在 90% 以上,但采用 EtOH 提取所得 PPA 在 20 °C 条件下保存率降至 86.04%。随着温度的提升 PPA 稳定性不断降低,且采用 EtOH 提取所得样品保存率明显低于 DES-2 体系。其下降趋势与 Condurache 等^[39]的研究相似,以 10 °C 的间隔 80~130 °C 下加热紫茄皮提取物,花青素总含量随着温度的升高而大幅度下降。以上分析可得 DES 提取所得 PPA 在不同光照、温度环境条件下,稳定性均优于 EtOH 体系,因此在食品加工贮藏过程中,紫马铃薯花色苷应保持在低温避光条件下以提高稳定性,为 PPA 实际应用加工条件选择提供理论参考。

2.5.2 紫马铃薯花色苷抗氧化活性研究 探究不同提取溶剂(EtOH/DES-2)对 PPA 体外抗氧化活性的影响。从图 7A 中看出,不同溶剂提取所得 PPA 清

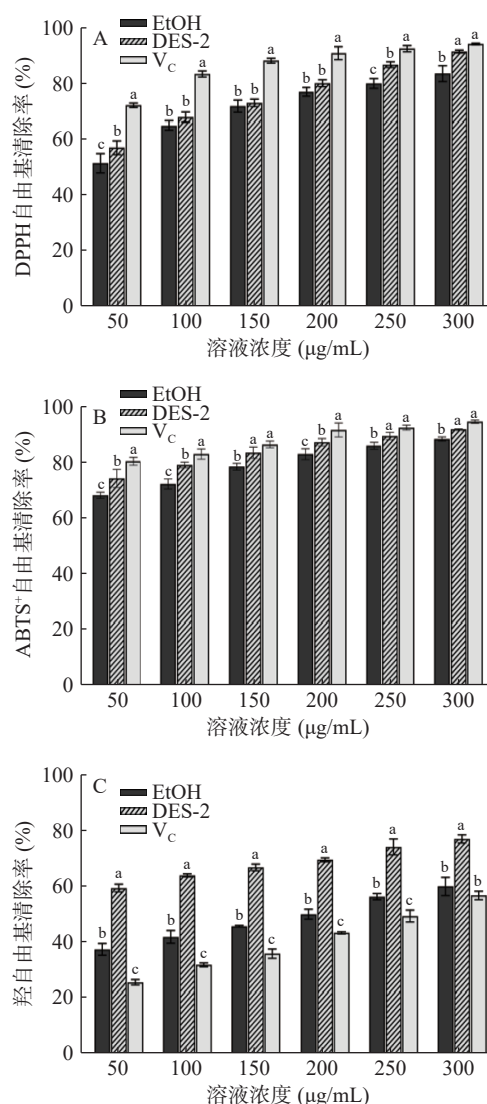


图7 不同提取溶剂对紫马铃薯花色苷抗氧化活性影响

Fig.7 Effects of different extraction solvents on antioxidant activity of PPA

注:不同小写字母代表同一浓度下不同组别之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

除 DPPH 自由基能力与其浓度都呈正比关系,随着浓度的增大而增强。但 V_C 抗氧化能力稍强于 PPA,当质量浓度为 300 $\mu\text{g/mL}$ 时,EtOH、DES-2 和 V_C 的自由基清除能力分别为 84.20%、92.12% 和 94.86%。从图 7B 可以看出当不同溶剂提取所得 PPA 浓度从 50 $\mu\text{g/mL}$ 上升到 300 $\mu\text{g/mL}$ 时,DES-2 所得样品对 ABTS^+ 自由基清除率从 74.50% 增加至 92.08%,EtOH 所得样品对 ABTS^+ 自由基清除率从 68.37% 增加至 88.61%,两者均与浓度呈正比。如图 7C 所示,在不同溶剂提取所得 PPA 样品浓度为 50 $\mu\text{g/mL}$ 时,清除率均优于 V_C 。当样品浓度达到 300 $\mu\text{g/mL}$ 时,EtOH 和 DES-2 溶剂提取所得样品对羟自由基的清除率分别为 60.25% 和 77.53%。通过计算得到不同样品对自由基清除能力的 IC_{50} 如表 5 所示。因此可以得出,通过微波辅助 DES-2 提取所得的 PPA 抗氧化活性优于常规溶剂提取。

表 5 抗氧化能力 IC_{50} 值分析结果
Table 5 Results of IC_{50} analysis of antioxidant capacity

样品	$\text{IC}_{50}(\mu\text{g/mL})$		
	DPPH抗氧化能力	ABTS抗氧化能力	OH抗氧化能力
EtOH	45.95	17.81	162.00
DES-2	41.54	11.30	22.44
V_C	19.24	7.20	251.30

3 结论

本研究通过比较花色苷含量,确定紫马铃薯干燥方式、花色苷提取方法以及溶剂的选择。通过响应面优化微波辅助低共熔溶剂提取紫马铃薯花色苷工艺。在最优工艺条件下,与常规溶剂提取比较所得花色苷生物活性。该法通过甜菜碱/柠檬酸为氢键受体与供体制备酸性低共熔溶剂,在最优条件下所得紫马铃薯花色苷含量达 $228.658 \pm 1.241 \text{ mg/100 g}$ 。通过考察稳定性影响,同时与常规浸提相比,DES-2 提取所得紫马铃薯花色苷稳定性更好。在不同光照下对紫马铃薯花色苷影响最大为太阳光,避光情况下紫马铃薯花色苷保存率可达 90% 以上。随着温度的升高,紫马铃薯花色苷的降解速度明显加快。抗氧化能力结果显示,通过 DES-2 提取所得花色苷的 DPPH 自由基清除能力 IC_{50} 值为 41.54 $\mu\text{g/mL}$, ABTS^+ 自由基清除能力 IC_{50} 值为 11.30 $\mu\text{g/mL}$,OH 自由基清除能力 IC_{50} 值为 22.44 $\mu\text{g/mL}$,均强于通过常规溶剂提取。因此研究表明,溶剂选择不仅对紫马铃薯花色苷含量产生影响,同时对紫马铃薯花色苷生物活性也会产生一定影响,本研究制备的低共熔溶剂可有效提升花色苷生物利用度,为后续花色苷产品的开发提供研究基础。但目前的研究对花色苷的结构成分变化尚有不足,花色苷降解过程中结构的改变有待探究,在接下来的研究中,对采用不同溶剂方法提取所得花色苷进行组分鉴定及成分分析,为合理开发紫马铃薯花色苷资源提供科学依据。

参考文献

- [1] AHMED S, ZHOU X, PANG Y, et al. Genetic diversity of potato genotypes estimated by starch physicochemical properties and microsatellite markers[J]. *Food Chemistry*, 2018, 257: 368–375.
- [2] 赵晶,郝金伟,李萌,等.紫马铃薯与百香果复合果蔬汁饮料[J]. *食品工业*, 2019, 40(9): 56–61. [ZHAO J, HAO J W, LI M, et al. Purple potato and passion fruit composite fruit and vegetable juice[J]. *Food Industry*, 2019, 40(9): 56–61.]
- [3] 李安,刘小雨,张惟广.发酵及贮藏条件对蓝莓果酒花色苷稳定性的影响及其抗氧化性研究[J]. *中国酿造*, 2020, 39(2): 146–151. [LI A, LIU X Y, ZHANG W G. Study on the stability and antioxidant capacity of blueberry wine anthocyanins under fermentation and storage conditions[J]. *China Brewing*, 2020, 39(2): 146–151.]
- [4] 朱玉洁.葡聚糖凝胶柱层析富集黑果枸杞总花色苷工艺及其抗氧化性研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(7): 12–18. [ZHU Y J. Study on the enrichment of total anthocyanins from black goji berry by glucan gel column chromatography and its antioxidant capacity[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(7): 12–18.]
- [5] STEVENS L J, KUCZEK T, BURGESS J R, et al. Mechanisms of behavioral, atopic, and other reactions to artificial food colors in children[J]. *Nutrition Reviews*, 2013, 71(5): 268–281.
- [6] YOUSUF B, GUL K, WANI A A, et al. Health benefits of anthocyanins and their encapsulation for potential use in food systems: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(13): 2223–2230.
- [7] DENEV P, CÍ M, KRATCHANOVA M, et al. Black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) polyphenols reveal different antioxidant, antimicrobial and neutrophil-modulating activities[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 108–117.
- [8] WEBER F, BOCH K, SCHIEBER A. Influence of copigmentation on the stability of spray dried anthocyanins from blackberry[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2017, 75: 72–77.
- [9] HEINONEN J, FARAHMANDAZAD H, VUORINEN A, et al. Extraction and purification of anthocyanins from purple-fleshed potato[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2016, 99: 136–146.
- [10] CAI Z, QU Z, LAN Y, et al. Conventional, ultrasound-assisted, and accelerated-solvent extractions of anthocyanins from purple sweet potatoes[J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 266–272.
- [11] XU Z, GAO Y, SHI S, LIU X. Study on the extraction of pigment from purple sweet potato powder by microwave-assisted technique[J]. *Food Science*, 2005, 26: 234–239.
- [12] ZHU Z, GUAN Q, KOU BAA M, et al. HPLC-DAD-ESI-MS2 analytical profile of extracts obtained from purple sweet potato after green ultrasound-assisted extraction[J]. *Food Chemistry*, 2017, 215: 391–400.
- [13] JOKIOJA J, LINDERBORG K M, KORTESNIEMI M, et al. Anthocyanin-rich extract from purple potatoes decreases postprandial glycemic response and affects inflammation markers in healthy men[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125797.
- [14] ZANNOU O, KOCA I, ALDAWOU D T M S, et al. Recovery and stabilization of anthocyanins and phenolic antioxidants of roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) with hydrophilic deep eutectic solvents[J]. *Molecules*, 2020, 25(16): 3715.
- [15] POPOVIC B M, MICIC N, POTKONJAK A, et al. Novel extraction of polyphenols from sour cherry pomace using natural deep eutectic solvents-ultrafast microwave-assisted NADES preparation and extraction[J]. *Food Chemistry*, 2022, 366: 130562–130562.

- [16] YAN X Y, CAI Z H, ZHAO P Q, et al. Application of a novel and green temperature-responsive deep eutectic solvent system to simultaneously extract and separate different polar active phytochemicals from *Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill[J]. *Food Research International*, 2023, 165: 112541–112541.
- [17] OLAWUYI I F, PARK J J, LEE W Y. Preparation and film properties of carboxymethyl cellulose from leafstalk waste of okra: Comparative study of conventional and deep eutectic solvent pulping methods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 138: 108464–108464.
- [18] DA SILVA D T, SMANIOTTO F A, COSTA I F, et al. Natural deep eutectic solvent (NADES): A strategy to improve the bioavailability of blueberry phenolic compounds in a ready-to-use extract[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130370–130370.
- [19] 仇干, 李雨杰, 王丹凤, 等. 紫马铃薯片真空微波干燥动力学及工艺优化[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2018, 36(2): 70–75, 82. [QIU G, LI Y J, WANG D F, et al. Vacuum microwave drying kinetics and process optimization of purple sweet potato slices[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2018, 36(2): 70–75, 82.]
- [20] 崔倩. 紫马铃薯花色苷的提取纯化和结构鉴定[D]. 杭州: 浙江大学, 2011. [CUI Q. Study on purple potato anthocyanins extraction, isolation and identification[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.]
- [21] 于雅静, 单虹宇, 孔露, 等. 响应面法优化玫瑰花色苷超声辅助提取工艺[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(13): 173–179. [YU Y J, SHAN H Y, KONG L, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of rose anthocyanins by response surface methodology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(13): 173–179.]
- [22] 韩东, 李建颖, 孙怡, 等. 黑果腺肋花楸花色苷微波辅助提取工艺优化[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(13): 59–65. [HAN D, LI J Y, SUN Y, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of anthocyanins from black fruited gland ribbed Sorbus[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(13): 59–65.]
- [23] XIA N, XIONG L, BI S, et al. Development of biocompatible DES/NADES as co-solvents for efficient biosynthesis of chiral alcohols[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2020, 43: 1987–1997.
- [24] OOMEN W W, BEGINES P, MUSTAFA N R, et al. Natural deep eutectic solvent extraction of flavonoids of *Scutellaria baicalensis* as a replacement for conventional organic solvents[J]. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2020, 25(3): 617–617.
- [25] 于世莹, 王文秀, 马倩云, 等. 紫马铃薯花色苷的提取、纯化及其稳定性研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(21): 156–163. [YU S Y, WANG W X, MA Q Y, et al. Extraction, purification and stability study of anthocyanins from purple sweet potato[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(21): 156–163.]
- [26] WANG Y, JIA J, REN X, et al. Extraction, preliminary characterization and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharides from *Oudemansiella radicata* mushroom[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 1760–1769.
- [27] MENG L, ZHU J, MA Y, et al. Composition and antioxidant activity of anthocyanins from *Aronia melanocarpa* cultivated in Haicheng, Liaoning, China[J]. *Food Bioscience*, 2019, 30(C): 106102–106102.
- [28] SAMSONOWICZ M, REGULSKA E, KARPOWICZ D, et al. Antioxidant properties of coffee substitutes rich in polyphenols and minerals[J]. *Food Chemistry*, 2019, 278: 101–109.
- [29] MARTYNENKO A, CHEN Y. Degradation kinetics of total anthocyanins and formation of polymeric color in blueberry hydrothermodynamic (HTD) processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 171(4): 44–51.
- [30] NAVAS M J, JIMÉNEZ-MORENO A M, BUENO J M, et al. Analysis and antioxidant capacity of anthocyanin pigments. Part IV: Extraction of anthocyanins[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2012, 42(4): 313–342.
- [31] ALI A R. Review on extraction of phenolic compounds from natural sources using green deep eutectic solvents[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(3): 878–912.
- [32] BI Y H, CHI X W, ZHANG R, et al. Highly efficient extraction of mulberry anthocyanins in deep eutectic solvents: Insights of degradation kinetics and stability evaluation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102512.
- [33] SKARPALEZOS D, DETSI A. Deep eutectic solvents as extraction media for valuable flavonoids from natural sources[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 4169–4169.
- [34] BERTOLO M R V, MARTINS V C A, PLEPIS A M G, et al. Utilization of pomegranate peel waste: Natural deep eutectic solvents as a green strategy to recover valuable phenolic compounds[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 327: 129471–129471.
- [35] BOSILJKOV T, DUJMI F, CVJETKO BUBALO M, et al. Natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction: Green approaches for extraction of wine lees anthocyanins[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2017, 102: 195–203.
- [36] SHANG X, ZHANG M, HU J, et al. Chemical compositions, extraction optimizations, and *in vitro* bioactivities of flavonoids from perilla leaves (*Perillae folium*) by microwave-assisted natural deep eutectic solvents[J]. *Antioxidants*, 2022, 12(1): 104–104.
- [37] HADAVI R, JAFARI S M, KATOZIAN I. Nanoliposomal encapsulation of saffron bioactive compounds; characterization and optimization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 164: 4046–4053.
- [38] 张海霞, 包良, 王晓兰, 等. 紫色马铃薯花青素的提取和稳定性评价[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(11): 103–108. [ZHANG H X, BAO L, WANG X L, et al. Extraction and stability evaluation of anthocyanins from purple sweet potato[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(11): 103–108.]
- [39] CONDURACHE N N, CROITORU C, ENACHI E, et al. Eggplant peels as a valuable source of anthocyanins: Extraction, thermal stability and biological activities[J]. *Plants*, 2021, 10(3): 577.