

雨生红球藻虾青素低共熔溶剂提取工艺优化及抗氧化活性研究

王芳虹^{1,2} 王萌² 赵晓燕² 冯婧惠^{1,2} 刘红开²

(1. 济南大学生物科学与技术学院, 山东 济南 250022; 2. 济南大学文化和旅游学院, 山东 济南 250022)

摘要: [目的] 优化低共熔溶剂(DES)提取雨生红球藻虾青素工艺, 并评价虾青素的体外抗氧化活性。[方法] 采用氯化胆碱—乙二醇作为提取溶剂, 以虾青素提取率为指标, 通过单因素试验结合响应面法优化提取工艺, 并测定虾青素的DPPH自由基和羟自由基清除能力, 进一步研究虾青素对鲜切苹果的保鲜效果。[结果] 确定了氯化胆碱—乙二醇提取雨生红球藻虾青素的最佳工艺参数为: 溶剂含水量 10%、提取温度 45 °C、提取时间 99 min、料液比 1:16 (g/mL), 在此条件下虾青素提取率为 38.64 mg/g。该方法制备的虾青素提取液(40 μmol/L)对 DPPH 自由基和羟自由基清除率分别为 39.04%, 90.15%。虾青素可以有效延缓鲜切苹果失重率, 25 mg/mL 的虾青素溶液对丙二醛的抑制率高达 53.88%。[结论] 基于低共熔溶剂法从雨生红球藻中分离出虾青素是可行的, 通过该方法提取的虾青素有较强的抗氧化活性, 并且对鲜切苹果有一定的保鲜作用。

关键词: 虾青素; 雨生红球藻; 低共熔溶剂; 抗氧化活性

Optimization of deep eutectic solvent (DES) extraction process for astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* and evaluation of its antioxidant activity

WANG Fanghong^{1,2} WANG Meng² ZHAO Xiaoyan² FENG Jinghui^{1,2} LIU Hongkai²

(1. School of Biological Science and Technology, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China;

2. Culture and Tourism College, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China)

Abstract: [Objective] To optimize the extraction process of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* with deep eutectic solvent (DES) and evaluate the antioxidant activity of the extracted astaxanthin. [Methods] The choline chloride-ethylene glycol system is employed to optimize the astaxanthin extraction process from *H. pluvialis* through single-factor experiments and response surface methodology, with extraction rate as the key indicator. The DPPH and hydroxyl radical scavenging activities of astaxanthin are determined, followed by assessment of preservation effects on fresh-cut apples. [Results] The optimal process parameters for the extraction of astaxanthin from *H. pluvialis* by choline chloride-ethylene glycol are determined as follows: solvent water content of 10%, extraction temperature of 45 °C, extraction time of 99 min, and solid-to-liquid ratio of 1:16 (g/mL). Under these conditions, the extraction rate of astaxanthin is 38.64 mg/g. The DPPH and hydroxyl free radical scavenging rates of astaxanthin extract (40 μmol/L) prepared by this method are 39.04% and 90.15%, respectively. Astaxanthin can effectively delay the weight loss rate of fresh-cut apples, and 25 mg/mL astaxanthin extract decreases the malondialdehyde content by as high as 53.88%. [Conclusion] It is feasible to isolate astaxanthin from *H. pluvialis* based on the DES

基金项目: 山东省自然科学基金(编号: ZR2023MC198); 山东省重点研发计划(编号: 2019QYTPY058)

通信作者: 赵晓燕(1975—), 女, 济南大学教授, 博士。E-mail: zhaoxy_2201@163.com

收稿日期: 2024-04-18 改回日期: 2025-08-23

引用格式: 王芳虹, 王萌, 赵晓燕, 等. 雨生红球藻虾青素低共熔溶剂提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 163-170.

Citation: WANG Fanghong, WANG Meng, ZHAO Xiaoyan, et al. Optimization of deep eutectic solvent (DES) extraction process for astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* and evaluation of its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2025, 41(12): 163-170.

method. The astaxanthin extracted by this method has strong antioxidant activity and a certain preservation effect on fresh-cut apples.

Keywords: astaxanthin; *Haematococcus pluvialis*; deep eutectic solvent; antioxidant activity

虾青素拥有卓越的抗氧化能力和突出的着色能力,在饲料工业、功能性食品、医疗产业、化妆美容等领域有广泛的应用前景^[1]。虾青素的生产分为生物提取与化学合成两大类型,但化学合成的虾青素在多个方面存在明显不足。在结构上,虾青素分子存在左旋(3S,3'S)、内消旋(3R,3'S)和右旋(3R,3'R)3种旋光异构体,其中3S,3'S构型有更高的生物活性^[2]。生物提取的虾青素主要为3S,3'S酯化结构,化学合成的虾青素大多是上述3种构型的混合物,其中以3R-3'S构型最多^[3]。并且生物提取的虾青素中含有叶黄素、维生素E等协同抗氧化成分,而化学合成的虾青素缺乏这些增效物质。在安全性和应用方面,化学合成虾青素存在更多不确定性,合成过程中可能残留有机溶剂及催化剂^[4]。雨生红球藻来源的虾青素已被批准用作人类膳食补充剂,而合成虾青素因立体构型和安全性数据不足,目前仅限用于动物饲料^[5]。

低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DES)通常是由2种或2种以上的组分混合形成的共熔混合物,包括氢键供体和氢键受体,它们通过氢键作用形成相对稳定的混合体系,展现出与离子液体类似的物理化学特性,同时具备原料价格低廉、容易制备、安全性高、生物可降解等特点^[6-7]。目前,低共熔溶剂对酚酸类、强心苷类、生物碱、黄酮类化合物及其他化学成分的提取具有重要价值^[8]。已有研究将DES应用于虾壳中虾青素的提取,刘宇航等^[9]利用乳酸—氯化胆碱构成的DES优化了虾壳中虾青素的提取工艺,最终获得的虾青素得率为24.41 μg/g。雨生红球藻细胞壁较厚,其细胞内的虾青素主要以酯化形式存在,并与脂质体结合形成油性复合物^[10],直接使用溶剂提取其中的虾青素比较困难。研究拟将破壁研磨萃取法和低共熔溶剂法结合,探究其对雨生红球藻虾青素的提取效果,优化提取工艺,并研究虾青素的抗氧化活性及其对苹果的保鲜效果,旨在为有效利用虾青素及拓展DES应用领域提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

雨生红球藻粉:云南时光印记生物科技有限公司;
氯化胆碱:分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;
乙二醇、过氧化氢(30%):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;
无水乙醇、二甲基亚砜:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平:FA2204B型,上海佑科仪器仪表有限

公司;

分析天平:YP20002型,上海佑科仪器仪表有限公司;

可见分光光度计:V5000型,上海元析股份有限公司;

台式高速冷冻离心机:TGL-16M型,上海卢湘仪实验室仪器有限公司;

水浴恒温振荡器:SHZ-C型,常州市国旺仪器制造有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 破壁研磨萃取法与DES法结合提取虾青素

(1) 破壁研磨萃取:根据符力丹^[11]的方法,修改如下:称取一定量藻粉于研钵中研磨3 h,用胶头滴管滴加适量乙酸乙酯;随后加入没过藻粉量1~2 cm的乙酸乙酯继续研磨2 h。

(2) DES的制备:根据毛立忠等^[12]和Dai等^[13]的方法,修改如下:称取适量的氢键受体(HBA)氯化胆碱与不同氢键供体(HBD)按一定摩尔比(详情见表1)置于50 mL离心管中,并加适量去离子水调节,控制含水量10%,加热到80 °C直至在水浴恒温振荡器中形成稳定、透明的溶液,备用。

表1 DES各组分及其摩尔比

Table 1 DES components and their molar ratios

缩写	组分1(HBA)	组分2(HBD)	摩尔比
DES-1	氯化胆碱	柠檬酸	1:1
DES-2	氯化胆碱	葡萄糖	1:1
DES-3	氯化胆碱	乳酸	1:1
DES-4	氯化胆碱	果糖	1:1
DES-5	L-脯氨酸	乙二醇	1:1
DES-6	氯化胆碱	乙二醇	1:1

(3) DES提取虾青素:根据冯芳^[14]的方法,修改如下:称取0.5 g已研磨处理后的雨生红球藻粉,与10 mL不同DES混合于50 mL离心管中,40 °C水浴恒温振荡40 min,涡旋1 min,继续振荡40 min,整个提取过程应避光。反应结束后,混合物于8 600 r/min下离心15 min,上清液即为虾青素提取液。

(4) 虾青素提取率的测定:取适量样品液,用DES稀释后混匀,在454 nm处测定吸光值。虾青素标准曲线为 $y=0.1164x+0.0606$, $R^2=0.9951$ 。按式(1)计算虾青素提取率。

$$R = \frac{C \times V}{m}, \quad (1)$$

式中:

R ——虾青素提取率, mg/g;

C ——标准曲线得出的稀释前样品质量浓度, mg/mL;

V ——样品提取液体积, mL;

m ——雨生红球藻原虾青素含量, g。

1.3.2 DES 提取工艺的单因素试验 主要考察提取温度、提取时间、料液比和溶剂含水量4个要素,并将提取温度40℃、提取时间80 min、料液比1:20 (g/mL)和溶剂含水量10%作为初始提取条件,分别考察提取温度(20, 30, 40, 50, 60℃)、提取时间(40, 60, 80, 100, 120 min)、料液比[1:5, 1:10, 1:15, 1:20, 1:25 (g/mL)]和溶剂含水量(5%, 10%, 15%, 20%, 25%)对虾青素提取率的影响^[15]。

1.3.3 DES 提取工艺的响应面优化 通过单因素试验确定提取温度、提取时间和料液比作为考察因素,通过BBD设计三因素三水平的响应面优化试验。

1.3.4 虾青素抗氧化活性研究 称取虾青素油树脂0.002 4 g,配制成80 μmol/L的虾青素油树脂溶液,用二甲基亚砜稀释成系列浓度8, 16, 24, 32, 40 μmol/L的样品溶液,注意避光。根据王凯^{[16] 10-11}的方法测定虾青素样品液对DPPH自由基和羟自由基的清除率。

1.3.5 虾青素在鲜切苹果保鲜上的应用

(1) 鲜切苹果的处理:根据张欣^{[17] 36}的方法,修改如下:用无菌水洗净苹果,去掉苹果皮与苹果核,将苹果皮与核的中间果肉取出,切分成1 cm³大小的方块,然后在所有的苹果方块中均匀采样;采样苹果用以二甲基亚砜制备的不同质量浓度的虾青素溶液(5, 15, 25 mg/mL)和二甲基亚砜分别浸泡1 h。以未经溶液处理的样品作为空白对照。所有样品存放于密封保鲜盒中,并做好避光措施,贮藏于4℃冰箱中,分别在0, 2, 4, 6, 8, 10 d时取样测定失重率、糖度和丙二醛(MDA)含量。

(2) 失重率测定:采用直接称量法,按式(2)计算失重率。

$$Y_n = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

Y_n ——保鲜第n天鲜切苹果的失重率, %;

W_0 ——鲜切苹果的原始质量, g;

W_n ——保鲜第n天鲜切苹果的质量, g。

(3) 糖度测定:根据张欣^{[17] 37}的方法。

(4) MDA含量测定:根据刘荣^[18]的方法,修改如下:在提前预冷的研钵中,加入不同处理的鲜切苹果和15 mL 10%的三氯乙酸溶液,低温环境下研磨成匀浆,4℃、10 000 r/min下离心15 min,收集上清液,取2 mL(对照取2 mL三氯乙酸溶液)到10 mL的带盖离心管中,移取0.67%的2-硫代巴比妥酸溶液2 mL加入离心管中,混合。

按式(3)计算MDA含量。

$$Y_m = \frac{6.45(A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450}}{W} \times V, \quad (3)$$

式中:

Y_m ——MDA含量, nmol/g;

A_{450} ——样品在450 nm处的吸光值;

A_{532} ——样品在532 nm处的吸光值;

A_{600} ——样品在600 nm处的吸光值;

V ——样品上清液的体积, mL;

W ——样品的质量, g。

1.4 数据处理

每个数据均进行3次重复试验,并通过SPSS 24.0软件单因素方差分析取平均值,计算标准偏差,Duncan检验对数据进行显著性分析,差异显著性 $P < 0.05$ 。响应面分析使用Design-Expert 8.0.6 (Stat-Ease Inc., Minneapolis, MN, USA)作为分析软件,绘图使用Origin 2018软件。

2 结果与讨论

2.1 DES制备及筛选

因DES-5混合制备后呈现藻红色,与原料雨生红球藻粉颜色相似,所以不再用于后续试验。由图1可知,剩余5种低共熔溶剂均可提取雨生红球藻中的虾青素,其中氯化胆碱—乙二醇溶液对雨生红球藻中的虾青素提取效果最佳(35.22 mg/g),由相似相溶原理可知,氯化胆碱—乙二醇溶液的极性更接近原虾青素的极性^[19]。因此,选择10%含水量的氯化胆碱—乙二醇($n_{\text{氯化胆碱}}:n_{\text{乙二醇}} = 1:1$)溶液作为提取溶剂。

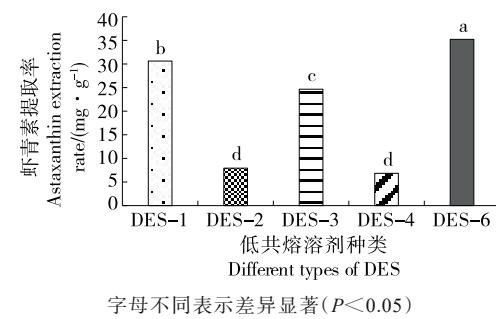


图1 5种DES提取虾青素的提取率

Figure 1 Extraction rates of astaxanthin with six different DESs

2.2 单因素试验

2.2.1 提取温度的选择 由图2(a)可知,提取温度对虾青素提取率有显著影响,随着提取温度增加,虾青素提取率呈先增加后降低的趋势,当提取温度达到40℃时,虾青素提取率高达35.41 mg/g。其原因可能是提取温度在40℃以内时,提取温度越高DES黏度越小,提取溶剂的传质速率越大,有利于虾青素的扩散与溶出,加强虾青素的

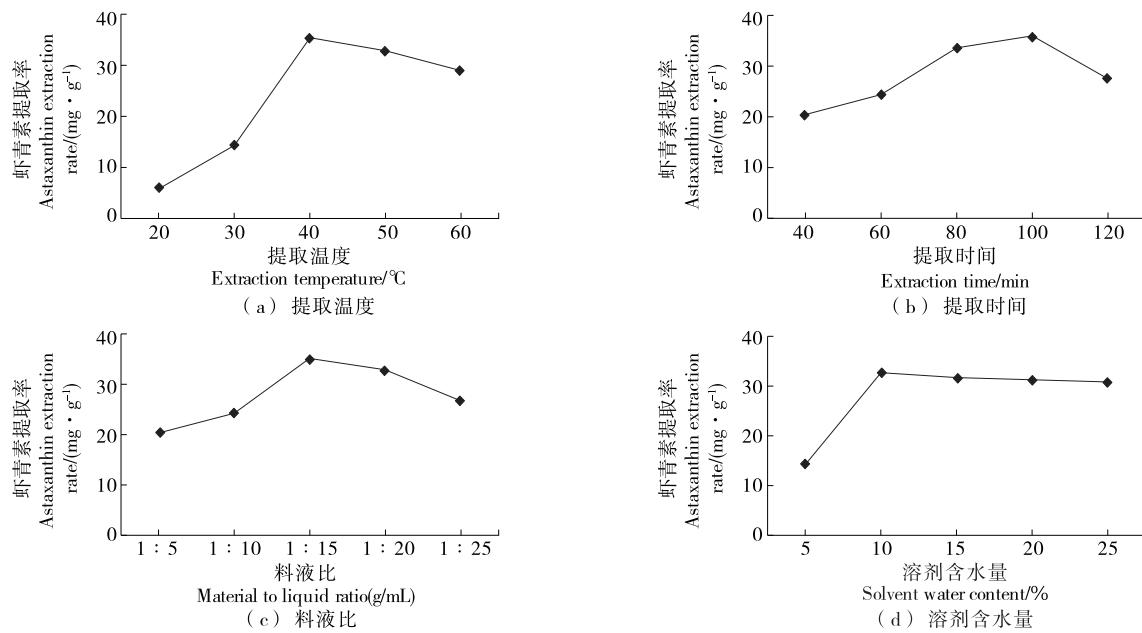


图 2 单因素对虾青素提取率的影响
Figure 2 Effects of single factors on the extraction rate of astaxanthin

提取效果;当提取温度超出 40 °C 后,虾青素的分子结构被破坏,虾青素成分也会发生一定程度的氧化,导致虾青素提取率降低^[20]。故选择提取温度 40 °C 为提取条件。

2.2.2 提取时间的选择 由图 2(b)可知,随着提取时间的延长,虾青素提取率呈先增加后降低的趋势,当提取时间达到 100 min 时,提取率最高,为 35.96 mg/g;当提取时间超过 100 min 之后虾青素提取率降低。这是因为充分的提取时间可以使溶液的渗透更加容易,使溶质充分溶解扩散,能够提高提取率,然而过长时间的温热处理可能使虾青素分解,从而不利于提取^[21]。故选择提取时间 100 min 为提取条件。

2.2.3 料液比的选择 由图 2(c)可知,随着液料比增加,虾青素提取率呈先增加后降低的趋势,当料液比为 1:15 (g/mL) 时,最高提取率达 35.13 mg/g。可能是料液比低于 1:15 (g/mL) 时,增加提取溶剂,可使提取溶剂更充分地接触雨生红球藻粉,有利于虾青素的扩散与溶出,从而提升虾青素的提取率。在达到一定的料液比时,虾青素在 DES 中的溶解度达到饱和,继续增加料液比反而会降低其浓度,导致细胞内外渗透压下降,虾青素提取率下降。故选择料液比 1:15 (g/mL) 为提取条件。

2.2.4 溶剂含水量的选择 由图 2(d)得知,当溶剂含水量从 5% 增至 10% 时,虾青素提取率大幅提高,这是因为含水量 5% 时 DES 体系仍然比较黏稠且体系不稳定;当溶剂含水量为 10% 时,虾青素提取率最大,为 32.70 mg/g;以后随着含水量的继续增加,提取率稍有下降,但下降趋势趋于平缓,所以含水量在合适的范围内对虾青素的提取

率影响并不大。DES 一般具有较大的黏度,会影响 DES 的提取效率,适当添加去离子水,可以降低 DES 的黏度,有利于虾青素的溶出,改善提取效果,但是当含水量不断增加时,DES 的极性不断变大引起分子间氢键的断裂,不利于虾青素的提取^[22]。故选择溶剂含水量 10% 为提取条件,并且不再优化。

2.3 响应面试验

2.3.1 响应面试验设计及结果 以虾青素提取率为评价指标,设计三因素三水平的分析试验,响应面试验因素水平见表 2,试验设计与结果见表 3。

表 2 中心组合因素水平

Table 2 Factors and levels of central composite design

水平	A 提取温度/°C	B 提取时间/min	C 料液比/(g/mL)
-1	40	80	1:10
0	50	100	1:15
1	60	120	1:20

2.3.2 回归模型显著性检验及方差分析 根据实际测定数值进行回归拟合,得到虾青素提取率与提取温度、提取时间、料液比三因素的多项式回归模型:

$$y = 36.79 + 7.61A - 1.25B + 2.89C + 0.93AB - 0.49AC + 1.10BC - 7.91A^2 - 6.57B^2 - 6.63C^2. \quad (4)$$

由表 4 可知,虾青素提取率受 A、C、A²、B²、C² 影响极显著 ($P < 0.01$),受 B、AB、AC、BC 影响不显著 ($P > 0.05$)。根据 F 值可知,虾青素提取率的影响因素为提取温度 > 料液比 > 提取时间。模型极显著 ($P < 0.0001$),失拟项不显

表3 响应面试验设计与响应值

Table 3 Response surface design and response values

序号	A	B	C	提取率/(mg·g ⁻¹)
1	0	1	1	27.55±0.60
2	0	1	-1	17.60±0.09
3	-1	0	-1	13.14±0.04
4	1	0	-1	27.59±0.32
5	0	0	0	37.13±1.12
6	0	0	0	37.56±0.70
7	1	0	1	30.40±0.53
8	1	-1	0	31.33±0.19
9	1	1	0	30.24±0.53
10	0	0	0	35.69±0.47
11	0	-1	1	27.39±0.80
12	0	0	0	37.84±0.17
13	-1	0	1	17.90±0.39
14	0	0	0	35.75±0.57
15	-1	1	0	11.44±0.37
16	0	-1	-1	21.83±0.25
17	-1	-1	0	16.24±0.37

著($P>0.05$),说明模型拟合较好;模型的相关系数 $R^2=0.9855$,校正决定系数 $R_{\text{Adj}}^2=0.9669$,说明模型的相关度较好。模型可以较真实地预测雨生红球藻中虾青素的提取率。

2.3.3 响应面交互作用分析

如图3所示,提取时间与料

表4 虾青素提取率回归模型方差[†]

Table 4 Regression model variance of the extraction rate of astaxanthin

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	1 254.46	9	139.38	52.98	<0.0001
A	462.69	1	462.69	175.86	<0.0001
B	12.40	1	12.40	4.71	0.0665
C	66.59	1	66.59	25.31	0.0015
AB	3.44	1	3.44	1.31	0.2904
AC	0.95	1	0.95	0.36	0.5667
BC	4.82	1	4.82	1.83	0.2181
A^2	263.33	1	263.33	100.08	<0.0001
B^2	181.93	1	181.93	69.15	<0.0001
C^2	184.98	1	184.98	70.31	<0.0001
残差	18.42	7	2.63		
失拟项	14.31	3	4.77	4.65	0.0858
净误差	4.10	4	1.03		
总和	1 272.88	16			

[†] $P<0.01$ 表示差异极显著; $P<0.05$ 表示差异显著。

液比所展现的等高线相对密集,响应曲面坡度也相对陡峭,说明虾青素提取率受提取时间与料液比之间交互作用的影响较大。根据图3中响应曲面的陡峭程度可得,虾青素提取率受各交互作用因素影响排序为 BC>AB>AC,与方差分析的结论一致,进一步验证了模型的可靠性

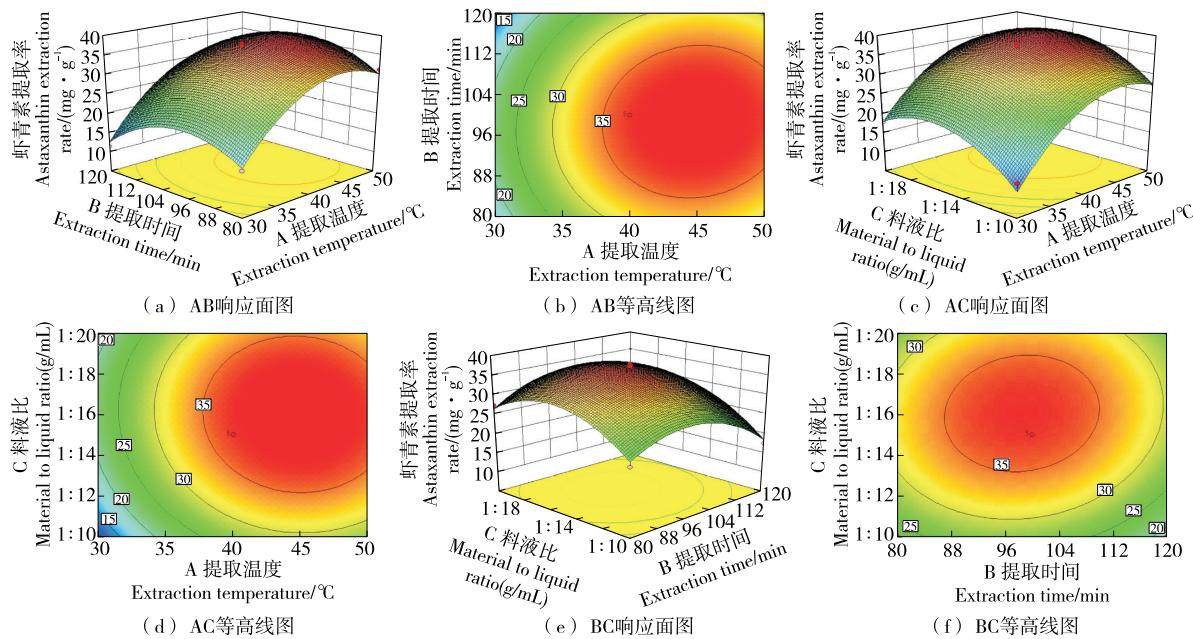
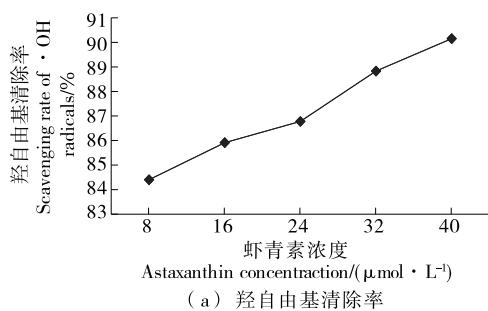


图3 各因素交互作用对虾青素提取率影响的响应面图和等高线图

Figure 3 Response surface and contour plots of the effects of interactions between factors on the extraction rate of astaxanthin

和准确性。

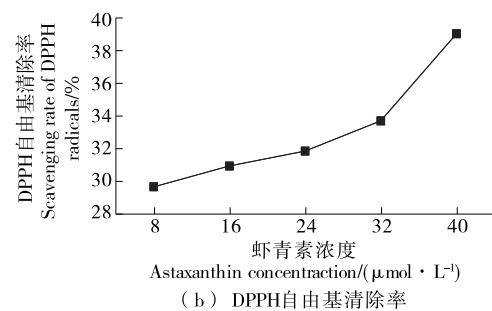
2.3.4 最佳工艺条件确定及验证实验 通过响应面软件分析得出,虾青素的最佳提取工艺为提取温度 44.72 °C, 提取时间 99.10 min, 料液比 1:15.98 (g/mL), 此条件下, 虾青素的理论提取率为 38.90 mg/g。考虑实际情况, 调整提取条件: 溶剂含水量 10%, 提取温度 45 °C, 提取时间 99 min, 料液比 1:16 (g/mL), 并进行 3 次平行验证实验, 得出虾青素提取率为 38.64 mg/g, 与模型所预测的结果相差不大, 说明该优化结果可信, 能够作为提取虾青素的工艺。



(a) ·OH radical scavenging rate

2.4 虾青素抗氧化活性

如图 4 所示, 虾青素对 DPPH 自由基和羟自由基的清除率随着虾青素浓度逐渐增大, 均呈增大趋势, 当浓度达到 40 μmol/L 时, 虾青素对 DPPH 自由基和羟自由基的清除率达到最大值 39.04% 和 90.15%。与王凯^[16-45]用酶法破壁、丙酮提取的虾青素对 DPPH 自由基和羟自由基的清除能力相比, 虾青素溶液浓度 40 μmol/L 时, 其自由基清除率分别为 30%, 80%, 试验制备的虾青素提取液自由基清除率更高, 抗氧化活性更佳。说明试验所用的虾青素提取方法更好地保护了虾青素的活性。



(b) DPPH自由基清除率

图 4 虾青素提取液的抗氧化活性

Figure 4 Antioxidant activity of astaxanthin extract

2.5 虾青素对鲜切苹果的保鲜效果

2.5.1 失重率 如图 5 所示, 经溶液浸泡处理的苹果失重率均小于空白对照, 并且上升幅度也低于空白对照; 虾青素溶液处理组在前 6 d 失重率的大小和变化与二甲基亚砜处理组无明显差异, 但第 6 天后虾青素溶液对鲜切苹果水分流失的抑制作用优于二甲基亚砜。可能是经溶液浸泡后的鲜切苹果表面不易接触空气, 有效控制水分散失导致的质量下降, 而虾青素可以加强这种保护作用, 并且 5, 15, 25 mg/mL 3 种质量浓度虾青素溶液处理组不存在显著差异, 所以浓度不会影响虾青素的保鲜作用。

2.5.2 糖度 如图 6 所示, 在贮藏过程中, 空白对照组和各处理组的糖度变化趋势无明显差异, 可溶性总糖含量几乎不变。因此, 5, 15, 25 mg/mL 3 种质量浓度的虾青素

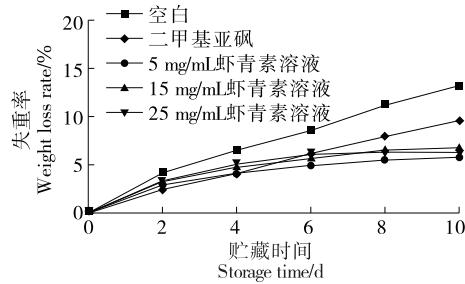


图 5 不同溶液浸泡对苹果失重率的影响

Figure 5 Effect of soaking in different solutions on the weight loss rate of apples

溶液和二甲基亚砜均不能对苹果可溶性总糖的溶出起到延缓作用。然而, 处理组的初始糖度显著高于空白对照组, 这可能与处理剂的其他作用机制有关, 例如调控苹果表皮渗透、细胞渗透压, 甚至干预呼吸作用、乙烯生成等生理过程间接影响糖度, 后续可以考虑延长贮藏时间、增加处理浓度等手段, 探究不同处理影响苹果糖度的潜在机理。

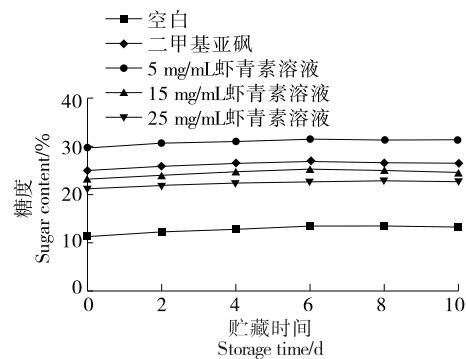


图 6 不同溶液浸泡对苹果糖度的影响

Figure 6 Effect of soaking in different solutions on the sugar content of apples

2.5.3 MDA 含量 如图 7 所示, 空白对照组 MDA 含量高达 8.73 nmol/g, 而质量浓度为 25 mg/mL 的虾青素处理组 MDA 含量最高只有 4.02 nmol/g, 该质量浓度的虾青素溶

液对MDA的抑制率高达53.88%。虾青素处理组MDA含量明显低于空白对照组,且增加幅度也明显小于空白对照组,主要是因为虾青素的抗氧化能力很强,能够对鲜切苹果的细胞膜过氧化反应起到抑制作用,且3种质量浓度的虾青素溶液处理组的MDA含量无显著差异。二甲基亚砜处理组和空白对照组的MDA含量差异很小,且呈同步变化趋势,侧面证明了虾青素具有强抗氧化能力,能够对MDA含量的增加起到抑制作用。空白对照组后期MDA含量降低,可能是因为苹果在贮藏过程中,其自身的抗氧化系统逐渐启动,通过清除自由基和修复受损的细胞膜,从而减少了MDA的生成。

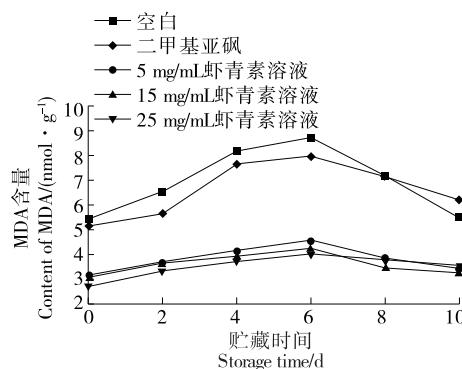


图7 不同溶液浸泡对苹果MDA含量的影响

Figure 7 Effect of soaking in different solutions on the content of malondialdehyde in apples

3 结论

该研究将破壁研磨萃取法与低共熔溶剂法结合,应用于雨生红球藻中虾青素的提取,在单因素试验考察的基础上,采用响应面分析法确定了氯化胆碱—乙二醇($n_{\text{氯化胆碱}}:n_{\text{乙二醇}}=1:1$)提取雨生红球藻虾青素的优化工艺参数:低共熔溶剂含水量10%、提取温度45℃、提取时间99 min、料液比1:16 (g/mL),在此条件下虾青素提取率为38.64 mg/g。抗氧化试验证明用此方法提取的虾青素抗氧化活性较高。虽然虾青素对鲜切苹果可溶固形物的溶出起不到延缓作用,但可以很好地控制鲜切苹果质量的下降和水分的散失,25 mg/mL的虾青素溶液对MDA的抑制率高达53.88%,所以虾青素对鲜切苹果有良好的保鲜作用。基于低共熔溶剂法从雨生红球藻中分离出虾青素是可行的,通过该方法提取的虾青素有较强的抗氧化活性,并且对鲜切苹果有一定的保鲜作用。

参考文献

- [1] 孟昂.雨生红球藻中虾青素结晶的制备、稳定性与功能性的研究[D].济南:济南大学,2020: 3-7.
MENG A. Preparation, stability and activity of astaxanthin

crystals in *Haematococcus pluvialis*[D]. Jinan: University of Jinan, 2020: 3-7.

- [2] HUANG J J, XIE Q, LIN S L, et al. Microalgae-derived astaxanthin: bioactivities, biotechnological approaches and industrial technologies for its production[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 56(4): 1-35.
- [3] 裴晖, 朱晓立. 虾青素的结构与功能[J]. 食品工程, 2007(1): 16-18.
QI H, ZHU X L. Astaxanthin structure and function[J]. Food Engineering, 2007(1): 16-18.
- [4] ZHANG J, LIU M Z, HAN T T, et al. Advance toward function, production, and delivery of natural astaxanthin: a promising candidate for food ingredients with future perspectives[J]. Food Chemistry, 2025, 463(4): 141428.
- [5] 孟春晓, 高政权, 王依涛, 等. 雨生红球藻中虾青素提取方法研究现状[J]. 水产科学, 2010, 29(12): 745-748.
MENG C X, GAO Z Q, WANG Y T, et al. A review: methods of astaxanthin extraction from alga *Haematococcus pluvialis*[J]. Aquatic Sciences, 2010, 29(12): 745-748.
- [6] 张莉莉, 高静. 新型离子液体—低共熔溶剂双水相体系提高天然虾青素提取量的研究[C]// 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集. 北京: 中国食品科学技术学会, 2020: 362-363.
ZHANG L L, GAO J. Enhanced extraction of natural astaxanthin by novel aqueous biphasic systems composed with ionic liquid and deep eutectic solvent[C]// Proceedings of the 17th Annual Conference of the Chinese Institute of Food Science and Technology. Beijing: Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 362-363.
- [7] JIANG Z, ZHENG G L, CUI Y F, et al. Natural deep eutectic solvent: a novel and green mordant for the natural dye[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148319.
- [8] 郝翠, 翟立海, 陈立宗, 等. 新型绿色溶剂在天然产物提取中的应用研究进展[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2020, 46(5): 464-470.
HAO C, ZHAI L H, CHEN L Z, et al. Application of new green solvents in extraction of natural products[J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2020, 46(5): 464-470.
- [9] 刘宇航, 相欢, 黄卉, 等. 低共熔溶剂提取虾壳中虾青素工艺优化及机理初探[J]. 南方水产科学, 2024, 20(3): 164-172.
LIU Y H, XIANG H, HUANG H, et al. Optimization of process and mechanism of extracting astaxanthin from shrimp shells with deep eutectic solvent[J]. South China Fisheries Science, 2024, 20(3): 164-172.
- [10] 邹雯, 周磊. 雨生红球藻中虾青素成分的提取的专利研究进展[J]. 化工管理, 2022(22): 96-98.
ZOU W, ZHOU L. Patent research progress on the extraction of astaxanthin components from *Haematococcus pluvialis*[J].

- Chemical Management, 2022(22): 96-98.
- [11] 符力丹. 降雨红球藻中虾青素的微胶囊化及其稳定性研究[D]. 济南: 济南大学, 2016: 6.
- FU L D. Research on microencapsulation of astaxanthin in *Haematococcus pluvialis* and its stability[D]. Jinan: University of Jinan, 2016: 6.
- [12] 毛立忠, 倪勤学, 高前欣, 等. 菜籽油低共熔溶剂萃取物 DPPH 自由基清除能力研究[J]. 中国粮油学报, 2018(2): 50-55.
- MAO L Z, NI Q X, GAO Q X, et al. Scavenging activity of DPPH in deep eutectic solvents extract of rapeseed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018(2): 50-55.
- [13] DAI Y I, VAN SPRONSEN J, WITKAMP G J, et al. Natural deep eutectic solvents as new potential media for green technology[J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 766: 61-68.
- [14] 冯芳. 姜黄素的绿色高效提取及其与大豆蛋白的结合研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019: 24.
- FENG F. Green and efficient extraction of curcumin and complexation with soybean protein[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 24.
- [15] 刘政均. 低共熔溶剂提取茶皂素的工艺优化及茶皂素在药物载体中的应用[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021: 16.
- LIU Z J. Optimization of extraction process of tea saponin with deep eutectic solvent and application of tea saponin in drug carrier[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2021: 16.
- [16] 王凯. 降雨红球藻虾青素酯的纯化、活性研究及不同虾青素的鉴定[D]. 厦门: 集美大学, 2016.
- WANG K. Purification and activities of astaxanthin esters from *Haematococcus pluvialis* and identification of different astaxanthins[D]. Xiamen: Jimei University, 2016.
- [17] 张欣. 黑果腺肋花楸原花青素的提取, 抗氧化及其抑菌活性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- ZHANG X. Study on extraction, antioxidant and antibacterial activity of proanthocyanidins from *sorbus melanocarpa*[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [18] 刘荣. 多功能生物蛋白涂层的制备及其在鲜切水果上的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2020: 19-20.
- LIU R. Synthesis of multifunctional bio-protein coating and its application in fresh-cut fruits[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020: 19-20.
- [19] 李长江, 朱珊珊, 王娜, 等. $Vc@SeNPs$ 抗氧化活性评价及其对鲜切苹果品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(13): 174-181.
- LI C J, ZHU S S, WANG N, et al. Evaluation of antioxidant activity of $Vc@SeNPs$ and its effect on the quality of fresh-cut apples[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(13): 174-181.
- [20] 倪雪华, 王恒鹏. 低共熔溶剂提取绿茶总黄酮及其抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 159-163.
- NI X H, WANG H P. Research on extraction of total flavonoids from green tea with deep eutectic[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 159-163.
- [21] 任薇, 李少华, 陈雪娇. 低共熔溶剂对虎杖中虎杖苷的高效绿色提取工艺优化研究[J]. 辽宁中医药大学学报, 2023, 25(5): 52-57.
- REN W, LI S H, CHEN X J. Optimization of green extraction process of polydatin from Huzhang (*Polygoni cuspidati rhizoma et radix*) by deep eutectic solvent[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2023, 25(5): 52-57.
- [22] 李凌娜, 杨继威, 张丽芬, 等. 响应面法优化低共熔溶剂提取迷迭香中迷迭香酸和鼠尾草酸的工艺[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 218-227.
- LI L N, YANG J W, ZHANG L F, et al. Optimization of the extraction of rosmarinic acid and carnosic acid from *Rosmarinus officinalis* L. with deep eutectic solvents by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 218-227.