

超细粉碎联合超高压均质预处理对黄桃中类胡萝卜素提取量及抗氧化活性的影响

雒艳颢¹, 毕金峰², 陈芹芹², 邵健标², 鲍玺², 庞杰¹, 宁芊^{3*}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002) (2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193)

(3. 福建农林大学金山学院, 福建福州 350002)

摘要: 类胡萝卜素是黄桃中重要的脂溶性活性成分, 具有显著的抗氧化功能, 为解决黄桃中类胡萝卜素提取效率低下的问题, 本研究探究了超细粉碎 (UG) 与超高压均质 (UHPH) 联合预处理对类胡萝卜素提取量及抗氧化活性的提升效果。通过系统优化料液比、UG 转速、UHPH 压力与次数等关键参数, 确定了最佳提取条件为料液比 1:1 (*m/m*)、UG 转速 3 000 r min⁻¹、UHPH 压力 100 MPa 均质 2 次。在此条件下, 总类胡萝卜素提取量达到 147.23 μg·g⁻¹, 比常规处理组提高 41.54%, 主要类胡萝卜素单体为八氢番茄红素、番茄红素和 β-胡萝卜素; UG-UHPH 联用组提取物对 ABTS 和 DPPH 自由基的清除率分别为 86.23% 和 87.71%, 较常规处理组分别提高 18.16 和 19.26 个百分点; 在 HepG2 细胞氧化应激模型中, 该提取物可显著减轻细胞氧化损伤, 丙二醛含量降至模型组的 52.16%, 过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性分别升至模型组的 1.28 倍和 1.32 倍。综上, UG-UHPH 联用技术能显著提升黄桃中类胡萝卜素的提取效率及体外抗氧化活性, 并可有效减轻细胞氧化损伤, 为该技术在果蔬活性成分高效提取领域的应用提供了理论依据。

关键词: 黄桃; 类胡萝卜素; 超细粉碎; 超高压均质; 抗氧化活性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0633

Effect of Ultrafine Grinding Combined with Ultra-High Pressure Homogenization Pretreatment on the Extraction Yield and Antioxidant Activity of Carotenoids from Yellow Peach

LUO Yanhao¹, BI Jinfeng², CHEN Qinqin², GAO Jianbiao², BAO Xi², PANG Jie¹, NING Qian^{3*}

(1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2.Institute of Agricultural Product Processing, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

(3.Jinshan College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Carotenoids are important lipid-soluble bioactive compounds in yellow peaches with remarkable antioxidant activities. To address this issue, the effects of combined ultrafine grinding (UG) and ultra-high pressure homogenization (UHPH) pretreatment on the extraction amount and antioxidant activity of carotenoids from yellow peaches were investigated. Key parameters including the solid-to-liquid ratio, UG rotation speed, and UHPH pressure and pass number were systematically optimized. The optimal extraction conditions were determined as a solid-to-liquid ratio of 1:1 (*m/m*), a UG rotation speed of 3 000 r min⁻¹, and two passes of UHPH at 100 MPa. Under these conditions, the total carotenoid extraction amount reached 147.23 μg·g⁻¹, representing a 41.54% increase compared with the conventional treatment group. The predominant carotenoid monomers were identified as phytofluene, lycopene and β-carotene. The ABTS and DPPH radical scavenging rates of the carotenoid extract obtained by the combined UG-UHPH treatment were 86.23% and 87.71%, which were 18.16 and 19.26 percentage points higher than those of the conventional treatment group, respectively. In a HepG2 cell oxidative stress model, the extract significantly alleviated cellular oxidative damage. The malondialdehyde content was reduced to 52.16% of that in the model group, while the activities of catalase and superoxide dismutase were elevated to 1.28 and 1.32 times those of the model group, respectively. In conclusion, the combined UG-UHPH technology can substantially enhance the extraction efficiency and in vitro antioxidant activity of carotenoids from yellow

收稿日期: 2026-04-22; 修回日期: 2026-07-27; 接受日期: 2026-07-28

基金项目: 国家十四五果品项目 (2024YFD2100605)

作者简介: 雒艳颢 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 类胡萝卜素提取, E-mail: 3165663313@qq.com

通讯作者: 宁芊 (1983-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品质量管理, E-mail: qianqian1000@163.com

peaches, and effectively attenuate cellular oxidative damage, thereby providing a theoretical basis for the application of this technique in the efficient extraction of bioactive components from fruits and vegetables.

Key words: yellow peach; carotenoids; ultrafine grinding; high-pressure homogenization; antioxidant activity

类胡萝卜素大多为脂溶性物质,属于类异戊二烯的一个子类,具有抗氧化,抗炎等生物活性^[1-4],是机体不可或缺的营养素之一,但人体无法自主合成,需从外界获取。目前,类胡萝卜素的获取方式多为化学合成,这种方法往往伴随着有害物质的产生,不仅对人体健康有着潜在损害,而且对环境也有着不利影响,合成类胡萝卜素的市場在全球范围内呈缩减态势^[5]。因此,从胡萝卜、番茄、红椒、黄桃等植物组织或微生物中提取的天然类胡萝卜素日益受到关注。天然类胡萝卜素不仅生物可利用性良好,与合成类胡萝卜素相比对人体健康和环境的负面影响显著降低。目前针对天然类胡萝卜素提取方法的研究,主要集中在提高提取效率和保持类胡萝卜素的生物活性,以满足日益增长的市场需求^[6,7]。然而,植物细胞壁会对溶剂的进入形成阻碍,并且类胡萝卜素与蛋白质等其他大分子物质的紧密结合,也致使类胡萝卜素的提取面临困难。因此,研究学者采用物理、化学、酶手段等进一步提升类胡萝卜素的提取效率^[8]。其中,物理处理方法由于操作简便,无毒害、无污染的优势特点受到广泛关注,超细粉碎、超高压均质等技术也逐步应用在类胡萝卜素提取及活性保持。

超细粉碎技术在生产营养保健品和功能性食品方面具有巨大潜力^[9]。超细粉指的是尺寸从 1 纳米到 100 微米不等的小固体颗粒^[10]。有研究表明,颗粒大小与生物活性成分的生物活性存在一定关联。Li 等^[11]对球杆菌中类胡萝卜素的抗氧化活性进行测定,结果表明超细粉碎后提取的类胡萝卜素 DPPH 自由基清除率与超声处理组相比高出 13%。超高压均质能有效破坏细胞,使细胞内生物产物得以更好回收^[12]。Morata^[13]等在 300 Mpa 进行葡萄汁超高压均质,发现多酚氧化酶失活 90%,且由于胶体破碎效应,酰化花青素含量增加 8.3%。Xie 等^[14]采用微波、超声、超高压均质等不同方式处理微藻并提取类胡萝卜素,结果表明超高压均质后类胡萝卜素提取量为 7.9 mg g⁻¹,分别是微波和超声处理的 2.3 与 13.16 倍。但是,超细粉碎、超高压均质单一或者联合使用对黄桃中类胡萝卜素提取的增强效果还未见相关报道。

本研究以黄桃为原料,采用超细粉碎、超高压均质预处理技术,探究料液比,超细粉碎转速,超高压均质压力及次数对类胡萝卜素提取量的影响,并进行类胡萝卜素单体解析及体外抗氧化活性评价研究,为超细粉碎-超高压均质联用技术在果品预处理领域的应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 原料

黄桃(瑞蟠 101),由中国农业科学院郑州果树研究所提供;丙酮、正己烷、无水乙醇均为分析纯,乙腈、甲醇、甲酸(0.1%)、醋酸铵(5 mmol·L⁻¹)均为色谱纯,BHT(2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚)为分析纯,DPPH(1,1-二苯基-2-苦基腈)、维生素 C、过硫酸钾(分析纯),均购自国药集团化学试剂有限公司;10 种类胡萝卜素标品,购自天津阿尔塔科技有限公司;HepG2 细胞株、DMEM 高糖培养基、胎牛血清、青霉素-链霉素双抗(100×)、胰酶(0.25% Trypsin-EDTA)、二甲基亚砜(分析纯)、磷酸盐缓冲液(无菌/非无菌)及 ABTS 自由基清除能力、SOD 活性、CAT 活性、MDA 检测试剂盒,均购自北京索莱宝科技有限公司;CCK-8 试剂盒,购自上海碧云天生物技术有限公司;3% H₂O₂(wt.%)为医用级,购自当地百康大药房。

1.2 主要仪器设备

M-150 湿法超细粉碎仪,杭州江大张机械设备有限公司;JN-02C 低温超高压均质仪,广州聚能生物科技股份有限公司;M100 酶标仪,帝肯(上海)贸易有限公司;Agilent 6495 液相色谱-质谱联用仪,安捷伦科技有限公司;JYL-C91T 打浆机,九阳股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 类胡萝卜素提取工艺流程

参考 Bina 等^[15]的方法并进行修改,将正己烷、丙酮、无水乙醇(体积比=2:1:1)混合,加入 0.01%(wt.%)

的 2,6-二叔丁基对甲酚 (BHT) 搅拌至完全溶解获得提取液。准确称取 1.0 g 桃浆 (湿基) 与 25.0 mL 提取液, 室温下 300 r min^{-1} 磁力搅拌 25 min 后加入 10.0 mL 超纯水继续搅拌 10 min, 之后 5 000 rpm 离心 3 min, 取上清液, 氮吹, 使用乙腈 (20.0 mL) 复溶, 450 nm 下测定吸光度。根据公式 (1) 计算类胡萝卜素含量。

$$Y = \frac{A \times V \times 10^4}{2500 \times M} \quad (1)$$

式中:

Y ——为类胡萝卜素总量;

A ——为 450 nm 下的吸光值;

V ——为乙腈复溶后体积, mL;

M ——为黄桃原料质量, g;

2 500——为 β -胡萝卜素常规吸光系数。

1.3.2 不同预处理方式对类胡萝卜素提取效率及成分影响研究

1.3.2.1 料液比对类胡萝卜素提取效率及成分影响研究

将新鲜黄桃去皮切块, 黄桃与水分别按照 1:0、1:0.5、1:1、1:1.5、1:2 的比例混合, 打浆机选取果汁模式粉碎 3 min。按照 1.3.1 的方法提取并计算原料类胡萝卜素含量。

1.3.2.2 超细粉碎处理对类胡萝卜素提取效率及成分影响研究

黄桃按料液比 1:1 加水, 打浆 3 min 后, 分别在 $1\ 800$ 、 $2\ 400$ 、 $3\ 000 \text{ r min}^{-1}$ 下粉碎 1 min, 按 1.3.1 的方法提取黄桃中类胡萝卜素, 明确超细粉碎转速对黄桃中类胡萝卜素提取效率的影响。

1.3.2.3 超高压均质处理对类胡萝卜素提取效率及成分影响研究

黄桃按料液比 1:1 加水, 打浆 3 min 后, 先经 UG ($3\ 000 \text{ r min}^{-1}$, 1 min), 分别在 100、150、200 MPa 下均质, 次数为 1、2 次, 按 1.3.1 的方法提取黄桃中类胡萝卜素, 明确超高压均质压力与次数对黄桃中类胡萝卜素提取效率的影响。

1.3.3 黄桃类胡萝卜素提取物的组分鉴定

类胡萝卜素提取物使用 HPLC-ESI-MS 系统进行分析, 参考 Matsumoto 等^[16]的方法并进行修改。分离过程采用 ACQUITY UPLC BEH C18 色谱柱在 $40\ ^\circ\text{C}$ 下进行。分析条件如下: 溶剂系统 A 为含有 0.1% (wt.%) 甲酸和 5 mmol L^{-1} 醋酸铵的超纯水; 溶剂系统 B 为 40% 甲醇和 60% 乙腈。流速为 0.3 mL min^{-1} , 梯度程序为: 0~1 min, 15% A, 85% B; 1~8 min, 15%~0% A, 85%~100% B, 8~22 min, 100% B。注入量为 $2 \mu\text{L}$ 。

样品中类胡萝卜素单体的浓度均通过各自的标准曲线计算得出。

1.3.4 提取动力学

在最佳预处理工艺条件下, 准确称取 1.0 g 黄桃原料, 按 1.3.1 方法加入提取液, 分别磁力搅拌提取 2、5、10、15、20、25、30、40、50、60 min (其他步骤不变), 测定各时间点类胡萝卜素含量。采用准一级动力学模型 (式 2) 和准二级动力学模型 (式 3) 对提取过程进行拟合:

$$C_t = C_e (1 - e^{-K_1 t}) \quad (2)$$

$$C_t = (C_e K_2 t) / (1 + C_e K_2) \quad (3)$$

式中:

C_t ——为时间 t 时的提取量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

C_e ——为平衡提取量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

K_1 ——为准一级速率常数, min^{-1} ;

K_2 ——为准二级速率常数, $\text{g} \cdot (\mu\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 。

1.3.5 类胡萝卜素抗氧化活性

类胡萝卜素提取前, 对原料分别采用以下三种预处理工艺 (料液比均为 1:1): 常规处理组: 无特殊处理; 超细粉碎组: 超细粉碎 ($3\ 000 \text{ r min}^{-1}$, 1 min); 超细粉碎-超高压均质组: 超细粉碎 ($3\ 000 \text{ r min}^{-1}$, 1 min) 后, 再经超高压均质 (100 MPa, 两次)。

不同预处理后提取所得类胡萝卜素, 氮吹后使用 2 mL 无水乙醇复溶, 得到样品液备用。

1.3.5.1 基于自由基模型的类胡萝卜素抗氧化活性分析

ABTS 自由基清除能力测定: ABTS 自由基清除能力参考李慧琴^[17]的方法进行。7 mmol L⁻¹ ABTS 溶液和 2.4 mmol L⁻¹ 的过硫酸钾溶液等比例混匀, 室温避光 12~16 h, 制成 ABTS⁺工作液。在反应体系中依次加入 0.1 mL 的样品液, 将样品液和 1.0 mL ABTS⁺工作液摇晃混匀后在 37 °C 避光水浴 30 min, 734 nm 处检测吸光值。其清除率计算见公式 (4)。

$$Y = 1 - \frac{A_2 - A_0}{A_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

Y——为 ABTS 自由基清除率;

A₂——为实验组吸光度;

A₁——为对照组吸光度;

A₀——为空白组吸光度。

DPPH 自由基清除能力测定: DPPH 自由基清除能力参考李慧琴^[17]的实验方法并进行略微修改。称取 4 mg DPPH 粉末, 加入少量无水乙醇溶解后定容至 100 mL, 配制成 0.1 mmol L⁻¹ 的 DPPH 自由基溶液, 将 2 mL 样品溶液与 2 mL DPPH 溶液混合, 在室温下混合均匀, 避光反应 30 min, 随后使用酶标仪, 测定 517 nm 处溶液的吸光值, 根据公式 (5) 计算 DPPH 自由基清除率。

$$Y = 1 - \frac{A_2 - A_0}{A_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

Y——为 DPPH 自由基清除率;

A₂——为实验组吸光度;

A₁——为对照组吸光度;

A₀——为空白组吸光度。

1.3.5.2 基于细胞模型的类胡萝卜素抗氧化活性分析

细胞毒性验证: 参考 Hormoz 等^[18]的验方法并进行修改, 将氮吹后的类胡萝卜素粉末使用 0.1% (wt.%) 的二甲基亚砷溶解保存在 4 °C 冰箱备用。将不同预处理所得类胡萝卜素提取液氮吹后, 用含 0.1% DMSO 的无水乙醇进行复溶, 并配制成 1%类胡萝卜素提取液+99%的 0.1% DMSO 溶液的工作液, 用于后续细胞实验。向 96 孔板中加入每孔 5×10³ 的 HepG2 细胞悬液, 同时在 96 孔板外围环绕磷酸盐缓冲液 (PBS) 防止细胞悬液挥发, 在 37 °C 5% CO₂ 恒温培养箱中孵育 24 h, 实验组加入 100 μL 不同处理方式类胡萝卜素的培养基, 空白组加入不含药培养基, 孵育 24 h, 每孔加入 100 μL CCK-8 培养基混合液 (CCK-8: 培养基=1:9) 孵育 2 h, 用酶标仪测量 450 nm 下的吸光度, 根据公式 (6) 计算细胞存活率。

$$Y = \frac{A_1 - A_2}{A_3 - A_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

Y——为细胞存活率;

A₁——为实验孔吸光度;

A₂——为空白孔吸光度;

A₃——为对照孔吸光度。

氧化应激模型建立: 参考张业尼等^[19]的方法并进行修改, 取对数生长期细胞, 按 1×10³ 个/孔接种于 96 孔板, 于 37 °C、5% CO₂ 的培养箱中培养 24 h, 去除培养液, 分别加入 200 μL 含不同浓度的 H₂O₂ 的培养液, 使 H₂O₂ 终浓度分别为 200、400、600、800、1 000 μmol·L⁻¹, 继续培养 4、8、12、16、20 h, 去除培养液, PBS 洗涤 2 次, 每孔加入 100 μL CCK-8 培养基混合液 (CCK-8: 培养基=1:9) 孵育 2 h, 用酶标仪测量 450 nm 下的吸光度, 根据公式 (6) 计算细胞存活率。

将对数期细胞接种到 6 孔板中, 培养 24 h 至细胞贴壁分为四组: 空白对照组: 不进行任何处理; 模型组: 只加入 H₂O₂; 类胡萝卜素处理组 (常规处理组, 超细粉碎组, 超细粉碎-超高压均质组处理组): 加入 0.1% (℃二

甲基亚砷溶解的不同预处理方法得到的类胡萝卜素(V/V)预处理 2 h, 再加入 H₂O₂; 阳性对照组: 加入 200 μmol·L⁻¹ 的维生素 C 预处理 2 h, 再加入 H₂O₂, 每组的 H₂O₂ 的浓度均为 200 μmol·L⁻¹, 加入 H₂O₂ 按照氧化应激模型得出的最佳培养时间培养 12 h。

不同预处理情况下氧化损伤模型 HepG2 细胞产物与酶活指标测定: 将 H₂O₂ 处理后的细胞使用胰酶消化, 10 000 r min⁻¹ 离心 10 min, 弃去上清液加入 1 mL PBS, 30 ℃ 超声粉碎 10 s, 间隔 10 s 重复 10 次, 9 000 r min⁻¹ 4 ℃ 离心取上清液, 参照试剂盒方法分别测定丙二醛(MDA)含量, 过氧化氢酶(CAT)和超氧化物歧化酶(SOD)的活性。

1.4 数据处理与分析

每组试验至少平行 3 次, 结果采用平均值±标准偏差的形式表示。采用 Origin 2021 软件作图, SPSS 对各项试验数据统计, Tukey 多重检验对试验数据显著分析(P<0.05)。

2 结果与讨论

2.1 料液比对类胡萝卜素提取量及单体含量的影响

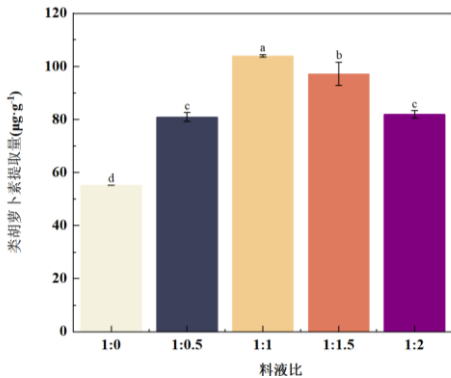


图 1 不同料液比对类胡萝卜素提取量的影响

Fig.1 Effect of Different Liquid-to-Solid Ratios on Carotenoid Extraction amount

注: 图中不同字母表示差异显著(P<0.05), 下同。

表 1 不同料液比比例下黄桃类胡萝卜素单体成分表(μg·g⁻¹)

Table 1 Carotenoid Monomer Components in Yellow Peach under Different Liquid-to-Material Ratios (μg·g⁻¹)

料液比	新黄质/	花药黄质	叶黄素	玉米黄质	胡萝卜素醛	β-隐黄质	β-胡萝卜素	γ-胡萝卜素	番茄红素	八氢番茄红素
1:0	0.35±0.15 ^a	0.05±0.00 ^c	1.34±0.40 ^a	0.34±0.14 ^b	0.03±0.01 ^a	0.23±0.14 ^b	2.14±0.05 ^c	0.27±0.07 ^b	6.34±0.96 ^c	44.20±11.57 ^a
1:0.5	0.44±0.19 ^a	0.13±0.02 ^{ab}	0.83±0.22 ^b	0.66±0.38 ^{ab}	0.03±0.01 ^a	0.44±0.26 ^b	2.50±0.49 ^{bc}	0.49±0.04 ^{ab}	17.68±0.96 ^a	45.55±4.49 ^a
1:1	0.27±0.05 ^{ab}	0.17±0.05 ^a	0.84±0.03 ^b	0.93±0.13 ^a	0.03±0.00 ^a	1.07±0.43 ^a	3.79±1.06 ^a	0.72±0.21 ^a	15.63±5.40 ^{ab}	50.43±4.34 ^a
1:1.5	0.16±0.08 ^b	0.07±0.01 ^{bc}	1.35±0.11 ^a	0.45±0.05 ^b	0.03±0.01 ^a	0.49±0.09 ^b	3.26±0.15 ^{ab}	0.30±0.06 ^b	14.95±1.09 ^{ab}	58.81±18.14 ^a
1:2	0.16±0.04 ^b	0.03±0.00 ^c	0.61±0.24 ^b	0.34±0.10 ^b	0.03±0.00 ^a	0.45±0.11 ^b	2.72±0.49 ^{abc}	0.25±0.05 ^b	13.45±3.82 ^b	50.70±4.91 ^a

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05), 下同。

不同料液比对黄桃中类胡萝卜素提取量的影响如图 1 所示。当黄桃与水的比例为 1:1 时, 类胡萝卜素的提取量达到峰值, 为 103.98±0.41 μg·g⁻¹。相较于不添加水的提取比例(料液比=1:0), 类胡萝卜素提取量提升 88.4%。进一步提高水的添加比例(比例为 1:1.5 和 1:2), 提取量出现下降趋势(从 103.98 μg·g⁻¹降低至 81.86 μg·g⁻¹)。造成这一现象的原因可能是适量水的加入使得黄桃细胞吸水溶胀, 打浆过程中易破坏细胞壁结构, 有助于类胡萝卜素的释放^[20], Mouahid 等^[21]、刘璇等^[22]通过超临界 CO₂ 从杜氏盐藻提取类胡萝卜素时发现, 23%水分含量提高了类胡萝卜素提取效率。但随着水的进一步增加, 黄桃过度溶胀, 使得果胶渗出, 增大了体系黏度, 降低了类胡萝卜素提取量。不同料液比下黄桃类胡萝卜素单体成分如表 1 所示。共鉴别出 10 种类胡萝卜素单体, 其中八氢番茄红素含量最高, 其由两个香叶基二磷酸单元在类胡萝卜素合成酶催化下直接缩合产生的第一个类胡萝卜素化合物,

而后经过一系列反应合成其他类胡萝卜素。 β -胡萝卜素是维生素 A 的前体,番茄红素是自然界中较强的抗氧化剂^[23,24],二者含量在黄桃中含量也相对比较丰富。在不同料液比下,除胡萝卜素醛含量无显著性差异外,其余类胡萝卜素单体的变化趋势与总类胡萝卜素含量相似,随着料液比的比例呈现先上升后下降的趋势,料液比为 1:1 时,玉米黄质 ($0.92\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、 β -隐黄质 ($1.07\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、 β -胡萝卜素 ($3.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 γ -胡萝卜素 ($0.72\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 的含量均达到最高;而番茄红素在料液比为 1:0.5 时含量最高 ($17.68\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),八氢番茄红素则在 1:1.5 时含量最高 ($58.81\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),但 1:1 条件下的八氢番茄红素含量 ($50.42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 仍处于较高水平。

2.2 超细粉碎对类胡萝卜素提取量及单体含量的影响

不同超细粉碎转速对黄桃中类胡萝卜素提取量的影响如图 2 所示。类胡萝卜素提取量随超细粉碎处理转速的升高呈逐渐上升态势。超细粉碎转速从 $1\text{ }800\text{ r min}^{-1}$ 升高至 $2\text{ }400\text{ r min}^{-1}$,类胡萝卜素提取量从 $114.43\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 提升到 $126.15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,提高了 10%,这可能与超细粉碎加剧了黄桃细胞破碎程度,导致类胡萝卜素等胞内物质流出,使类胡萝卜素与提取液可以更好地接触,转速提升至 $3\text{ }000\text{ r min}^{-1}$ 时,类胡萝卜素提取量并未得到显著提升,为 $129.13\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,这可能是因为 $2\text{ }400\text{ r min}^{-1}$ 时黄桃细胞已经得到充分破碎,因此超细粉碎转速的进一步增加未显著提高类胡萝卜素提取量。不同超细粉碎转速下黄桃类胡萝卜素单体成分如表 2 所示。新黄质的含量随着转速升高先显著下降后回升,从 $1\text{ }800\text{ r min}^{-1}$ 的 $0.34\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 降至 $2\text{ }400\text{ r min}^{-1}$ 的 $0.08\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, $3\text{ }000\text{ r min}^{-1}$ 时回升至 $0.27\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。八氢番茄红素在 $1\text{ }800\text{ r min}^{-1}$ 时达到最高值 $72.91\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,显著高于 $1\text{ }800\text{ r min}^{-1}$ ($72.91\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 $2\text{ }400\text{ r min}^{-1}$ ($44.09\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。超细粉碎转速对 β -胡萝卜素、叶黄素、玉米黄质、胡萝卜素醛、 β -隐黄质等其他类胡萝卜素含量影响不显著,但对 γ -胡萝卜素和番茄红素有一定影响: γ -胡萝卜素随转速升高先下降后回升,番茄红素在 $3\text{ }000\text{ r min}^{-1}$ 时达到最高值 $29.38\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

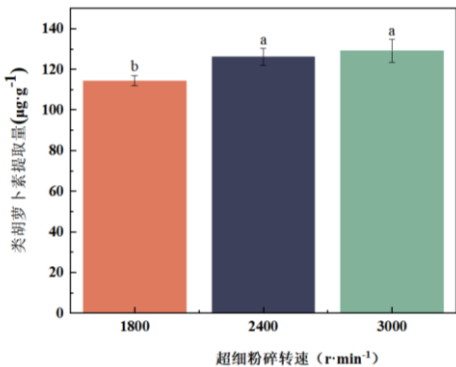


图 2 不同超细粉碎转速对类胡萝卜素提取量的影响

Fig.2 Effect of different ultrafine grinding speeds on carotenoid extraction amount

表 2 不同超细粉碎转速下黄桃类胡萝卜素单体成分表

Table 2 Monomer Composition of Carotenoids in Peach at Different Ultrafine Grinding Speeds										
超细粉碎转 速/(r min ⁻¹)	新黄质 /(μg·g ⁻¹)	花药黄质 /(μg·g ⁻¹)	叶黄素 /(μg·g ⁻¹)	玉米黄质 /(μg·g ⁻¹)	胡萝卜素醛 /(μg·g ⁻¹)	β-隐黄质 /(μg·g ⁻¹)	β-胡萝卜素 /(μg·g ⁻¹)	γ-胡萝卜素 /(μg·g ⁻¹)	番茄红素 /(μg·g ⁻¹)	八氢番茄红 素/(μg·g ⁻¹)
1 800	0.34±0.04 ^a	0.03±0.01 ^b	1.05±0.49 ^a	0.22±0.09 ^a	0.02±0.00 ^a	0.25±0.10 ^a	3.92±0.56 ^a	0.77±0.05 ^a	24.22±1.83 ^b	72.91±0.94 ^a
2 400	0.08±0.01 ^c	0.03±0.01 ^b	1.54±0.54 ^a	0.35±0.10 ^a	0.02±0.00 ^a	0.36±0.13 ^a	4.13±0.09 ^a	0.21±0.05 ^c	27.96±2.29 ^{ab}	44.09±0.12 ^b
3 000	0.27±0.03 ^b	0.06±0.01 ^a	0.71±0.37 ^a	0.33±0.04 ^a	0.02±0.00 ^a	0.38±0.06 ^a	4.26±0.49 ^a	0.41±0.09 ^b	29.38±1.95 ^a	71.79±0.51 ^a

2.3 超高压均质处理对类胡萝卜素提取量及单体含量的影响

不同超高压均质次数与压力对黄桃中类胡萝卜素提取量如图 3 所示。在 100 MPa 压力条件下,随着均质次数的增加,类胡萝卜素提取量从 $121.17\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 提高到 $147.23\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,在超高压均质状态下,黄桃与提取液的接触面积增大,使得黄桃细胞中的类胡萝卜素更好与提取液接触。鉴于类胡萝卜素具有热不稳定性,随着均质压力和次数的增加,均质过程产生的热量会导致类胡萝卜素发生降解与氧化,造成类胡萝卜素含量降低^[25]。不同超高压均质压力及次数下黄桃类胡萝卜素单体成分如表 3 所示。超高压均质压力和次数显著影响黄桃中类胡萝卜素单体成分

的提取效果。不同种类类胡萝卜素对均质压力与次数的响应呈现出显著的选择性与差异化特征。含氧类胡萝卜素（例如叶黄素、玉米黄质、 β -隐黄质）以及部分胡萝卜素（例如 β -胡萝卜素、花药黄质）通常在 100 MPa 均质 2 次时达到含量峰值，表现出随均质强度增加先上升后下降的趋势，这表明适度均质有助于此类结合态组分的释放，而过高压力（200 MPa）可能导致其降解；与之不同，番茄红素与八氢番茄红素作为黄桃中含量最高的组分，在 100 MPa（2 次）至 150 MPa（1 次）阶段保持极高的溶出水平（分别为 $24.80\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $90.15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ），成为总含量提升的核心贡献因素。综合而言，100 MPa 均质 2 次是平衡各项组分释放与稳定性的最优节点，在此条件下，通过物理结构的彻底破碎与基质释放效应的协同作用，类胡萝卜素总含量达到最大值 $147.23\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，实现了提取效率的显著提升。综上所述，黄桃中类胡萝卜素提取的最佳预处理工艺为料液比=1:1，采用 $3\text{ }000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速进行超细粉碎 1 min，并在 100 MPa 压力下进行 2 次超高压均质。在此条件下，类胡萝卜素含量可达 $147.23\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，相较于较常规处理组（ $103.98\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ），提升了 41%。值得说明的是，虽然本研究未设置单独 UHPH 处理组而无法严格论证数学意义上的协同效应（ $1+1>2$ ），但梯度对比结果明确显示，从常规打浆（ $103.98\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ）→单独 UG（ $126.15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ）→UG+UHPH 联用（ $147.23\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ），类胡萝卜素提取量呈逐级显著上升趋势（ $P<0.05$ ）。这表明 UHPH 作为 UG 的后继强化手段，能够进一步破坏残余细胞结构，显著提升类胡萝卜素的溶出水平。

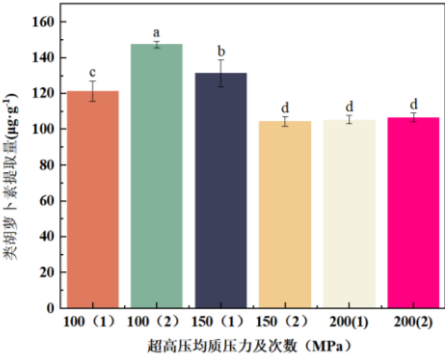


图 3 不同超高压均质压力及次数对类胡萝卜素提取量的影响

Fig.3 Effects of different high-pressure homogenization pressures and cycles on carotenoid extraction amount

表 3 不同超高压均质压力及次数下黄桃类胡萝卜素单体成分表

Table 3 Carotenoid Monomer Components in Yellow Peach under Different Ultra-High Pressure Homogenization Pressures and Times

超高压均质 压力与次数 /(MPa)	新黄质 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	花药黄质 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	叶黄素/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	玉米黄质 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	胡萝卜素醛 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	β -隐黄质 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	β -胡萝卜素 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	γ -胡萝卜素 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	番茄红素 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	八氢番茄红素 /($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)
100(1)	0.27 ± 0.03^a	0.07 ± 0.01^{bc}	0.71 ± 0.38^{bc}	0.33 ± 0.04^b	0.03 ± 0.00^a	0.39 ± 0.07^{ab}	4.27 ± 0.50^{ab}	0.42 ± 0.10^{bc}	15.30 ± 1.25^a	75.45 ± 5.12^b
100(2)	0.27 ± 0.01^a	0.09 ± 0.01^a	0.74 ± 0.32^{bc}	0.49 ± 0.04^a	0.02 ± 0.01^{ab}	0.52 ± 0.07^a	5.00 ± 0.74^a	0.38 ± 0.10^c	24.80 ± 2.19^a	88.24 ± 4.05^a
150(1)	0.21 ± 0.06^{ab}	0.06 ± 0.01^c	0.24 ± 0.07^c	0.29 ± 0.12^b	0.02 ± 0.01^{ab}	0.27 ± 0.12^b	3.85 ± 0.44^{bc}	0.38 ± 0.12^c	16.50 ± 1.21^a	90.15 ± 6.10^a
150(2)	0.14 ± 0.04^b	0.05 ± 0.01^c	0.36 ± 0.10^c	0.39 ± 0.15^{ab}	0.01 ± 0.00^b	0.44 ± 0.18^{ab}	3.66 ± 0.47^{bc}	0.71 ± 0.07^a	13.55 ± 2.30^a	65.30 ± 4.45^c
200(1)	0.17 ± 0.04^{ab}	0.09 ± 0.01^{ab}	1.28 ± 0.22^a	0.46 ± 0.05^a	0.02 ± 0.00^{ab}	0.45 ± 0.06^{ab}	2.76 ± 0.55^d	0.62 ± 0.28^{ab}	22.60 ± 2.22^a	60.22 ± 3.18^c
200(2)	0.22 ± 0.10^{ab}	0.04 ± 0.01^d	1.21 ± 0.06^{ab}	0.38 ± 0.05^{ab}	0.03 ± 0.01^a	0.35 ± 0.05^{ab}	3.33 ± 0.20^{cd}	0.34 ± 0.11^c	15.42 ± 1.85^a	68.45 ± 2.55^{bc}

2.4 类胡萝卜素提取动力学分析

由图 4 可知，30 min 后类胡萝卜素提取量逐渐达到平衡。通过对提取动力学数据的拟合分析发现，该提取过程更符合拟二级动力学模型（Pseudo-second-order），其线性相关系数 R^2 高达 0.999 6，显著优于拟一级动力学模型的 0.932 7。在物理意义上，拟二级模型计算所得的平衡提取量 C_e （ $151.79\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ）与实验观察到的平衡趋势（约 $147\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ）高度吻合，而拟一级模型计算出的平衡值（ $51.80\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ）严重偏低，无法准确描述系统行为。这表明该提取过程的速率限制步骤可能涉及化学吸附或复杂的扩散机制，拟二级模型能够全过程、高精度地预测提取量随时间的变化规律。

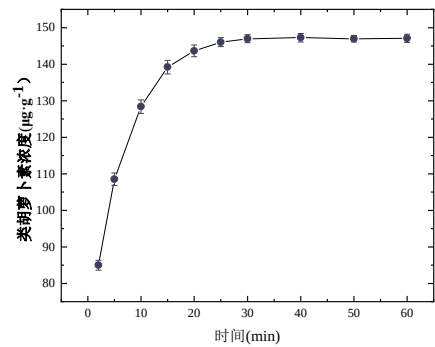


图 4 类胡萝卜素提取量随时间变化图

Fig.4 Chart of carotenoid extraction rate variation over time

表 4 拟合参数结果

Table 4 Fitting Parameter Results

模型类型	速率常数/k	计算平衡提取量（Ce,cal）	相关系数（R ² ）
拟一级（PFO）	k ₁ =0.132 2 min ⁻¹	51.8	0.932 7
拟二级（PSO）	k ₂ =0.004 47	151.79	0.999 6

2.5 类胡萝卜素抗氧化活性分析

2.5.1 基于自由基模型的类胡萝卜素抗氧化活性分析

不同预处理条件下所提取的类胡萝卜素对 ABTS、DPPH 自由基的清除率结果如图 5 所示。超细粉碎-超高压均质组的自由基清除率最高，分别为 86.23%与 87.71%，与常规处理组（料液比=1:1）的 68.07%，68.45%相比，分别提高了 18.16%与 19.26%。Li 等^[11]对球形红细菌进行了超细粉碎和超声处理，提取类胡萝卜素并进行成分及抗氧化活性鉴定，其结果表明超细粉碎处理后提取的类胡萝卜素 DPPH 自由基清除率为 74.0%，与超声处理组相比，提高了 13%。

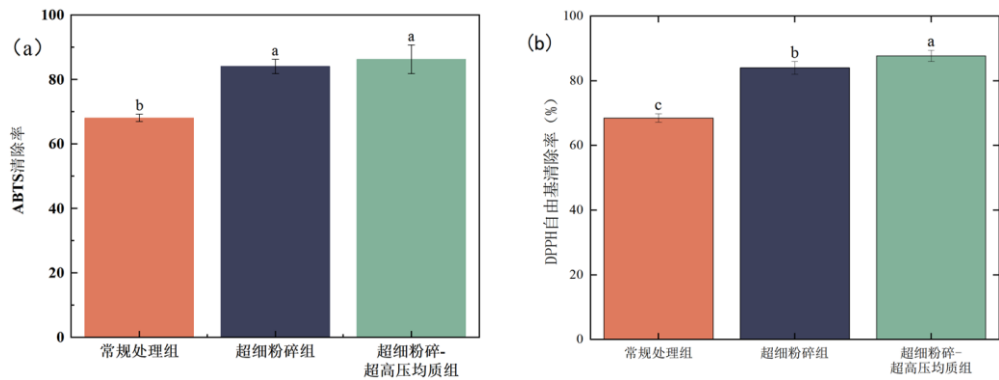


图 5 不同预处理下类胡萝卜素自由基清除率

Fig.5 Scavenging rates of carotenoids under different pretreatments

注：（a）为 ABTS 自由基，（b）为 DPPH 自由基。

2.5.2 基于细胞模型的类胡萝卜素抗氧化活性分析

2.5.2.1 细胞毒性

不同浓度二甲基亚砜对细胞存活率与不同预处理下所得类胡萝卜提取物经 0.1%二甲基亚砜（wt.%）溶解后对细胞存活率影响如图 6，7 所示。为排除二甲基亚砜本身对细胞毒性的影响，对不同质量分数二甲基亚砜下的细胞存活率进行测定，最终选取 0.1%质量分数下的二甲基亚砜溶解粉末。三种预处理工艺所得提取液的细胞存活率分别为 83.15%、82.95%、82.37%，均高于 80%。依据 ISO 10993-5 标准^[26]，细胞存活率大于 80%被界定为可接受水平。

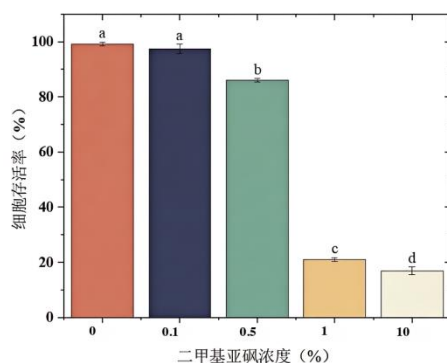


图 6 不同二甲基亚砷 (wt. %) 对细胞存活率的影响

Fig.6 Effect of Different Dimethyl Sulfoxide (wt. %) on Cell Survival Rate

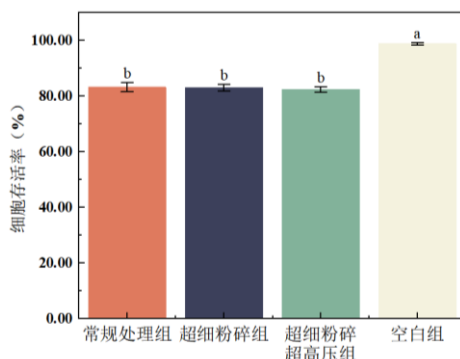
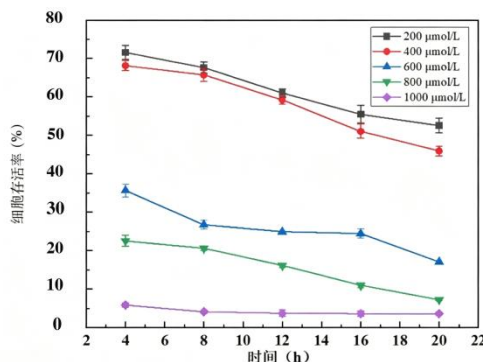


图 7 不同预处理类胡萝卜素提取物对 HepG2 细胞存活率的影响

Fig.7 Effects of Different Pretreated Carotenoid Extracts on HepG2 Cell Survival Rate

2.5.2.2 氧化应激模型建立

不同 H_2O_2 浓度处理不同时间下 HepG2 细胞存活率如图 8 示, 各处理组 HepG2 细胞存活率随 H_2O_2 作用时间延长而逐渐降低。高浓度 H_2O_2 对细胞杀伤性较大, 细胞存活率显著降低。1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2O_2 处理下, 细胞存活率均低于 10%, 800、600 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2O_2 处理下, 细胞存活率低于 50%。200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H_2O_2 处理细胞 4~20 h, 细胞存活率均高于 50%, 建立氧化应激模型时, 细胞存活率通常在 50%~70% 范围^[27]。细胞存活率过高, 无法造成明显的氧化损伤, 而细胞存活率过低, 则引起不可逆损伤, 均不利于构建氧化应激模型, 考虑时间与经济成本, 以 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理 12 h 时 60.99% 细胞存活率作为氧化应激模型的建立条件。

图 8 不同浓度 H_2O_2 处理不同时间对 HepG2 细胞存活率的影响Fig.8 Effect of different concentrations of H_2O_2 treatment for different time on the survival rate of HepG2 cells

2.5.2.3 丙二醛含量及酶活分析

不同处理条件下 HepG2 中 MDA 含量的影响如图 9 所示, MDA 是生物膜中的不饱和脂肪酸被氧化后的代谢产物, 其量的多少可以反映细胞脂质过氧化程度^[28,29]。模型组 MDA 的含量为 4.17 nmol mg^{-1} , 表明氧化应激模

型成功构建。VC 阳性对照组的 MDA 含量为 $1.92 \text{ nmol mg}^{-1}$ ，与模型组相比显著降低。而常规处理组，超细粉碎组，超细粉碎-超高压均质组的 MDA 含量分别为 3.44 、 2.79 、 $2.17 \text{ nmol mg}^{-1}$ 。与模型组相比，MDA 含量分别降低了 17.50% 、 33.09% 、 47.96% 。其中超细粉碎-超高压均质组的 MDA 含量与阳性对照组相比无显著性差异，说明类胡萝卜素提取液对细胞氧化有一定的保护作用。

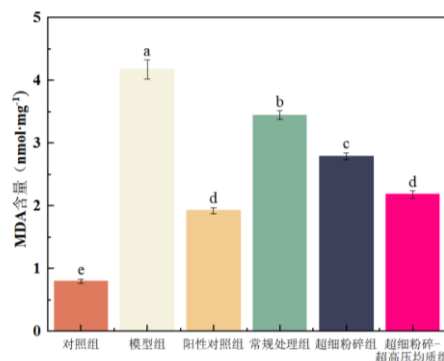


图 9 不同处理条件下 HepG2 细胞 MDA 含量图

Fig.9 MDA content profile of HepG2 cells under different treatment conditions

不同处理条件下 HepG2 过氧化氢酶 (CAT) 与超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性如图 10 所示。这两种酶作为生物体内极为关键的抗氧化酶，SOD 可将超氧阴离子 (O_2^-) 转化为对细胞相对温和的过氧化氢，CAT 则能将过氧化氢转化为无毒的水，二者协同构建起活性氧清除防线^[30,31]。对照组的酶活性处于最高值，模型组的 CAT 活性降至 13.2 U mg^{-1} ，约为对照组的 57.21% ，SOD 活性降至 119.18 U mg^{-1} ，约为对照组的 62.48% ，这表明模型处理导致酶活性明显下降，标志着模型构建成功；阳性对照组 CAT 活性为 18.07 U mg^{-1} ，约为对照组的 85.46% ，SOD 活性为 174.42 U mg^{-1} ，约为对照组的 83.23% 。这些结果表明，经 VC 处理后，HepG2 的酶活提高；超细粉碎-超高压均质处理组的 CAT 活性为 16.88 U mg^{-1} ，SOD 活性为 157.34 U mg^{-1} ，分别为对照组的 76.47% 和 78.47% ，为模型组的 1.28 与 1.32 倍，且 SOD 活性与阳性对照组相比无显著性差异。这表明，联合工艺的应用显著提高了黄桃中类胡萝卜素的提取效率及其生物活性。从协同效应角度看，UG-UHPH 组在降低 MDA 含量 ($2.17 \text{ nmol mg}^{-1}$) 和提升 CAT (16.88 U mg^{-1})、SOD (157.34 U mg^{-1}) 活性方面均显著优于单独 UG 组 (MDA: $2.79 \text{ nmol mg}^{-1}$; CAT: 14.52 U mg^{-1} ; SOD: 138.67 U mg^{-1})。这进一步证实，UG 与 UHPH 的联合应用不仅提高了类胡萝卜素的提取量，更关键的是保留了其细胞层面的抗氧化生物活性，体现了“量”与“质”的双重协同提升效应。

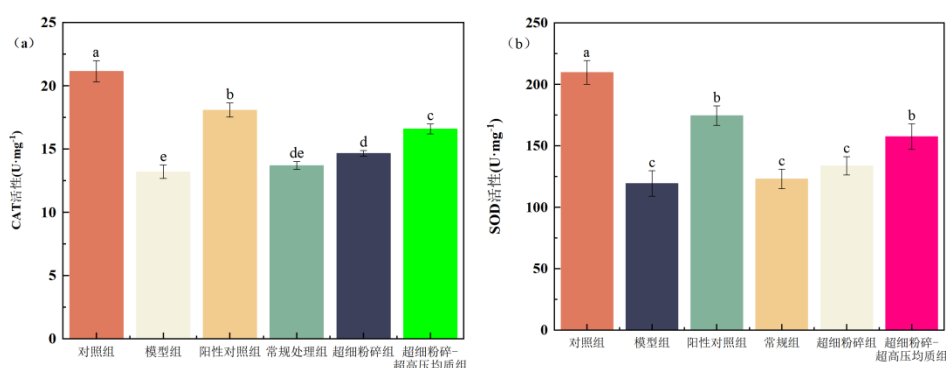


图 10 不同处理条件下 HepG2 细胞酶活性图

Fig.10 Enzyme activity profile of HepG2 cells under different treatment conditions

注：(a) 为 CAT 酶活，(b) 为 SOD 酶活。

3 结论

本研究优化了超细粉碎与超高压均质联合预处理提取黄桃类胡萝卜素的工艺，最佳条件为料液比 $1:1$ 、UG 转速 3000 r min^{-1} 、UHPH 压力 100 MPa 均质 2 次。联合处理显著提升了类胡萝卜素提取量，其效果优于单独 UG，

表现出协同增效作用。同时,联合处理所得提取物具有更强的体外自由基清除能力及减轻细胞氧化损伤的活性。本研究为UG-UHPH联用技术在果蔬活性成分高效提取领域的应用提供了理论依据。

参考文献

- [1] GENERALIĆ MEKINIĆ I, ŠIMAT V, RATHOD N B, et al. Algal carotenoids: Chemistry, sources, and application [J]. *Foods*, 2023, 12(14): 2768.
- [2] YUAN C, CHEN H, WANG Y, et al. Dietary carotenoids related to risk of incident Alzheimer dementia (AD) and brain AD neuropathology: A community-based cohort of older adults [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2021, 113(1): 200-208.
- [3] JING Y, WANG Y, ZHOU D, et al. Advances in the synthesis of three typical tetraterpenoids including β -carotene, lycopene and astaxanthin [J]. *Biotechnology Advances*, 2022, 61: 108033.
- [4] MELÉNDEZ-MARTÍNEZ A J, BÖHM V, BORGE G I A, et al. Carotenoids: Considerations for their use in functional foods, nutraceuticals, nutricosmetics, supplements, botanicals, and novel foods in the context of sustainability, circular economy, and climate change [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2021, 12(1): 433-460.
- [5] LIU C, HU B, CHENG Y, et al. Carotenoids from fungi and microalgae: A review on their recent production, extraction, and developments [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 337: 125398.
- [6] 高婧宇,谢龙莉,陈楠,等.低共熔溶剂在类胡萝卜素提取上的应用研究进展[J].*食品工业科技*,2023,44(24):381-389.
- [7] MORÓN-ORTIZ Á, MAPELLI-BRAHM P, MELÉNDEZ-MARTÍNEZ A J. Sustainable green extraction of carotenoid pigments: Innovative technologies and bio-based solvents [J]. *Antioxidants*, 2024, 13(2): 239.
- [8] SAINI R K, KEUM Y S. Carotenoid extraction methods: A review of recent developments [J]. *Food Chemistry*, 2018, 240: 90-103.
- [9] NILE S H, BASKAR V, SELVARAJ D, et al. Nanotechnologies in food science: Applications, recent trends, and future perspectives [J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): 45.
- [10] ZHANG M, WANG F, LIU R, et al. Effects of superfine grinding on physicochemical and antioxidant properties of *Lycium barbarum* polysaccharides [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 58(2): 594-601.
- [11] LI Z, KONG L, HUI B, et al. Identification and antioxidant activity of carotenoids from superfine powder of *Rhodobacter sphaeroides* [J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2017, 29(11): 833-840
- [12] PATRIGNANI F, LANCIOTTI R. Applications of high and ultra high pressure homogenization for food safety [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1132.
- [13] MORATA A, DEL FRESNO J M, GAVAHIAN M, et al. Effect of HHP and UHPH high-pressure techniques on the extraction and stability of grape and other fruit anthocyanins [J]. *Antioxidants*, 2023, 12(9): 1746.
- [14] XIE Y, HO S H, CHEN C N N, et al. Disruption of thermo-tolerant *Desmodesmus* sp. F51 in high pressure homogenization as a prelude to carotenoids extraction [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, 109: 243-251.
- [15] ZARIF B, SHABBIR S, RAHMAN A, et al. Milk phospholipids and buttermilk based composite nanosystems for enhanced stability and bioaccessibility of β -carotene [J]. *International Dairy Journal*, 2023, 143: 105668.
- [16] MATSUMOTO H, IKOMA Y, KATO M, et al. Quantification of carotenoids in citrus fruit by LC-MS and comparison of patterns of seasonal changes for carotenoids among citrus varieties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(6): 2356-2368.
- [17] 李慧琴.柿皮类胡萝卜素的提取分离及其抗氧化应激作用[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [18] HORMOZI-MOGHADDAM Z, NESHASTEHRIZ A, AMINI S M, et al. Investigating the effect of low-intensity ultrasound radiation in the presence of apigenin-coated gold nanoparticles on the expression of mRNAs affecting the apoptosis of MCF7 breast cancer cells [J]. *Food Bioscience*, 2024, 57: 103486.
- [19] 张业尼,钱磊,陈雪,等.过氧化氢诱导 HepG2 细胞氧化应激模型的建立[J].*食品研究与开发*,2018,39(5):156-160.
- [20] YU J, LIU X, ZHANG L, et al. An overview of carotenoid extractions using green solvents assisted by Z-isomerization [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 123: 145-160.
- [21] MOUAHID A, CRAMPON C, TOUDJI S A A, et al. Effects of high water content and drying pre-treatment on supercritical CO₂ extraction from *Dunaliella salina* microalgae: Experiments and modelling [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2016, 116: 271-280.
- [22] 刘璇,毕金峰,吴昕烨,等.果胶对脂类和类胡萝卜素消化利用影响研究进展[J].*农业工程学报*,2018,34(13):308-314.

- [23] 殷实,秦达念.番茄红素在雄性生殖领域上的研究进展[J].中华男科学杂志,2010,16(8):742-746.
- [24] WANG L, LIU Z, JIANG H, et al. Biotechnology advances in β -carotene production by microorganisms [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 111: 322-332.
- [25] LIU J, BI J, LIU X, et al. Fine structural characteristics of pectin are associated with *in vitro* carotenoid bioaccessibility in juices [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110813.
- [26] NADEEM-TARIQ A, FANG C J, HUI J L, et al. Biosensor-integrated tibial components in total knee arthroplasty: A narrative review of innovations, challenges, and translational frontiers [J]. Bioengineering, 2025, 12(9): 988.
- [27] 程敏,刘华伟,李建民,等.过氧化氢诱导产蛋鸡原代肝细胞氧化应激模型的建立[J].中国畜牧兽医,2019,46(4):1023-1030.
- [28] VIÑAS-OSPINO A, RITA JESUS A, PAIVA A, et al. Comparison of green solvents for the revalorization of orange by-products: Carotenoid extraction and *in vitro* antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138530.
- [29] DATE A A, NAGARSENKER M S, PATERE S, et al. Lecithin-based novel cationic nanocarriers (Leciplex) II: Improving therapeutic efficacy of quercetin on oral administration [J]. Molecular Pharmaceutics, 2011, 8(3): 716-726.
- [30] MESA J, HINESTROZA-CÓRDOBA L I, BARRERA C, et al. High Homogenization Pressures to Improve Food Quality, Functionality and Sustainability [J]. Molecules, 2020, 25(14): 3305.
- [31] HAN C, LIU Q, YANG Y. Short-term effects of experimental warming and enhanced ultraviolet-B radiation on photosynthesis and antioxidant defense of *Picea asperata* seedlings [J]. Plant Growth Regulation, 2009, 58(2): 153-162.