陈姝彤, 刘谨, 李雅茹, 等. 脉冲超声辅助天然低共熔溶剂提取欧李多酚及其富集机制和抗氧化活性的研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 313−323. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030264
CHEN Shutong, LIU Jin, LI Yaru, et al. Extraction of *Cerasus humilis* Polyphenol by the Probe-type Ultrasound Assisted with NADES and Its Enrichment Mechanism and Antioxidant Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 313−323. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030264

· 工艺技术 ·

脉冲超声辅助天然低共熔溶剂提取欧李多酚及其富集机制和抗氧化活性的研究

陈姝彤[1,2], 刘　谨[2], 李雅茹[2], 张爱琳[1,*], 况文海[2], 熊钰洁[2], 郝　澍[2], 陈　思[2], 张化浩[2], 江慎华[1,2,*]
（1.天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300384;
2.九江学院药学与生命科学学院, 九江市食品加工与安全重点实验室, 九江市鲤科重要经济鱼类保护及开发重点实验室, 江西九江 332000）

摘　要: 本研究采用脉冲超声辅助天然低共熔溶剂（Natural deep eutectic solvents，NADES）提取欧李多酚（*Cerasus humilis* polyphenol，CHP），经单因素实验和正交试验优化提取参数，利用吸附/解吸能力筛选最优树脂，采用树脂吸附动力学、等温线平衡实验探究树脂对 CHP 的吸附机制，并对 CHP 组成及抗氧化活性进行了分析。结果表明，氯化胆碱和柠檬酸为提取 CHP 最优溶剂，料液比 1∶50（g/mL）、超声功率 420 W、NADES 含水率 35%（V/V）、超声提取 30 min，CHP 提取量达 491.25 mg/100 g 干重。AB-8 具有良好的吸附/解吸能力和解吸率（分别为 80.20%、57.81% 和 46.36%），被筛选为最佳树脂。吸附过程为单分子层吸附，且低温有利于吸附进行。通过 LC-MS^2 从提取物中鉴定出包括绿原酸、儿茶素和表儿茶素在内的 17 种多酚类化合物。此外，CHP 对 DPPH、$ABTS^+$自由基 SC_{50} 分别为 0.059 和 0.032 mg/mL，展示出较强的抗氧化能力。本研究可为欧李功能性活性物质的绿色提取和应用提供理论依据。

关键词: 欧李, 多酚, 天然低共溶溶剂（Natural deep eutectic solvents, NADES）, 脉冲超声辅助提取, 大孔树脂吸附机制, 抗氧化活性
中图分类号: TS255.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0313−11　　本文网刊:
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030264

Extraction of *Cerasus humilis* Polyphenol by the Probe-type Ultrasound Assisted with NADES and Its Enrichment Mechanism and Antioxidant Activity

CHEN Shutong[1,2], LIU Jin[2], LI Yaru[2], ZHANG Ailin[1,*], KUANG Wenhai[2], XIONG Yujie[2], HAO Shu[2], CHEN Si[2], ZHANG Huahao[2], JIANG Shenhua[1,2,*]
（1.School of Food Science and Biological Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China;
2.Jiujiang Key Laboratory of Food Processing and Safety, Jiujiang Key Laboratory of Conservation and Development of Major Cyprinidae Fish, School of Pharmacy and Life Science, Jiujiang University, Jiujiang 332000, China）

Abstract: In this study, probe-type ultrasound assisted natural deep eutectic solvents (NADES) were used for the extraction of *Cerasus humilis* polyphenols (CHP). The extraction parameters were optimised by single factor and orthogonal experiments, and the optimal resin was selected based on adsorption/desorption capacity. The adsorption mechanism of the

收稿日期: 2025−03−19
基金项目: 天津市科技计划项目（23ZYCGSN00210）; 国家自然科学基金（31360371）; 2022 年天津市研究生科研创新项目（2022SKY199）; 山东省重点研发项目（2023TZXD034）; 江西省渔业种业项目（2024yyzygg-07）; 大学生创新创业训练计划项目（202211843023, S202411843060）。
作者简介: 陈姝彤（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: shutongchen19@163.com。
*** 通信作者:** 张爱琳（1977−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: anlinye_zth@163.com。
江慎华（1973−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养学, 农副产品精深加工, E-mail: jiangshenhua66@163.com。

resin on CHP was investigated by resin adsorption kinetics and isothermal equilibrium experiments, and the composition and antioxidant activity of CHP were analysed. The results showed that choline chloride and citric acid were the optimal solvents for extracting CHP with a solid-liquid ratio of 1∶50 (g/mL), ultrasonic power of 420 W, NADES moisture content of 35% (V/V) and ultrasonic extraction for 30 min. The CHP extraction content reached 491.25 mg/100 g dry weight. AB-8 had favorable adsorption/desorption capacity and desorption rate (80.20%, 57.81% and 46.36%, respectively) and was selected as the optimal resin. The adsorption process was monolayer adsorption, and low temperature was conducive to adsorption. Seventeen polyphenolic compounds, including chlorogenic acid, catechins and epicatechins, were identified from the purified extract by LC-MS^2. In addition, CHP exhibited strong antioxidant activity with SC_{50} values of 0.059 and 0.032 mg/mL for DPPH and ABTS$^+$ radical scavenging, respectively. This study may provide a theoretical basis for the green extraction and application of functional agents in *Cerasus humilis*.

Key words: *Cerasus humilis*; polyphenol; natural deep eutectic solvents (NADES); probe-type ultrasound-assisted extraction; macroporous resin adsorption mechanism; antioxidant activity

多酚是植物中重要的二级代谢产物，含有多个羟基的芳香族化合物，具有抗炎、抗氧化、抑制癌细胞生长等多种功能特性，对人体健康有重要作用[1]。欧李（*Cerasus humilis*（Bge.）Sok.）是我国特有多年生樱桃属小灌木，抗逆性极强，可耐干旱、耐酸、耐碱，在我国北方已有 3000 年种植历史[2]。欧李富含多种营养成分（多酚、有机酸、矿物质等），这些成分在抗氧化、免疫调节肠道微生物菌群及对黏膜屏障的调节方面发挥了重要作用。钙含量尤其丰富，因此被称为“钙果”，既可鲜食又可药用，其欧李仁常被用来治疗便秘、水肿和消化不良[3]。

以往植物多酚的提取主要是通过甲醇、乙醇、丙酮等有机溶剂，这些溶剂对环境及人体有一定的影响，而热水浸提对于一些极性较强的目标产物很难达到较高的提取效率[4]。天然低共熔溶剂（Natural deep eutectic solvents, NADES）是由两种或两种以上来自天然初级代谢产物的氢键供体（hydrogen-bond donors, HBD）和氢键受体（hydrogen-bond acceptors, HBA）组成，该混合物熔点远低于其各自组分，且在常温下能以液体形式稳定存在，具有天然、不易挥发、可降解，亦被认为是超高效的绿色提取溶剂，近年来在提取天然产物领域取得显著的效果[5−7]，但 NADES 的高黏度会阻碍溶质与溶剂间的传质。脉冲超声所产生的空化效应和机械扰动可缓解 NADES 黏度高的不足，同时聚能式探头与溶液直接接触，有更高的能量传递效率[8]。脉冲超声波与 NADES 结合广泛应用在天然产物提取领域，一方面可解决 NADES 黏度高、在提取过程中传质效率低等问题；另一方面 NADES 可与目标多酚形成氢键并产生静电相互作用，从而显著提高多酚提取量[5,9]。但 NADES 结合脉冲超声波辅助提取（probe-type ultrasonic assisted extraction, pr-UAE-NADES）欧李多酚（*Cerasus humilis* polyphenol, CHP）尚未见相关报道。

植物粗提液需进一步富集纯化以达到各种工业要求。大孔树脂拥有独特的比表面积、孔径和表面极性，有较高的吸附能力、理化性质稳定、低成本等优良特性，对目标产物表现出特有的选择性被广泛应用于天然产物纯化等领域[10]。Li 等[11] 采用 X-5 富集欧洲李中富含新绿原酸的多酚，其吸附率、解吸率和回收率分别达 99.62%、44.80% 和 44.29%，借助超高效液相色谱结合三重四极杆质谱鉴定出 21 种多酚类化合物。大孔树脂吸附过程中吸附机理可通过吸附动力学来阐明，同时吸附等温线有助于理解吸附剂与吸附质之间的相互作用，优化性能参数和解释能量守恒。Liu 等[12] 表明 LSA-21 树脂对甘草次碱的吸附符合二级动力学和朗缪尔模型，且整个过程为放热、自发进行的单分子层吸附。但对于采用大孔树脂富集 CHP 的最适大孔树脂的选择及富集过程中的对应机制尚不明确。

因此，本研究采用脉冲超声辅助 NADES 法提取 CHP，通过单因素实验及正交试验优化提取条件，确定 CHP 最佳提取工艺；进而采用大孔树脂富集 CHP，通过吸附动力学及等温线平衡模型阐明吸附机理，最大限度提升 CHP 提取量。采用 DPPH、ABTS$^+$ 自由基清除实验和 FRAP 还原力实验验证 CHP 的抗氧化能力，为欧李在食品和药品领域的开发及综合利用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

欧李　购自江西华富乐康农林发展有限公司；没食子酸（纯度≥99%）、抗坏血酸、氯化胆碱、柠檬酸等试剂　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；树脂　购自西安蓝晓科技新材料股份有限公司、河北沧州宝恩股份有限公司；其余溶剂均为国产分析纯。

CR22E 型高速冷冻离心机　日本日立公司；TU-1901 双光束紫外可见分光光度计　北京普析通用仪器有限责任公司；SpectraMax 190 酶标仪　美国 MD 公司；6545 LC/Q-TOF 高效液相色谱-质谱仪　安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　采用 pr-UAE-NADES 提取 CHP

1.2.1.1　总多酚含量测定　总多酚含量采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定，以每克干重（dry weight, DW）没食子酸当量（gallic acid equivalents, GAE）表示[11]。

向 0.5 mL 不同浓度的没食子酸标准液或样品溶液中加入 2.25 mL、10%(v/v)Folin-Ciocalteu 溶液，混匀、室温避光静置 3 min 后，再加 2.25 mL 15% Na_2CO_3 溶液，室温避光静置 1 h 后于 765 nm 测吸光度值。以浓度为 x 轴、吸光度值为 y 轴，得到标准曲线 y=0.000 9x+0.0099(决定系数 R^2=0.9980)，通过该标准曲线计算获得样品总多酚提取量。

$$多酚提取量(mg/100\ g\ DW)=\frac{cv}{m}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中：c、v、m 分别为 CHP 提取液浓度(mg/L)、所用溶剂体积(L)和所用原料质量(g)。

1.2.1.2　Pr-UAE-NADES 提取溶剂的筛选　NADES 制备参照文献 [2,13] 稍作修改。将选定的氢键供体、氢键受体和水按一定比例混合，80 ℃ 水浴搅拌直至形成稳定的无色透明溶液(表 1)。

称取 1.00 g 样品置烧瓶中，加入 40 mL 不同提取溶剂(5 种 NADES、60% 甲醇、60% 乙醇)，脉冲超声(工作及间隔时间均为 2 s)提取功率 300 W，50 ℃ 提取 20 min，所得提取液 8000 r/min 离心 10 min 后测定欧李多酚含量。

表 1　天然低共熔溶剂成分摩尔比及含水率

Table 1　Molar ratios and water contents of prepared NADES

NADES 缩写	氢键受体	氢键供体	摩尔比	NADES含水率 (%)
CC-UR	氯化胆碱 (Choline chloride, CC)	尿素 (Urea, UR)	1:2	25
CC-MA		苹果酸 (Malonic acid, MA)	1:1	25
CC-GLY		甘油 (Glycerol, GLY)	1:2	25
CC-CIT		柠檬酸 (Citric acid, CIT)	1:1	25
CC-GLU		葡萄糖 (Glucose, GLU)	1:1	25

1.2.1.3　单因素实验　以 CC-CIT 为溶剂进行单因素筛选实验，以料液比 1:40、提取温度 50 ℃、提取时间 20 min、超声功率 300 W、NADES 含水率 25% 为初始条件，GHP 提取量为指标，依次对料液比(1:30、1:40、1:50、1:60、1:70)、超声功率(300、420、540、660、780 W)、NADES 含水率(15%、25%、35%、45%、55%)和超声时间(10、15、20、25、30 min)进行优化。

1.2.1.4　正交试验　为进一步优化提取工艺，选取单因素各因素中最优水平及临近两个水平为新水平进行四因素三水平($L_9(3^4)$)正交试验(表 2)。

表 2　正交实验 $L_9(3^4)$ 因素及水平

Table 2　Factors and levels of the orthogonal design $L_9(3^4)$

因子	水平		
	1	2	3
A 料液比(g/mL)	1:30	1:40	1:50
B 超声功率(W)	420	540	660
C NADES含水率(%)	15	25	35
D 超声时间(min)	10	20	30

1.2.2　大孔树脂对 CHP 富集效果及机制

1.2.2.1　树脂筛选　选取 6 种不同种类的代表性大孔树脂，将各树脂采用 Hou 等[14] 方法并稍作修改，进行预处理以除去致孔剂和单体：95% 乙醇浸泡 24 h，3% HCl 浸泡 4 h，用蒸馏水洗至中性；再用 3% NaOH 浸泡 4 h，水洗后调节 pH 为中性，按照大孔树脂干重，通过静态吸附/解吸实验，综合考虑吸附/解吸能力和吸附/解吸率来确定吸附 CHP 的最优树脂。

采用上述最佳工艺提取 CHP，用预先活化好的 2 g(DW)树脂与 100 mL 样品溶液(浓度 37.17 mg/L)混合在 250 mL 锥形瓶中置于水浴摇床以 130 r/min 转速静态吸附 12 h，吸附完成后测定样液吸光度值。上述吸附结束的树脂采用 200 mL 酸化水水洗，然后采用 100 mL 80% 乙醇混合水洗后的树脂在 250 mL 锥形瓶中置于水浴摇床以 130 r/min 静态解吸 12 h，解吸结束后测洗脱后样液吸光度值，计算吸附量、解吸量、解吸率，选出最优树脂。

$$q_e=(C_0-C_e)/m\times V_0 \qquad 式（2）$$

$$q_d=C_dV_d/m \qquad 式（3）$$

$$D=C_dV_d/(C_0-C_e)V_0\times 100 \qquad 式（4）$$

式中：q_e、q_d 分别为平衡吸附量和解吸量(mg/g)；V_0 和 V_d 分别表示初始吸附溶液和解吸溶液的体积(L)；C_0、C_e 和 C_d 分别表示多酚的初始浓度、平衡浓度和解吸浓度(mg/L)；m 是树脂干重(g)；D 代表解吸率(%)。

1.2.2.2　吸附动力学　将 3 g(DW)AB-8 树脂和 150 mL样品溶液(浓度 7.20 mg/L)在 500 mL 锥形瓶中 25 ℃ 水浴摇床振荡(转速 130 r/min)吸附 12 h，并定期(0、10、20、30、40、50、60、80、100、120、150、180、210、240、270、300、360、480、600、720 min)吸取样液分析吸附过程中 CHP 的浓度。

$$一级动力学：\ln(q_e-q_t)=\ln q_e-k_1t \qquad 式（5）$$

$$二级动力学：t/q_t=1/k_2q_e^2+t/q_e \qquad 式（6）$$

$$颗粒内扩散：q_t=t^{1/2}k_3+C \qquad 式（7）$$

式中：q_e 和 q_t 是时间 t(min)时的平衡吸附量(mg/g)和吸附量(mg/g)；k_1、k_2 和 k_3 分别是一级(min^{-1})、二级 [g/(mg·min)] 和颗粒扩散动力学模型 [mg/(g·$min^{1/2}$)] 的吸附速率常数；C 是颗粒内扩散动力学模型常数。

1.2.2.3　吸附等温线及吸附热力学　按 Liu 等[12] 的方法略作修改进行。将 1 g(DW)AB-8 树脂和 100 mL 样品溶液(总多酚浓度梯度依次为 5.21、10.42、15.63、20.84、26.05 mg/L)分别置于 250 mL 锥形瓶中。在 25、35、45 ℃ 水浴摇床(130 r/min)中振荡、静态吸附 8 h，吸附结束后测定所吸附 CHP 的浓度。

Langmuir 模型：$\frac{c_e}{q_e}=\frac{1}{K_L q_m}+\frac{c_e}{q_m}$ 式（8）

Freundlich 模型：$\ln q_e=\frac{1}{n}\ln c_e+\ln K_F$ 式（9）

Temkin 模型：$q_e=B_T\ln K_T+B_T\ln c_e$ 式（10）

$\ln K_{eq}=-\frac{\Delta H}{RT}+\frac{\Delta S}{R}$ 式（11）

$\Delta G=-RT\ln K_C$ 式（12）

式中：q_m 表示最大吸附量（mg/g）；K_L、K_F 和 K_T 分别是 Langmuir 模型（L/mg）、Freundlich 模型[(mg/g)（L/min）$^{1/n}$] 和 Temkin 模型（L/min）的平衡常数；1/n 反映了吸附驱动力的大小；B_T 是与吸附热相关的常数（J/mol）；K_{eq} 是平衡分配系数；T 是温度（K）；R 是气体常数 8.314（J mol^{-1}K^{-1}），ΔG（kJ/mol）、ΔH（kJ/mol）和 ΔS（J mol^{-1}K^{-1}）是热力学参数。

1.2.3 采用 LC-MS^2 对欧李多酚组分鉴定 LC-MS^2 耦合色谱分离可电离和蒸发不稳定和复杂分子，基于前体离子和碎片离子的存在，借助分子计算器和已有文献对比，初步鉴定多酚类物质[15]。在 Wu 等[15] 的方法上略作修改，采用 LC-Q-TOF/MS 鉴定 CHP（C_{18} 柱，100 mm×3.0 mm，粒径 2.7 μm），负电离模式，流动相为 A 0.1% 甲酸乙腈（v/v）和 B 0.1% 甲酸水，流速 0.4 mL/min。洗脱程序如下：0~5 min，5%~20% A；5~10 min，20%~25% A；气体温度 350 ℃，干燥气体流量 8 L/min，喷雾器 35 bar，鞘气流量 11 L/min，毛细管电压 3.5 kV，扫描范围 m/z 100~1500，碰撞能量 15 eV 和 35 eV。

1.2.4 抗氧化活性测定 采用 Li 等[11] 的方法略作修改。测定 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、2,2′-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（ABTS$^+$）自由基清除活性和铁还原抗氧化能力（Ferric reducing antioxidant power，FRAP）。

1.2.4.1 DPPH 自由基清除率 将样品溶液（40 μL）（V_C 作为阳性对照，下同）和 160 μL DPPH 溶液混合后避光孵育 30 min 后在 517 nm 处测量样液吸光度[16]。

1.2.4.2 ABTS$^+$自由基清除率 将 ABTS 溶液（7 mmol/L）与等体积的过硫酸钾（2.4 mmol/L）混合，避光孵育 12 h 以产生 ABTS 储备溶液，然后稀释得到工作溶液（在 734 nm 处的吸光度：0.70±0.02）。将混合物（50 μL 样品溶液和 150 μL ABTS 工作溶液）在室温孵育 10 min，在 734 nm 处测量样液吸光度。通过公式（13）测定对 DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除活性。

自由基清除率(%)$=\left(1-\frac{A_1-A_0}{A_2}\right)\times 100$ 式（13）

式中：A_0、A_1 和 A_2 分别表示空白、样品和对照组的吸光度。

1.2.4.3 FRAP 铁离子还原抗氧化能力 在 37 ℃ 下将混合物（样品溶液∶FRAP 工作溶液=1∶10，v/v）孵育 10 min 后，在 593 nm 处测量样液吸光度值。FRAP 工作液制备过程：将 10 mmol/L TPTZ（溶剂为 40 mmol/L 优级纯 HCl）、12 mmol/L $FeCl_3$、0.3 mol/L 醋酸钠（pH3.6）以体积比为：1∶1∶10 混合。根据标准曲线确定 FRAP 值（y=9.6203x−0.4318，R^2=0.9999）。结果以 mmol Fe^{2+}/g 表示。

1.3 数据处理

每项实验均设三次重复，数据以平均值±标准差表示；采用 Origin 和 SPSS 25.0 对实验数据进行统计处理，通过 Tukey 检验，不同字母在组间显示出显著差异，统计结果以 P<0.05 代表显著性差异。

2 结果与分析

2.1 采用 pr-UAE-NADES 技术对 CHP 提取工艺优化

2.1.1 NADES 筛选 以 CC 为主要氢键受体，结合不同类型的氢键供体制备 5 种环境友好型 NADES 结合 UAE 来筛选提取 CHP 的最佳溶剂，并与传统溶剂 60% 乙醇和 60% 甲醇比较（以 CHP 提取量为指标）。如图 1 所示，CC-CIT 提取量最高，显著高于其他 NADES 及传统溶剂（P<0.05），其余依次为 60% 乙醇≈60% 甲醇≈CC-MA>CC-GLY>CC-UR>CC-GL。CC-CIT 提取量高的原因可能是 NADES 间形成了氢键，加速了内容物溶出[7,17−19]。Rashid 等[8] 也得出 CC-CIT 最适合提取苹果渣中生物活性物质的结论。CC 和甜菜碱已被广泛用于食品行业提取生物活性物质，CIT 是国家标准规定的食品添加剂[19]。因此，选用 CC-CIT 优化欧李多酚提取工艺。

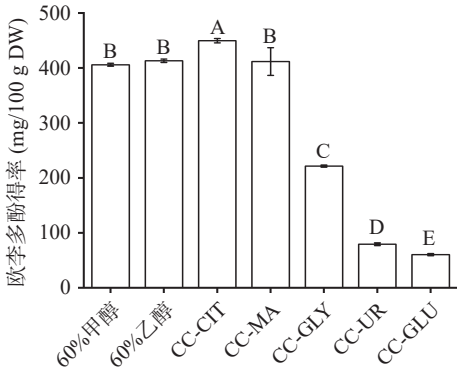


图 1 不同溶剂对 CHP 提取量的影响

Fig.1 Effect of different solvents on the extraction of polyphenols from *Cerasus humilis*

注：不同大写字母表示各组间差异显著，P<0.05，图 2 同。

2.1.2 单因素实验

2.1.2.1 料液比对 CHP 提取量的影响 单因素实验结果均呈现出先增加后降低的趋势（图 2）。原料一定，溶剂使用较少时，体系黏度大需克服较大的共价作用力才能使溶质溶出；随着溶剂体积增大，CHP 提取量逐渐增加，主要是由于原料与溶剂接触的比表面

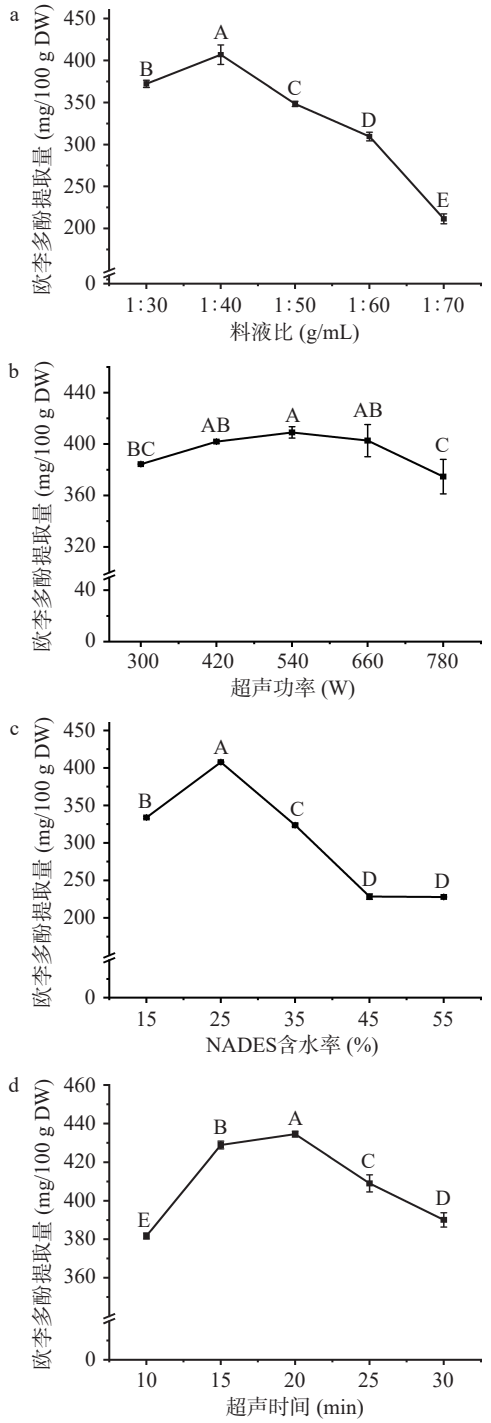


图 2　料液比(a)、超声功率(b)、NADES 含水量(c)和超声波时间(d)对 CHP 提取量的影响

Fig.2　Effects of solid to solvent ratio (A), ultrasonic power (B), ultrasonic time (C), and water content of NADES (D) on the yields of CHP

积增大，氢键形成增加，有利于多酚溶出[13]。当料液比为 1∶40 时提取量达最大，再增加溶剂体积，提取量显著降低，原因可能是体系达过饱和，目标产物进一步反应转化为其他物质，进而降低提取量。Rashid 等[8] 也得出相似结论。因此，综合考虑成本，选择料液比 1∶40 作为提取多酚最优提取条件。

2.1.2.2　脉冲超声功率对 CHP 提取量的影响　超声功率在超声辅助提取实验过程中产生的空化效应会产生微射流，加速粒子间碰撞导致细胞壁破裂、目标化合物的流出[20]。当超声功率升高至 540 W 时，多酚提取量达最大。随着超声功率的逐渐增大，多酚提取量呈下降趋势，原因可能是更强的空化效应产生更多的剪切力导致气泡破裂，以及目标产物在瞬时的超高温和超高压下部分降解[21]。因此，选择 540 W 作为提取多酚最优提取条件。

2.1.2.3　NADES 含水率对 CHP 提取量的影响　溶剂黏度过高会阻碍溶质与溶剂间传质[22]，含水率增加为 25%(w/w)时，提取量达最大。这是因为添加一定的水有利于降低溶剂黏度，促进溶质与溶剂的相互作用，提高了提取量；随着水分含量逐渐增加，提取量呈降低趋势，大量水分将溶剂稀释，氢键形成受阻，会造成提取量降低[13]。赵悦等[13] 也得出相似结论。因此，水的添加量要适量，选择含水率为 25%(w/w)作为提取 CHP 最优提取条件。

2.1.2.4　脉冲超声时间对 CHP 提取量的影响　随着超声时间的增加，提取量呈增加趋势，这是因为超声空化效应逐渐增大，超声波的空化效应增强了植物组织基质的肿胀、水化、碎裂导致孔隙形成，有利于内容物溶出[23]。继续延长时间 CHP 提取量呈下降趋势，表明超声所产生的过热和超高压会对内容物产生不同程度降解，同时多酚以外的其他物质也会溶出。Rashid 等[8] 也有相同结论。因此，选择超声提取时间 20 min 作为提取 CHP 最优提取条件。

2.1.3　正交试验结果　正交试验结果(表 3)表明料液比 1∶50、540 W、NADES 含水率 35% 和超声 10 min 下，CHP 提取量可达 456.58±15.61 mg/100 g DW。

表 3　正交试验结果

Table 3　Results of the orthogonal experimental

实验号	因素(水平)				结果
	A 料液比(g/mL)	B超声功率(W)	C NADES 含水率(%, w/w)	D超声时间(min)	CHP 提取量(mg/100 g DW)
1	1∶30(1)	420(1)	15(1)	10(1)	374.58±1.74
2	1∶30(1)	540(2)	25(2)	30(3)	405.87±4.12
3	1∶30(1)	660(3)	35(3)	20(2)	420.26±7.03
4	1∶40(2)	420(1)	35(3)	30(3)	450.68±3.06
5	1∶40(2)	540(2)	15(1)	20(2)	289.05±1.11
6	1∶40(2)	660(3)	25(2)	10(1)	426.23±12.54
7	1∶50(3)	420(1)	25(2)	20(2)	412.48±16.29
8	1∶50(3)	540(2)	35(3)	10(1)	456.58±15.61
9	1∶50(3)	660(3)	15(1)	30(3)	372.70±17.50

极差分析属于直观分析法，不同因素对实验结果的影响可根据极差的大小顺序来确定，R 值越大，对结果的影响就越大[24]。由表 4 可得，影响 CHP 提取量的因素依次为 C>D>B>A。但是仅根据 R 值不能区分数据的波动是由这些因素及其水平的变化引起、还是由实验误差造成。因此进行方差分析各因素是否对指标有影响。

模型项 P>0.05，表明实验具有重现性[25]。方差

表 4 极差分析结果

Table 4 Results of the range analysis

项目	A料液比	B超声功率(W)	C NADES含水率 (%)	D超声时间(min)
K_{1j}	3602.15	3713.23	3108.99	3772.19
K_{2j}	3497.90	3454.50	3733.75	3365.35
K_{3j}	3725.26	3657.57	3982.57	3687.76
k_{1j}	400.24	412.58	345.44	419.13
k_{2j}	388.66	383.83	414.86	373.93
k_{3j}	413.92	406.40	442.51	409.75
R	25.26	28.75	97.06	45.20
最优水平	A_3	B_1	C_3	D_1
次序	C>D>B>A			

表 5 方差分析结果

Table 5 Results of the analysis of variance (ANOVA)

项目	SS	df	MS	*F*值	*P*值	显著性
模型	692.36	2	346.178	2.311	0.131	不显著
A	2878.17	2	1439.080	9.608	*P*<0.005	显著
B	4120.89	2	2060.450	13.756	*P*<0.001	极显著
C	45017.90	2	22508.950	150.277	*P*<0.001	极显著
D	10243.74	2	5121.870	34.195	*P*<0.001	极显著
误差	2396.53	16	149.783			
总计	65349.58	26				
			R^2=0.963			

分析结果表明四个因素均具有显著差异,需用多重比较进一步证明各因素水平间是否有显著性影响(表 5)。由表 6 可知,最优提取条件 B_1、B_3 不显著,D_1、D_3 不显著。因此,最优提取条件为 $A_3B_1C_3D_1$、$A_3B_1C_3D_3$、$A_3B_3C_3D_1$ 或 $A_3B_3C_3D_3$。

表 6 重要因素平均值的多重比较

Table 6 Multiple comparisons of the average values of important factors

因素	A			B			C			D		
水平	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
CHP提取量（mg/100 g DW）	400.24^{Bb}	388.66^{bB}	412.58^{aA}	412.58^{aA}	383.83^{bB}	406.40^{aA}	345.44^{cC}	414.86^{bB}	442.51^{aA}	419.13^{aA}	373.93^{bB}	409.75^{aA}

注: 同行不同小写字母表示数据具有显著差异, *P*<0.05; 不同大写字母表示数据具有极显著差异, *P*<0.01; 表7同。

2.1.4 验证实验 由表 7 可得,与 $A_3B_1C_3D_1$ 相比,$A_3B_1C_3D_3$、$A_3B_3C_3D_1$或 $A_3B_3C_3D_3$ 均极显著(*P*<0.01),综合考虑时间因素,选取最优提取条件为 $A_3B_1C_3D_3$。

表 7 验证实验结果

Table 7 Verification of the experimental results

组合	$A_3B_1C_3D_1$	$A_3B_1C_3D_3$	$A_3B_3C_3D_1$	$A_3B_3C_3D_3$
CHP提取量（mg/100 g DW）	432.37^{bB}	491.25^{aA}	477.89^{aA}	480.64^{aA}

2.2 树脂对 CHP 富集技术确定及吸附机制

2.2.1 树脂筛选结果 大孔树脂对目标产物的吸附/解吸能力受到包括树脂的结构、极性、孔径、比表面积以及目标化合物的分子大小和极性等多种因素的影响[26]。由表 8 可得,6 种树脂对 CHP 吸附/解吸能力略有差异,其中,弱极性的 AB-8、LX-12 和 LX-68 有较高的吸附能力(*P*<0.05),AB-8 吸附能力最佳,达 1.49 mg/g,有较高的吸附率、解吸率和回收率得益于 AB-8 树脂的极性与目标产物的极性相似,符合相似相溶原则[12]。另外,AB-8 含有相对较大的孔径,使其对CHP 有高效的解吸能力。LX-12 解吸能力较低的原因是孔径较小,限制了目标物质的溶出[27]。Hou等[14]也根据 NKA-Ⅱ树脂有最佳的吸附/解吸能力确定其为吸附斑蝥多酚的最佳树脂。综上所述,AB-8 对 CHP 有较好的吸附/解吸能力和解吸率,选用AB-8作为富集 CHP 的最优树脂,进一步研究其具体吸附过程及吸附机制。

2.2.2 吸附动力学 吸附动力学可用于评估 CHP 在 AB-8 树脂上的吸附速率和时间之间的关系,并探索其吸附机理[11]。由图 3a 显示,CHP 在 AB-8 上的吸附在最初的 60 min 迅速增加,然后缓慢增加,直到大约 480 min 接近完全饱和,这可能是因为 AB-8 树脂的位点随着时间的推移逐渐被占据接近饱和[11]。采用伪一级动力学、伪二级动力学和颗粒内扩散模型拟合了吸附动力学曲线去阐明 CHP 在 AB-8 树脂上的吸附行为,相关拟合参数如表 9 所示。首先,二级

表 8 大孔树脂的物理特性及树脂筛选结果

Table 8 Physical properties of the MAR used and results of resin screen

树脂种类	粒径 (mm)	比表面积 (m^2/g)	平均孔径 (nm)	极性	吸附量(mg/g)	吸附率(%)	解吸量(mg/g)	解吸率 (%)	回收率 (%)
DM-21	0.2~0.6	1000~1100	80~90	非极性	1.38^{D}	74.11^{D}	0.78^{B}	56.41^{B}	41.80^{AB}
AB-8	0.3~1.25	480~530	13.0~14.0	弱极性	1.49^{A}	80.20^{A}	0.86^{A}	57.81^{A}	46.36^{A}
XDA-7	0.4~1.25	800~1100	12.0~14.0	非极性	1.38^{D}	74.48^{D}	0.79^{B}	56.89^{B}	42.36^{A}
X-5	0.3~1.25	500~600	21.0~23.0	非极性	1.32^{E}	70.92^{E}	0.72^{C}	54.35^{C}	38.54^{B}
LX-68	0.3~1.25	450	6.3	弱极性	1.41^{C}	76.01^{C}	0.82^{A}	58.00^{A}	44.09^{A}
LX-12	0.315~1.25	500-600	8.0-10.0	弱极性	1.44^{B}	77.55^{B}	0.71^{D}	49.05^{D}	38.02^{C}

注: 同列不同大写字母表示数据差异显著, *P*<0.05。

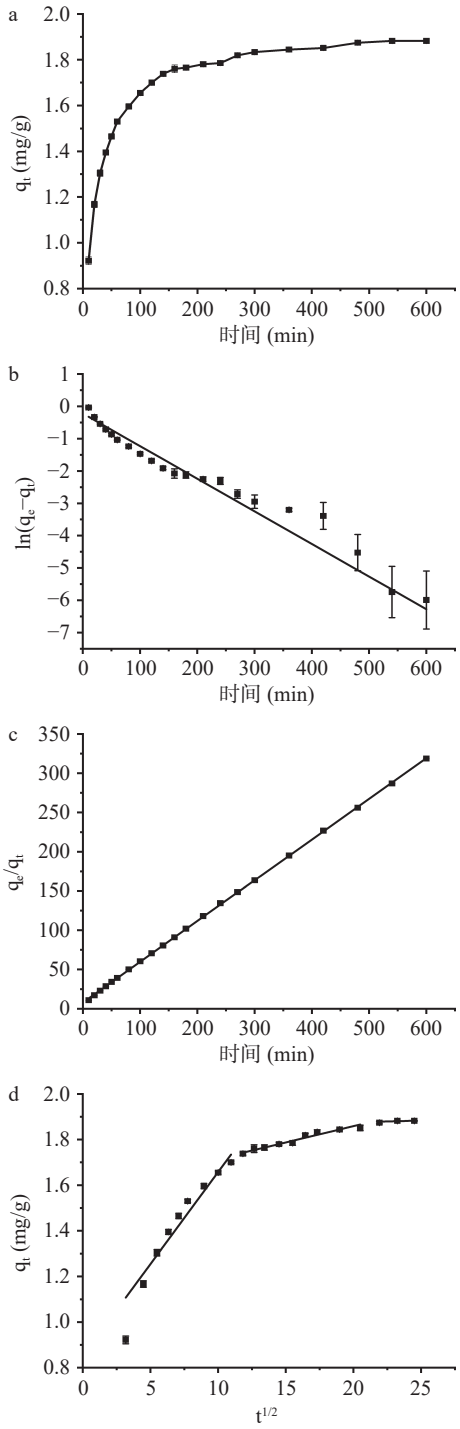


图 3　25 ℃ 下 CHP 在 AB-8 树脂上的吸附动力学曲线(a)和基于一级(b)、二级(c)和颗粒内扩散(d)模型的线性相关性

Fig.3　Adsorption kinetic curves (a) and linear correlations based on the pseudo-first-order (b), pseudo-second-order (c), and intra-particle diffusion (d) models for CHP on AB-8 resin at 25 ℃

动力学模型的 R^2 值(0.9999)高于一级动力学模型(0.9028)，这表明二级动力学更适合描述吸附过程。其次，二级动力学模型的理论 q_e 值(1.9272 mg/g)与实验 q_e 值(1.885 mg/g)更为接近，也证明其吸附过程存在多个限制因素[12]。在之前的研究中也观察到了类似的结果[11]。此外，颗粒内扩散模型可以揭示目标物质在树脂上的吸附过程。如图 3d 所示，颗粒内扩散模型显示出多重线性关系，分别表示 CHP 在 AB-8 树脂上吸附的三个阶段[27]：即 CHP 在树脂外表面的吸附($t^{1/2}$≈0~11)、CHP 在树脂孔中的扩散($t^{1/2}$≈11~20.5)和 CHP 在树脂内的吸收($t^{1/2}$>20.5)。C 为正值表明颗粒内扩散不是唯一的速率限制步骤，而是 CHP 吸附的主要速率限制因素，树脂外表面扩散也影响吸附过程[28]。Liu 等[12] 也得出相似结论：LSA-21 树脂吸附甘草次碱受多种因素影响。

表 9　欧李多酚在 AB-8 树脂上的吸附动力学方程和参数

Table 9　Adsorption kinetic equations and parameters of CHP adsorption onto AB-8 resin

动力学模型	公式	动态参数
一级动力学	$\ln(q_e-q_t)=-0.0101t-0.221$	$k_1=-0.0101\ min^{-1}$, $q_e=0.8017$ mg/g, $R^2=0.9028$
二级动力学	$t/q_t=0.5189t+7.9394$	$k_2=0.0337$ g/(mg·min), $q_e=1.9272$ mg/g, $R^2=0.9999$
颗粒内扩散	$q_t=0.0805t^{1/2}+0.8529$ ($t^{1/2}$≈0~11)	$k_3=0.0805$ mg/(g·$min^{1/2}$), C=0.8529 mg/g, $R^2=0.9299$
	$q_t=0.0143t^{1/2}+1.5732$ ($t^{1/2}$≈11~20.5)	$k_3=0.0143$ mg/(g·$min^{1/2}$) C=1.5732 mg/g, $R^2=0.9814$
	$q_t=0.0017t^{1/2}+1.8409$ ($t^{1/2}$>20.5)	$k_3=0.0017$mg/(g·$min^{1/2}$), C=1.8409 mg/g, $R^2=0.6466$

2.2.3　吸附等温线　吸附等温线常被用来研究目标产物在树脂上的吸附能力与温度的关系，进而确定动态吸附条件下的最适浓度[29]。测定了三种不同温度(25、35 和 45 ℃)下 CHP 在 AB-8 树脂上的平衡吸附等温线(图 4a)，并采用 Langmuir(图 4b)，Friedrich(图 4c)和 Temkin(图 4d)模型来评价吸附行为。由图可知，吸附能力随温度的升高而降低，说明高温不利于 CHP 在 AB-8 树脂上的吸附。在特定温度下，吸附能力随着初始浓度的增加而迅速增加，当浓度 > 9.10 mg/L 后逐渐趋于平缓，表明树脂位点逐渐被占据，吸附缓慢进行直至到达饱和[11]。

吸附等温线的相关参数如表 10 所示。在不同温度下，三种模型均表现出良好的相关性，Langmuir 模型的 R^2 值远高于 Friedrich 模型和 Temkin 模型，表明 CHP 在 AB-8 树脂上的吸附为单分子层吸附。q_m、K_L 和 K_F 随温度升高呈现下降趋势，表明低温下有利于吸附的进行，进而说明 CHP 在 AB-8 树脂上的吸附为放热过程。除此之外，0<1/n<0.5，表明吸附易于进行，1/n 随温度升高呈降低趋势，表明高温不利于吸附进行[29]。Hou 等[14] 也得出了相似结论：NKA-Ⅱ树脂吸附斑蝥多酚为单分子层吸附的放热过程。

2.2.4　吸附热力学　利用吸附热力学可以研究 AB-8 树脂吸附前后体系的能量变化，并通过计算热力学相关参数判断吸附过程是否可以自发进行[30]。如表 11 所示，$\Delta G < 0$ 表明吸附可自发进行，且在 25 ℃ 下平衡常数最大，表明吸附的自发性在低温下最大，低温下利于吸附进行，和吸附等温线结果一致(图 4)。$\Delta H < 0$，且$|\Delta H| < 43$ kJ/mol，表明吸附过程为物理吸

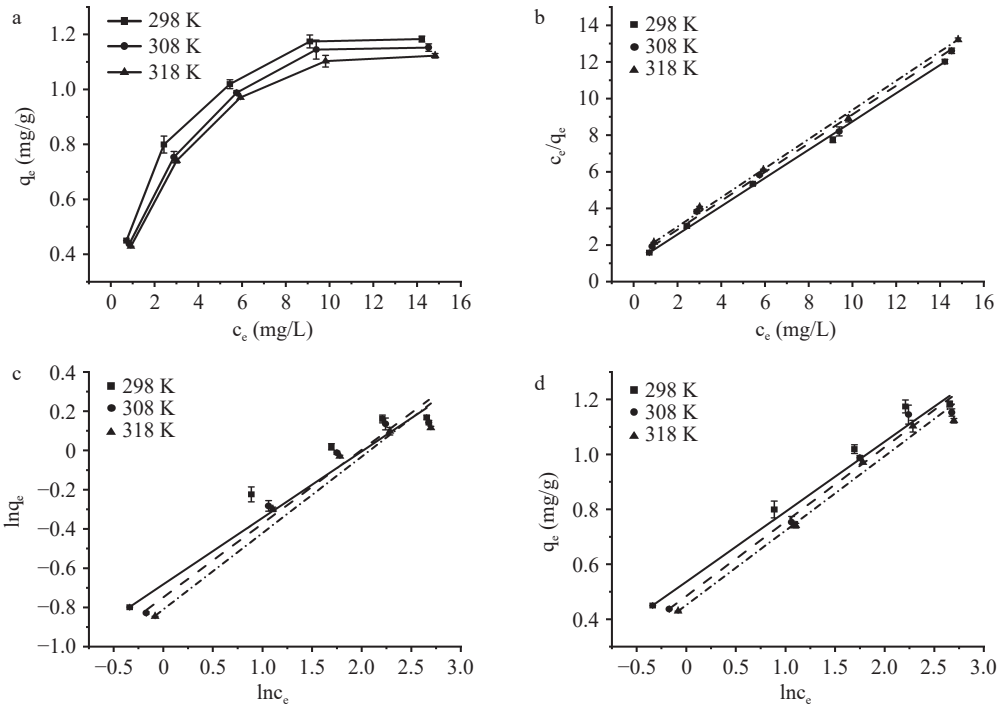


图 4 不同温度下 CHP 在 AB-8 树脂上吸附的吸附等温线(a)和基于 Langmuir(b)、Freundlich(c)和 Temkin(d)模型的线性相关性

Fig.4 Adsorption isotherms (a), and linear correlations based on the Langmuir (b), Freundlich (c), and Temkin (d) models for CHP on AB-8 resin at different temperatures

表 10 在 25、35、45 ℃ 下, CHP 在 AB-8 树脂上吸附的吸附等温线方程和参数

Table 10 Adsorption isotherms equations and parameters of CHP adsorption onto AB-8 resin at 25, 35, and 45 ℃

模型	温度(℃)	公式	参数		
			K_L (L/mg)	q_m (mg/g)	R^2
Langmuir	25	$c_e/q_e=0.7714c_e+1.0347$	0.7455	1.2964	0.9995
	35	$c_e/q_e=0.7866c_e+1.2675$	0.6206	1.2713	0.9990
	45	$c_e/q_e=0.7966c_e+1.4135$	0.5635	1.2554	0.9989
			K_F [(mg/g)·(L/mg)$^{1/n}$]	1/n	R^2
Freundlich	25	$\ln q_e=0.3389\ln c_e-0.6826$	0.5053	0.3389	0.991
	35	$\ln q_e=0.3760\ln c_e-0.7386$	0.4730	0.3760	0.9797
	45	$\ln q_e=0.3895\ln c_e-0.8103$	0.4447	0.3895	0.9842
			K_T (L/mg)	B_T (J/mol)	R^2
Temkin	25	$q_e=0.2551\ln c_e+0.5364$	8.1883	0.2551	0.9957
	35	$q_e=0.2709\ln c_e+0.4845$	5.98	0.2709	0.9951
	45	$q_e=0.2711\ln c_e+0.4517$	5.2916	0.2711	0.9946

附, 作用力为范德华力。ΔS>0 表明吸附是一个熵驱动的放热反应。

表 11 CHP 在 AB-8 树脂上吸附的热力学参数

Table 11 Thermodynamic parameters of CHP adsorption on AB-8 resin

T (℃)	K_{eq} (L/g)	ΔG (kJ/mol)	ΔH (kJ/mol)	ΔS (J/mol·K)
25	745.5^A	-16.36^A		
35	620.6^B	-16.53^A	−11.06	17.77
45	563.5^C	-16.71^A		

注: 同列不同大写字母表示数据差异显著, $P<0.05$。

2.3 基于 LC-Q-TOF/MS^2 对欧李多酚组分的鉴定

粗提液经过初步富集后, 采用 LC-Q-TOF/MS^2 对纯化液中的化合物进行鉴定。LC-MS^2 耦合色谱分离是常用于表征多酚等天然产物的工具, 可以基于前体离子和碎片离子的存在初步鉴定多酚类物质[31−32]。如表 12 所示, 负离子模式下共鉴定出 17 种多酚类化合物, 组分分子式是在考虑高精度准分子加合离子如 $[M-H]^-$ 和 $[M+COOH]^-$ 的情况下建立, 质量误差阈值为 0.0005%[7]。分子离子 m/z 289 初步

表 12 欧李多酚组分鉴定

Table 12 Compounds identified in polyphenols of *Cerasus humilis* by LC-Q-TOF/MS^2

编号	保留时间 (min)	前体离子 m/z	分子式	质量误差(ppm)	加合离子	碎片离子m/z	预测化合物
1	1.283	336.0992	$C_{20}H_{17}O_5$	−3.33	$[M-H]^-$	286.1075, 249.064	6-异戊烯基染料木素
2	1.31	191.0566	$C_7H_{12}O_6$	2.54	$[M-H]^-$	191.0552, 127.0394, 111.0086	奎宁酸
3	1.377	353.0726	$C_{12}H_{18}O_{12}$	0.14	$[M-H]^-$	173.0089	3-O-羧甲基葡萄糖
4	1.405	191.02	$C_6H_8O_7$	1.43	$[M-H]^-$	191.0185, 111.0088	柠檬酸
5	2.561	289.0663	$C_{15}H_{14}O_6$	−1.31	$[M-H]^-$	245.0467	表儿茶素

续表 12

编号	保留时间（min）	前体离子 m/z	分子式	质量误差(ppm)	加合离子	碎片离子m/z	预测化合物
6	2.617	367.0822	$C_{20}H_{16}O_7$	−0.34	$[M-H]^-$	367.0817, 173.0088	4-O-阿魏酰奎宁酸
7	2.633	379.089	$C_{14}H_{20}O_{12}$	2.11	$[M-H]^-$	191.0553	4-羟基-2-氧代庚烷二酸
8	3.813	173.0093	$C_6H_6O_6$	0.8	$[M-H]^-$	111.0088	trans-乌头酸
9	4.647	477.161	$C_{20}H_{30}O_{13}$	−0.76	$[M-H]^-$	431.1562, 269.103	异鼠李素葡萄糖
10	4.675	431.1541	$C_{19}H_{28}O_{11}$	−4.13	$[M-H]^-$	269.1021	染料木黄铜-O-葡萄糖异构体2
11	4.775	447.0928	$C_{21}H_{20}O_{10}$	−1.08	$[M-H]^-$	284.0319	山奈酚-3-O-葡萄糖苷
12	5.013	289.0725	$C_{15}H_{14}O_6$	−1.25	$[M-H]^-$	191.0569	儿茶素
13	5.217	287.0613	$C_{15}H_{14}O_7$	−0.37	$[M-H]^-$	125.0234, 137.0315	没食子儿茶素
14	6.146	353.0864	$C_{16}H_{18}O_9$	−1.48	$[M-H]^-$	191.0567	绿原酸
15	6.966	471.2081	$C_{18}H_{34}O_{11}$	−0.5	$[M+COOH]^-$	425.2018, 263.1492	unknown
16	8.212	723.502	$C_{40}H_{70}O_8$	−4.82	$[M-H]^-$	677.4955, 338.2435	unknown
17	9.013	836.5869	$C_{44}H_{85}O_{12}$	1.01	$[M-H]^-$	790.5799, 451.3305, 225.1594	unknown

确定该化合物是儿茶素类，碎片离子分别为 245 和 191，表明化合物分别为表儿茶素和儿茶素。李姝琪[33] 和赵悦等[13] 也从欧李中鉴定出了儿茶素、表儿茶素和绿原酸等物质。

2.4　欧李多酚抗氧化能力

多酚类物质的抗氧化活性通常通过其清除自由基的能力来评估，自由基具有天生不稳定，寿命短的特性，极易发生氧化反应进而干扰细胞的新陈代谢，阻碍细胞正常生长[34]。酚类化合物主要通过结构中供氢和单电子转移至自由基来达抗氧化效果[35]。V_C 为阳性对照组、CHP 的体外抗氧化活性（DPPH、$ABTS^+$自由基清除和 FRAP）如图 5 所示，即随着 CHP/V_C 浓度升高，提取物 DPPH、$ABTS^+$自由基清除活性均增加。在相同浓度下，CHP 对 $ABTS^+$ 自由基的清除能力优于 V_C。这种现象可能是因为酚类物质具有供氢的抗氧化特性[36]。SC_{50} 值越低，表明其抗氧化能力越强[37]。CHP 对 DPPH、$ABTS^+$自由基清除的 SC_{50} 值分别为 0.059 mg/mL 和 0.032 mg/mL，这些特性对活性氧具有高度反应性，并被认为是其抗氧化的基础[38]。除此之外，在相同浓度下，对 $ABTS^+$自由基的清除能力优于 DPPH。徐璐瑶等[21]、Liu 等[30] 也获得了相似的研究结果：其目标产物对

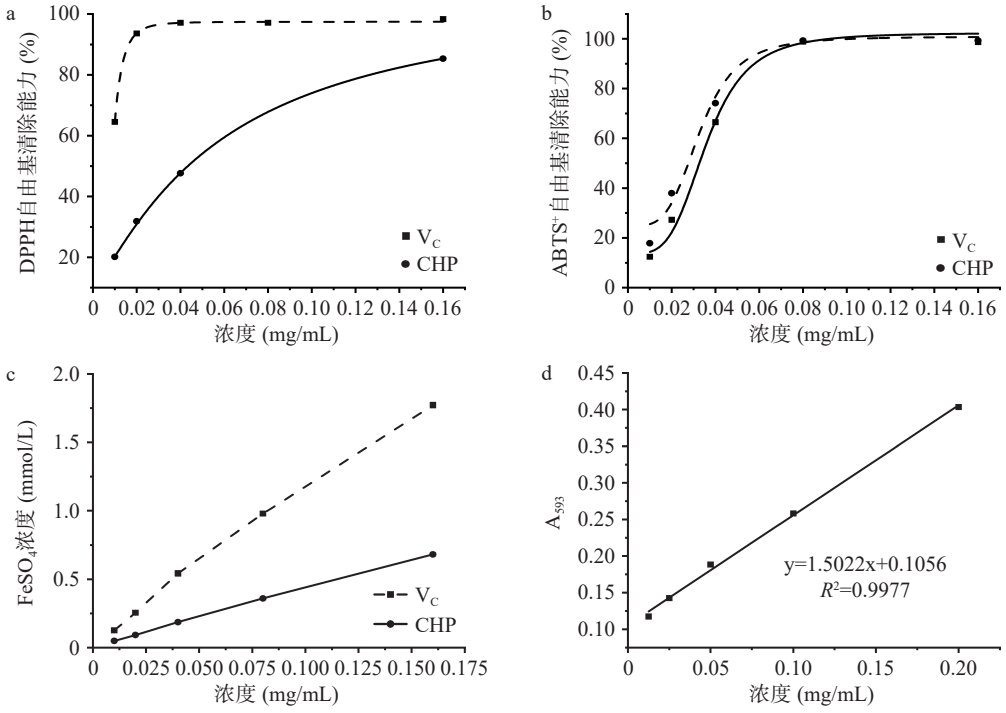


图 5　CHP 抗氧化能力

Fig.5　Antioxidant capacity of CHP

注：a. DPPH 自由基清除能力；b. $ABTS^+$自由基清除能力；c. FRAP；d. $FeSO_4$ 标准曲线。

$ABTS^+$自由基的清除能力均优于 DPPH。

3 结论

本研究通过脉冲超声辅助 NADES 提取法提取 CHP，结合单因素实验和正交试验确定了 pr-UAE-NADES 对 CHP 最佳提取工艺：CC-CIT 为最佳提取 CHP 溶剂，料液比 1∶50(g/mL)、超声功率 420 W、NADES 含水率 35%(V/V)、脉冲超声时间提取 30 min，此最优条件下 CHP 提取量为 491.25 mg/100 g DW，优于传统提取方法($P<0.05$)，为 CHP 确定了一种更为绿色高效的提取方法。AB-8 被筛选为富集 CHP 的最优树脂，二级动力学模型($R^2=0.9997$)最适合描述其吸附过程；等温线实验表明 CHP 在 AB-8 上的吸附方式为单分子层吸附，且整个过程为熵驱动的放热过程。经 $LC\text{-}MS^2$ 鉴定出包括绿原酸、儿茶素和表儿茶素在内的 17 种多酚类化合物。抗氧化能力测试表明，CHP 对 DPPH、$ABTS^+$自由基均具有良好的清除活性和较强的还原能力。本研究为 CHP 的绿色和高效制备提供了实验基础，还展示了其在食品和药物领域的应用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] JI W M, CHEN F, CHEN Z Q, et al. Research in advances in the bioactivity of plant polyphenols[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(11): 8037−8044.

[2] FU X Z, WANG D, BELWAL T, et al. Natural deep eutectic solvent enhanced pulse-ultrasonication assisted extraction as a multi-stability protective and efficient green strategy to extract anthocyanin from blueberry pomace[J]. LWT, 2021, 144: 1−12.

[3] ZHANG Y S, GU J R, WANG Y, et al. The anti-tumor activity and critical active compounds of polyphenols from Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis*)[J]. Journal of Berry Research, 2023, 13(3): 211−225.

[4] CHEW S C, HOW Y H, HASAN Z A B A, et al. Recovery of bioactive compounds from oil palm waste using green extraction techniques and its applications[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(11): 8101−8113.

[5] SZOPA D, WRóBEL P, WITEK-KROWIAK A. Enhancing polyphenol extraction efficiency: A systematic review on the optimization strategies with natural deep eutectic solvents[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 404: 1−27.

[6] UKA D, KUKRIĆ T, KRSTONOŠIĆ V, et al. NADES systems comprising choline chloride and polyphenols: Physicochemical characterization, antioxidant and antimicrobial activities[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 410: 1−9.

[7] 甘宇鑫. 栀子主要有效成分提取及抑制低密度脂蛋白氧化机制的研究[D]. 天津: 天津农学院, 2024. [GAN Y X. Research on the extraction of main effective components from *Gardenia jasminoides* and the mechanism of inhibiting low density lipoprotein Oxidation[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2024.]

[8] RASHID R, WANI S M, MANZOOR S, et al. Green extraction of bioactive compounds from apple pomace by ultrasound assisted natural deep eutectic solvent extraction: Optimisation, comparison and bioactivity[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 1−11.

[9] 恽含, 于溪, 李芳菲, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取黑玉米芯多糖及其抑制 α-糖苷酶活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 153−162. [YUN H, YU X, LI F F, et al. Ultrasonic assisted extraction of polysaccharides from black corn cob using low melting point solvents and analysis of their inhibition of alpha glucosidase activity[J]. Food Industry Technology, 2025, 46(14): 153−162.]

[10] MOHAMMAD S S, RODRIGUES N D R, BARBOSA M I M J, et al. Useful separation and purification of anthocyanin compounds from grape skin pomace Alicante Bouschet using macroporous resins[J]. Journal of the Iranian Chemical Society, 2022, 20(4): 875−883.

[11] LI W F, YAN S K, FU X Q, et al. Adsorption and desorption behaviors on microporous resins of antioxidant and anti-proliferation polyphenols from European plum[J]. Food Research International, 2025, 199: 1−11.

[12] LIU X Y, YAN S, ZHOU H, et al. Separation and purification of glabridin from a deep eutectic solvent extract of *Glycyrrhiza glabra* residue by macroporous resin and its mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 315: 1−10.

[13] 赵悦, 褚天旭, 高哲, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取欧李花青素工艺优化及其生物活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 218−232. [ZHAO Y, CHU T X, GAO Z, et al. Optimization of ultrasonic assisted low melting solvent extraction process and biological activity of *Cerasus humilis* anthocyanins[J]. Food Industry Technology, 2025, 46(13): 218−232.]

[14] HOU M Y, ZHANG L B. Adsorption/desorption characteristics and chromatographic purification of polyphenols from *Vernonia patula* (Dryand.) Merr. using macroporous adsorption resin[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170: 1−9.

[15] WU Q, YUAN R Y, FENG C Y, et al. Analysis of polyphenols composition and antioxidant activity assessment of Chinese dwarf cherry (*Cerasus humilis* (Bge.) Sok.)[J]. Natural Product Communications, 2019, 14(6): 1−10.

[16] FU H B, QIAO Y J, WANG P F, et al. Changes of bioactive components and antioxidant potential during fruit development of *Prunus humilis* Bunge[J]. PLoS One, 2021, 16(5): 1−15.

[17] LÜ J, XU X X, GONG J X, et al. Extraction of polyphenols from Apocynum venetum leaves using customized deep eutectic solvents: Process optimization and antioxidant evaluation[J]. Process Biochemistry, 2024, 147: 305−317.

[18] 王晨雨, 陈成诚, 王月霞, 等. 基于多光谱技术对原儿茶酸抑制低密度脂蛋白氧化及其与牛血清白蛋白相互作用的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(6): 1762−1772. [WANG C Y, CHEN C C, WANG Y X, et al. Study on the inhibition of low-density lipoprotein oxidation by protocatechuic acid and its interaction with bovine serum albumin based on multispectral technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(6): 1762−1772.]

[19] SUN P C, YANG W T, SUN T R, et al. Effects of ultrasonic-assisted natural deep eutectic solvent on the extraction rate, stability and antifungal ability of polyphenols from Cabernet Sauvignon seeds[J]. Food Research International, 2024, 191: 1−12.

[20] KUMAR K, SRIVASTAV S, SHARANAGAT V S. Ultrasound assisted extraction (UAE) of bioactive compounds from fruit and vegetable processing by-products: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 1−11.

[21] 徐璐瑶, 赵洋, 王艳, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取玫瑰茄黄

铜工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2025，46(16)：260−271. [XU L Y, ZHAO Y, WANG Y, et al. Optimization of ultrasonic assisted low melting solvent extraction process for rose solanum brass and analysis of its antioxidant activity[J]. Food Industry Technology, 2025, 46(16): 260−271.]

[22] KAOUI S, CHEBLI B, ZAIDOUNI S, et al. Deep eutectic solvents as sustainable extraction media for plants and food samples: A review[J]. Sustainable Chemistry and Pharmacy, 2023, 31: 1−16.

[23] 张晓冰，张羽师，王雨，等. 欧李果渣原花青素提取工艺优化其体外抗氧化和降糖活性评价[J]. 食品工业科技，2024，45(1)：178−184. [ZHANG X B, ZHANG Y S, WANG Y, et al. Optimization of proanthocyanidin extraction from *Cerasus humilis* pomace and evaluation of its *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 178−184.]

[24] LIAO M H, JIN R T, REN H W, et al. Orthogonal experimental design for the optimization of four additives in a model liquid infant formula to improve its thermal stability[J]. LWT, 2022, 163: 1−8.

[25] HAN L, LI R J, JIN X Y, et al. Metabolomic analysis, extraction, purification and stability of the anthocyanins from colored potatoes[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 1−12.

[26] PAUL A, DUTTA A, KUNDU A, et al. Resin Assisted Purification of anthocyanins and their encapsulation[J]. Journal of Chemical Education, 2023, 100(2): 885−892.

[27] MENG Y, SUI X Y, PAN X, et al. An integrated process by ultrasonic enhancement in the deep eutectic solvents system for extraction and separation of chlorogenic acid from *Eucommia ulmoides* leaves[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 1−11.

[28] WANG Y B, ZHANG Y L, CHENG J W, et al. Efficient purification of flavonoids from bamboo shoot residues of *Phyllostachys edulis* by macroporous resin and their hypoglycemic activity[J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 1−10.

[29] 刘皓涵，钟迪颖，张润光，等. 欧李多酚提取纯化及抗氧化性研究[J]. 农业工程学报，2020，36(22)：325−332. [LIU H H, ZHONG D Y, ZHANG R G, et al. Extraction and purification of polyphenols from *Cerasus humilis* and study on their antioxidant properties[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 325−332.]

[30] LIU S W, LI X Y, GUO Z Y, et al. Polyphenol content, physicochemical properties, enzymatic activity, anthocyanin profiles, and antioxidant capacity of *Cerasus humilis* (Bge.) Sok. genotypes[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1−13.

[31] SAHA S, SINGH J, PAUL A, et al. Anthocyanin profiling using UV-Vis spectroscopy and liquid chromatography mass spectrometry[J]. Journal of AOAC International, 2020, 103(1): 23−39.

[32] GAN Y X, WANG C Y, XU C F, et al. Simultaneous extraction of crocin and geniposide from gardenia fruits (*Gardenia jasminoides* Ellis) by probe-type ultrasound-assisted natural deep eutectic solvents and their inhibition effects on low density lipoprotein oxidation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 1−14.

[33] 李姝琪. 欧李主要多酚物质成分分析及原花青素对马铃薯淀粉消化抑制作用研究[D]. 银川：宁夏大学，2021. [LI S Q. Analysis of the main polyphenolic components in *Cerasus humilis* and study on the inhibitory effect of anthocyanins on potato starch digestion [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.]

[34] FU H B, MU X P, WANG P F, et al. Fruit quality and antioxidant potential of Prunus humilis Bunge accessions[J]. PLoS One, 2020, 1(12): 1−19.

[35] FOROUTANI Z, MOGADDAM M R A, GHASEMPOUR Z, et al. Application of deep eutectic solvents in the extraction of anthocyanins: Stability, bioavailability, and antioxidant property[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 1−44.

[36] 张洁，李东方. 郭金丽. 不同果肉颜色欧李果实酚类物质的变化及其抗氧化活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2024，52(3)：95−104. [ZHANG J, LI D F, GUO J L. Study on the changes and antioxidant activity of phenolic compounds in *Cerasus humilis* fruits with different flesh colors[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2024, 52(3): 95−104.]

[37] WU H, ZHAO W R, ZHOU J J, et al. Extraction, analysis of antioxidant activities and structural characteristics of flavonoids in fruits of *Diospyros lotus* L.[J]. LWT, 2024, 201: 1−10.

[38] SINGH M C, KELSO C, PRICE W E, et al. Validated liquid chromatography separation methods for identification and quantification of anthocyanins in fruit and vegetables: A systematic review[J]. Food Research International, 2020, 138: 1−12.