

# 芒果核仁多酚提取纯化工艺优化及体外抗氧化性能分析

何玲玲<sup>1,2,3</sup> 胡秦佳宝<sup>1,2,3</sup> 黄斌<sup>1,2,3</sup> 罗旭<sup>1,2,3</sup> 李云鑫<sup>1,2,3</sup> 麦馨允<sup>1,2,3</sup>

(1. 百色学院, 广西 百色 533000; 2. 百色学院亚热带特色农业产业学院, 广西 百色 533000;  
3. 百色学院广西芒果生物学重点实验室, 广西 百色 533000)

**摘要:** [目的] 研究芒果核仁多酚的提取纯化工艺及抗氧化性能。[方法] 采用正交试验优化芒果核仁粗多酚提取工艺及大孔树脂柱层析法进一步分离纯化芒果核仁多酚提取物, 以维生素 C 为对照考察纯化前后芒果核仁多酚的抗氧化活性。[结果] 芒果核仁多酚的最佳提取工艺为料液比 1:40 (g/mL), 50% 乙醇, 浸提温度 65 °C, 提取时间 70 min, 该条件下多酚含量为 9.93 mg/g; LX-17 吸附—解吸效果最好, 静态吸附和解吸平衡时间为 2.5 h; 动态吸附—解吸条件为上样液浓度 300 μg/mL, 体积 40 mL, 流速 3 mL/min; 洗脱剂乙醇体积分数 50%, 320 mL, 流速 2 mL/min。此条件下芒果核仁多酚含量从 9.93 mg/g 提高到 35.68 mg/g。纯化后芒果核仁多酚对 DPPH 自由基、ABTS 自由基、羟自由基、O<sub>2</sub><sup>·</sup>自由基和 Fe<sup>3+</sup>还原力均有显著性增加, IC<sub>50</sub> 值分别为 19.25, 0.02, 106.90, 464.00 μg/mL。[结论] 芒果核仁多酚具有良好的抗氧化活性。

**关键词:** 芒果核仁多酚; 提取纯化; 大孔吸附树脂; 抗氧化性

## Extraction and purification process optimization of mango kernel polyphenols and their antioxidant activity *in vitro*

HE Lingling<sup>1,2,3</sup> HU Qinjiabao<sup>1,2,3</sup> HUANG Bin<sup>1,2,3</sup> LUO Xu<sup>1,2,3</sup> LI Yunxin<sup>1,2,3</sup> MAI Xinyun<sup>1,2,3</sup>

(1. Baise University, Baise, Guangxi 533000, China; 2. Industrial College of Subtropical Characteristic Agriculture, Baise University, Baise, Guangxi 533000, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Biology for Mango, Baise University, Baise, Guangxi 533000, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the extraction and purification process and antioxidant activity of mango kernel polyphenols. [Methods] The extraction process of mango kernel crude polyphenols is optimized by the orthogonal experiment. Mango kernel polyphenol extract is further separated and purified by the macroporous adsorption resin. Meanwhile, the antioxidant activities of mango kernel polyphenols before and after purification are analyzed with Vc as the control. [Results] The optimal process extraction for mango kernel polyphenols is a solid-liquid ratio of 1:40 (g/mL), 50% ethanol, an extraction temperature of 60 °C, and an extraction time of 70 min. Under these conditions, the polyphenol yield is 9.93 mg/g. The LX-17 resin has the best adsorption-desorption effect, with a static adsorption and desorption equilibrium time of 2.5 h. Dynamic adsorption-desorption conditions are as follows: sample solution with a concentration of 300 μg/mL, a volume of 40 mL, a flow rate of 3 mL/min, and elution with 50% ethanol, a volume of 320 mL, and a flow rate of 3 mL/min. Under these conditions, the mango kernel polyphenol purity is increased from 9.93 mg/g to 35.68 mg/g. *In vitro* reducing power of mango kernel polyphenols on DPPH, ABTS, OH, and O<sub>2</sub><sup>·</sup> free radicals, as well as Fe<sup>3+</sup> is significantly increased after purification, and the IC<sub>50</sub> is 19.25, 0.02, 106.90, 464.00 μg/mL, respectively. [Conclusion] The mango kernel polyphenols are ideal in antioxidant activity.

**基金项目:** 广西高校中青年教师科研能力提升项目(编号:2023KY0764, 2023KY0765); 第一批百色市科学研究与技术开发计划自筹经费项目(编号:百科 20241550); 广西一流学科建设项目资助(编号:桂教科研[2022]1号)

**通信作者:** 麦馨允(1987—), 女, 百色学院副教授, 硕士。E-mail:39964837@qq.com

**收稿日期:** 2024-11-21 **改回日期:** 2025-08-14

**引用格式:** 何玲玲, 胡秦佳宝, 黄斌, 等. 芒果核仁多酚提取纯化工艺优化及体外抗氧化性能分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 161-169.

**Citation:** HE Lingling, HU Qinjiabao, HUANG Bin, et al. Extraction and purification process optimization of mango kernel polyphenols and their antioxidant activity *in vitro*[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 161-169.

**Keywords:** mango kernel polyphenol; extraction and purification; macroporous adsorption resin; antioxidant activity

芒果(*Mangifera indica* L.)属漆树科植物,因其独特芳香和口感滑嫩备受消费者喜爱,被誉为“热带果王”。据统计<sup>[1-2]</sup>,芒果的总产量全球排名第五,全球热带水果贸易量排名第二。在芒果鲜食或加工后,会产生大量的芒果果皮、芒果果核等副产物,这些副产物主要作为废弃物直接丢弃,会污染周围环境并造成资源浪费。芒果果核含有大量碳水化合物(53.34%~76.81%)、蛋白质(5.20%~10.48%)、油脂(9.84%~18.00%)、粗纤维(0.26%~10.60%)以及一些生物活性物质,如没食子酸及其衍生物、鞣花酸、黄酮及其衍生物、单宁酸等多酚类物质<sup>[3-5]</sup>,具有良好的抗氧化活性<sup>[4-6]</sup>、抑菌活性<sup>[6]</sup>、抗糖尿病、抗过敏、抗衰老、抗过敏<sup>[5-6]</sup>等特性,并具有心脏防御和神经保护<sup>[7-9]</sup>等功效。

目前,常见的芒果核仁多酚提取方法主要为溶剂浸提法,其提取率不足8%<sup>[10-13]</sup>,而采用新技术如微波或超声辅助浸提法其提取率可提升至13%左右<sup>[14-15]</sup>。有关芒果核仁多酚提取后进一步纯化的研究甚少,其粗提后可采用AB-8纯化<sup>[16-17]</sup>、SephadexLH-20凝胶<sup>[16]</sup>及薄层层析色谱法(TLC)<sup>[17]</sup>进一步纯化分级多酚类物质。根据极性不同,大孔树脂可针对不同类型的溶剂和提取物进行吸附,吸附性好且绿色可再生,被广泛应用于天然产物分离纯化<sup>[18]</sup>。而关于不同极性大孔树脂对于芒果核仁多酚吸附性能的影响研究尚未见报道。试验拟采用超声辅助乙醇浸提芒果核仁粗多酚,筛选不同极性大孔树脂进一步纯化,优化芒果核仁多酚提取纯化工艺,并以维生素C(V<sub>c</sub>)为对照,评估纯化前后芒果核仁多酚的抗氧化活性,为芒果核的开发利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

新鲜凯特芒果果核:产地四川攀枝花,市售;没食子酸、福林酚、无水乙醇、硫酸亚铁、盐酸、氢氧化钠、碳酸钠、水杨酸、双氧水、铁氰化钾、三氯乙酸、邻苯三酚、甲醇、乙酸乙酯、氯仿、丙酮、冰乙酸、V<sub>c</sub>:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;DPPH、ABTS标准品:西格玛生物科技有限公司;非极性大孔树脂(X-15、D-101、NKA)、中极性大孔树脂(LX-158、LX-17、LX-8)、极性大孔树脂(NKA-9、AB-8):郑州和成新材料有限公司;数显电子恒温水浴锅:HH-4型,常州国华仪器制造有限公司;摇床:SHZ-82型,金坛市医疗仪器厂;智能高速冷冻离心机:3H20RI型,湖南赫西仪器装备有限公司;

粉碎机:RSS-1022型,上海亚荣生化仪器厂;

真空干燥箱:XMTD-8222型,上海精宏设备有限公司;

旋转蒸发仪:RE3000A型,上海亚荣生化仪器厂;

低温超声波萃取仪:HN-CQY型,上海汉诺仪器有限公司;

紫外可见光分光光度计:UV-1800型,广西德尔菲仪器设备有限公司;

分析天平:FA2204型,上海市安亭仪器厂;

真空冷冻干燥机:FD5-2.5E型,广西超谱仪器有限公司。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 样品预处理** 选取带坚硬果壳的芒果核,清洗表面杂质,剔除果壳,取芒果核仁,切成3~4 mm厚薄片,真空度-0.1 MPa,(45±5)℃真空干燥24 h,粉碎,过40目筛,用自封袋保存于干燥器中备用。

**1.2.2 芒果核仁粗多酚提取工艺优化** 根据高云涛等<sup>[11]</sup>和郑斌等<sup>[19]</sup>的方法略有修改。考察料液比[1:30,1:40,1:50,1:60,1:70(g/mL)]、浸提温度(40,50,60,70,80℃)、浸提时间(50,70,90,110,130 min)和乙醇体积分数(30%,40%,50%,60%,70%)对多酚提取率的影响。固定料液比1:40(g/mL),乙醇体积分数60%,超声功率百分比20%,超声时间30 min,超声样液外侧置于冰浴预防超声温度过高提取物活性降低,70℃恒温摇床,振荡转速150 r/min,浸提70 min,冷却至室温,离心(6 000 r/nim,4℃,20 min),上清液于旋转蒸发仪(温度40℃,转速150 r/min)浓缩至1/5体积,测定浓缩液中芒果核仁粗多酚含量,真空干燥机冻干,自封袋中贮藏于干燥器备用。采用SPSS软件进行方差分析<sup>[20]</sup>。

**1.2.3 芒果核仁多酚含量测定** 准确量取不同浓度没食子酸标准溶液或待测溶液2.0 mL,加入1.0 mL福林酚试剂,混匀,静置2 min,加入10 mL 7% NaCO<sub>3</sub>,定容至50 mL,30℃摇床1 h,测定A<sub>765 nm</sub>,以蒸馏水为参比,计算1 g样品中多酚含量(以没食子酸计,mg/g)<sup>[13]</sup>。没食子酸标准曲线回归方程y=9.485 7x-0.066,R<sup>2</sup>=0.999 1。

**1.2.4 大孔树脂筛选** 根据吴婕等<sup>[21]</sup>的方法进行筛选,解吸量和解吸率计算参照何袅袅等<sup>[22]</sup>的方法。

**1.2.5 吸附等温线** 参照李晓洁等<sup>[23]</sup>的方法。

**1.2.6 静态吸附—解吸力学分析** 参照李晓洁等<sup>[23]</sup>的方法进行吸附—解吸力学分析,力学模型拟合参照Bai等<sup>[24]</sup>的方法。

**1.2.7 动态吸附—解吸试验**

(1) 动态吸附试验:参照何袅袅等<sup>[22]</sup>的方法。芒果核仁粗多酚上样质量浓度300 μg/mL,上样体积为450 mL,

上样流速 3 mL/min, 考察样品质量浓度 (100, 200, 300, 400, 500  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) 和上样流速 (2, 3, 4 mL/min) 对吸附量的影响。流出液每 10 mL 收集成一管, 测定多酚含量, 考察上样体积对大孔吸附树脂吸附量的影响。

(2) 动态解吸试验: 参照郑斌等<sup>[19]</sup>的方法。以乙醇作为洗脱溶剂, 考察乙醇体积分数 (30%, 40%, 50%, 60%, 70%) 和洗脱剂流速 (2, 3, 4 mL/min) 对解吸率的影响。用 350 mL 体积分数为 50% 乙醇溶液进行洗脱, 流出液每 10 mL 收集成一管, 考察洗脱剂体积对解吸能力的影响。

### 1.2.8 芒果核仁多酚的抗氧化活性

(1) DPPH 自由基清除能力测定: 参照张慧慧等<sup>[25]</sup>的方法。按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$R_1 = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$R_1$ ——自由基清除率, %;

$A_0$ ——75% 乙醇代替芒果核多酚提取物溶液吸光度;

$A_1$ ——芒果核多酚提取物溶液测定的吸光度;

$A_2$ ——空白组吸光度。

(2) ABTS 自由基清除能力测定: 参照李游<sup>[26]</sup>的方法。按式(1)计算 ABTS 自由基清除率。

(3) 羟自由基清除能力测定: 参照李晓洁等<sup>[23]</sup>的方法。按式(2)计算羟自由基清除率。

$$R_2 = \frac{A_0 - A_i + A_j}{A_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$R_2$ ——羟自由基清除率, %;

$A_0$ ——蒸馏水代替样品测定吸光值;

$A_i$ ——芒果核多酚提取物溶液测定的吸光值;

$A_j$ ——蒸馏水代替水杨酸溶液测定吸光值。

(4)  $\text{O}_2^-$  自由基清除能力测定: 参照 Tang 等<sup>[27]</sup>的方法。按式(3)计算  $\text{O}_2^-$  自由基清除率。

$$R_2 = \frac{\Delta A_0 - \Delta A_{\text{样}}}{\Delta A_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$R_2$ —— $\text{O}_2^-$  自由基清除率, %;

$\Delta A_0$ ——用 Tris-HCl 溶液代替多酚溶液测定的吸光值随时间变化的斜率;

$\Delta A_{\text{样}}$ ——芒果核多酚提取物溶液测定的吸光值随时间变化的斜率。

(5)  $\text{Fe}^{3+}$  还原力测定: 参照李游<sup>[26]</sup>的方法。

### 1.3 数据分析

所有试验平行 3 次, 结果以平均值表示, 采用 Origin 2018 软件绘制图表, 采用 Excel、SPSS 软件进行数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

由图 1(a)可知, 当料液比为 1:30~1:50 (g/mL) 时, 多酚含量增加, 当料液比  $> 1:50$  (g/mL) 时, 多酚含量下降。随着料液比的增加, 溶剂量增多, 能够更加充分溶解芒果核仁中多酚, 提取率增加。进一步增加溶剂, 已浸提出的多酚会对未浸提出的多酚逸出产生阻力, 不利于乙醇渗透, 细胞内部渗透压降低, 不利于多酚含量提高<sup>[15,28]</sup>。因此, 选取料液比为 1:50 (g/mL) 进行后续试验。

由图 1(b)可知, 当浸提温度为 40~60 °C 时, 多酚含量增加, 当浸提温度  $> 60$  °C 时, 多酚含量下降。一般来讲, 升高浸提温度会增加提取溶剂渗透及扩散能力, 增强化合物的解吸速率。但过高的浸提温度可能导致生物活性物质变性, 分解或氧化降解<sup>[29]</sup>。因此, 选取浸提温度 60 °C 进行后续试验。

由图 1(c)可知, 当浸提时间为 50~70 min 时, 多酚含量增加, 当浸提时间  $> 70$  min 时, 多酚含量下降。超声波在较短的时间内有利于目标化合物的溶出, 芒果核仁多酚含量随着浸提时间的延长而增加。随着浸提时间的延长, 多酚类物质长时间暴露于超声环境中, 稳定性降低容易发生降解<sup>[30]</sup>。因此, 选取浸提时间 70 min 进行后续试验。

由图 1(d)可知, 当乙醇体积分数为 30%~50% 时, 多酚含量增加, 当乙醇体积分数  $> 50\%$  时, 多酚含量下降, 与 Lim 等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。因此, 选取乙醇体积分数 50% 进行后续试验。

### 2.2 正交试验

根据单因素试验结果, 以料液比、浸提温度、浸提时间和乙醇体积分数为因素, 以多酚含量为指标进行四因素三水平正交试验优化芒果核仁粗多酚提取工艺。正交试验因素水平见表 1, 试验设计及结果见表 2, 方差分析见表 3。

由表 2 可知, 影响芒果核仁多酚含量的因素顺序为料液比  $>$  浸提温度  $>$  乙醇体积分数  $>$  浸提时间, 根据各因素所对应的  $k$  值得到最优水平为  $A_1B_2C_2D_2$ , 即料液比 1:40 (g/mL), 浸提温度 65 °C, 浸提时间 70 min, 乙醇体积分数 50%, 此时芒果核仁多酚含量为  $(9.93 \pm 0.07)$  mg/g。由表 3 可知, 料液比、浸提温度、浸提时间和乙醇体积分数均为影响芒果核仁多酚含量的关键性因素。

### 2.3 大孔吸附树脂筛选

由表 4 可知, 不同型号大孔吸附树脂对芒果核仁多酚吸附—解吸能力差异较大, AB-8, NKA-9, LX-8, LX-17 4 种树脂的吸附率分别为 86.93%, 89.81%, 87.17%, 91.51%, 均具有较高的吸附率, 这是由于芒果核仁多酚类物质主要为酚酸、酚酸糖苷、黄酮及黄酮糖苷<sup>[13]</sup>, 极性和

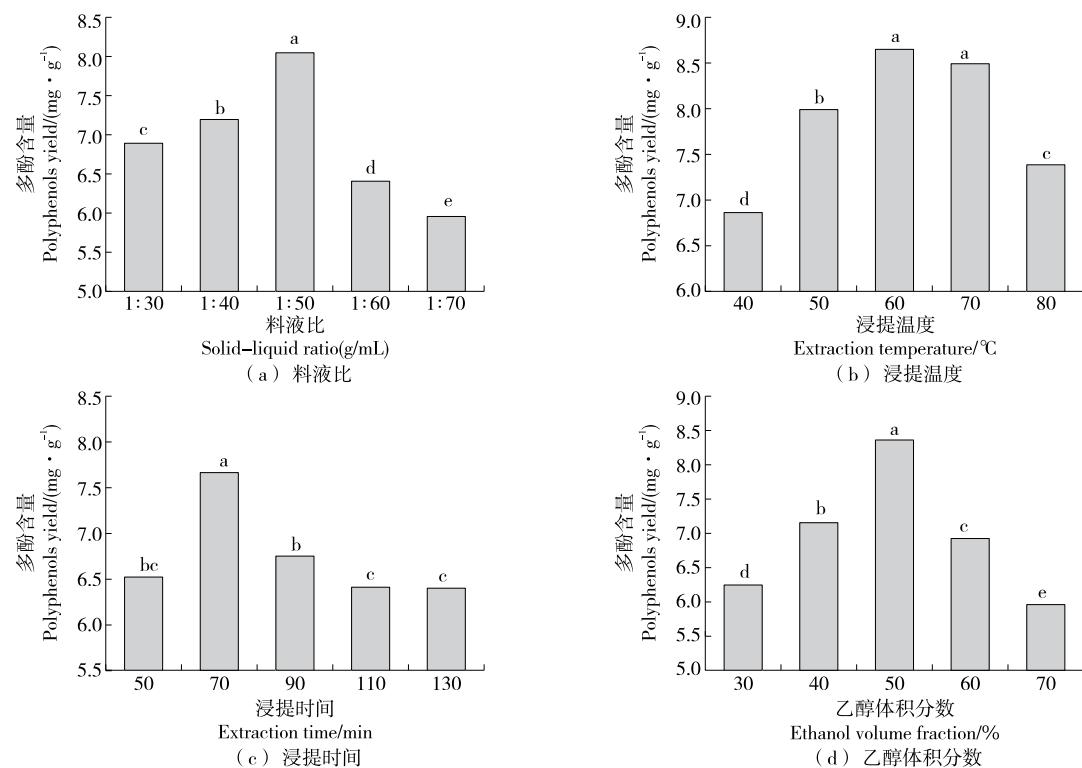


图 1 各因素对芒果核仁多酚含量的影响

Figure 1 Effect of each variable on mango kernel polyphenol yield

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	A 料液比 (g/mL)	B 浸提温 度/℃	C 浸提时 间/min	D 乙醇体积 分数/%
1	1:40	60	60	40
2	1:50	65	70	50
3	1:60	70	80	60

亲水性作用较强,更易被极性的树脂吸附。其中 LX-17 的解吸率可达 86.65%,明显高于 LX-8、NKA-9 和 S-8 的,可能是解吸率大小取决于被吸附目标物与树脂的结合能力强弱<sup>[23]</sup>,LX-8、NKA-9 和 AB-8 树脂极性较强,对芒果核仁多酚吸附能力强,导致洗脱剂难以解吸。综合考虑,选用 LX-17 进行后续静态—动态吸附试验。

#### 2.4 吸附等温线

由图 2 可知,随着芒果核仁粗多酚质量浓度的增加,树脂达到吸附平衡时吸附量越高,表明芒果核仁多酚的吸附为放热过程,降低温度利于大孔树脂吸附<sup>[26]</sup>。通过 Langmuir 与 Freundlich 吸附等温线拟合方程,结果见表 3 和表 4,在 25 ℃时,Langmuir 和 Freundlich 拟合方程的  $R^2$  分别为 0.992 2,0.986 4,且 Langmuir 方程的  $R^2$  更大,说明在 100~300  $\mu\text{g}/\text{mL}$  质量浓度范围内,LX-17 树脂对芒果核

表 2 正交试验设计及结果

Table 2 Design and results of orthogonal experiment

试验号	A	B	C	D	多酚含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )
1	1	1	1	1	8.60±0.14
2	1	2	2	2	9.93±0.07
3	1	3	3	3	7.20±0.06
4	2	1	2	3	7.04±0.05
5	2	2	3	1	8.08±0.06
6	2	3	1	2	7.31±0.07
7	3	1	3	2	8.24±0.09
8	3	2	1	3	8.39±0.05
9	3	3	2	1	8.70±0.06
$k_1$	8.58	7.96	8.10	8.46	
$k_2$	7.48	8.80	8.56	8.49	
$k_3$	8.44	7.74	7.84	7.54	
$R$	1.10	1.07	0.71	0.95	

仁多酚的吸附情况更匹配 Langmuir 吸附模型。

#### 2.5 静态吸附和解吸动力学曲线

25 ℃下,LX-17 树脂的静态吸附—解吸动力学曲线如图 3 所示,随着吸附或解吸时间的延长,在 30~60 min 内增

表3 方差分析结果<sup>†</sup>  
Table 3 Analysis of variance results

来源	III类平方和	自由度	均方	F值	显著性
修正模型	19.796 <sup>a</sup>	8	2.475	417.836	*
截距	1 800.913	1	1 800.913	304 094.185	*
A	6.517	2	3.258	550.211	*
B	5.688	2	2.844	480.226	*
C	2.354	2	1.177	198.714	*
D	5.238	2	2.619	442.196	*
误差	0.107	18	0.006		
总计	1 820.816	27			
修正后总计	19.903	26			

<sup>†</sup> a 表示试验次数; \* 表示差异显著 ( $P < 0.05$ );  $R^2 = 0.995$ ,  $R_{\text{Adj}}^2 = 0.992$ 。

表4 8种大孔吸附树脂吸附和解吸效果  
Table 4 Adsorption and desorption effects of 8 macroporous adsorption resins

树脂种类	吸附量/(mg·g <sup>-1</sup> )	吸附率/%	解吸量/(mg·g <sup>-1</sup> )	解吸率/%
X-15	2.54	52.18	2.50	79.86
NKA	2.12	44.10	1.48	55.84
NKA-9	5.38	89.81	4.14	76.79
D101	1.77	36.82	1.35	61.13
LX-8	5.24	87.17	4.19	80.21
AB-8	5.21	86.93	3.88	74.41
LX-158	4.38	73.07	3.47	79.28
LX-17	5.50	91.51	4.76	86.65

表5 不同温度下的 Langmuir 模型拟合参数  
Table 5 Fitting parameters of Langmuir model at different temperatures

温度/℃	Langmuir方程	$K_L$	$q_{\text{max}}$	$R^2$
25	$Ce/q_e = 0.0677Ce + 0.0026$	1.779	14.78	0.9922
35	$Ce/q_e = 0.0628Ce + 0.035$	1.796	15.90	0.9884
45	$Ce/q_e = 0.0589Ce + 0.020$	2.500	16.96	0.9851

表6 不同温度下的 Freundlich 模型拟合参数  
Table 6 Fitting parameters of Freundlich model at different temperatures

温度/℃	Freundlich方程	$K_L$	$1/n$	$R^2$
25	$\ln q_e = 0.6690 \ln Ce - 1.931$	0.09	0.6690	0.9864
35	$\ln q_e = 0.6991 \ln Ce - 2.123$	0.08	0.6991	0.9584
45	$\ln q_e = 0.7251 \ln Ce - 2.210$	0.07	0.7251	0.9816

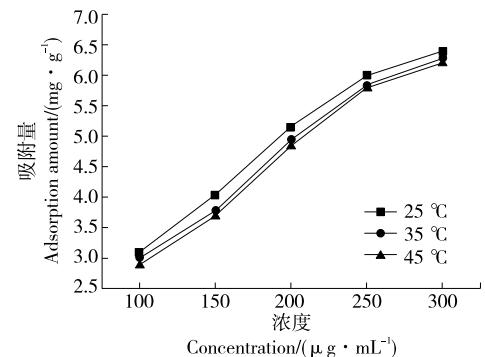


图2 LX-17树脂的吸附等温线  
Figure 2 Adsorption isotherms of LX-17 resin

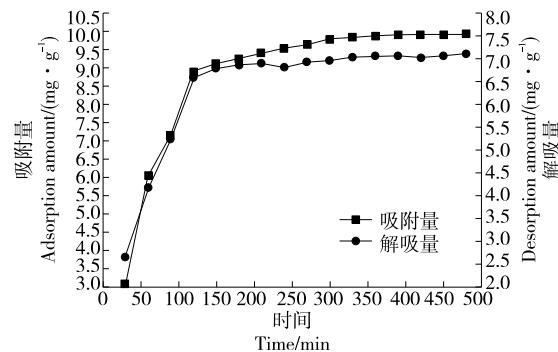


图3 LX-17树脂静态吸附—解吸动力曲线  
Figure 3 Static adsorption-desorption kinetic curves of LX-17 resin

表7 吸附动力学模型拟合参数  
Table 7 Fitting parameters of adsorption kinetic models

拟合模型	拟合方程	$q_e$	$k$	$R^2$
一级动力学	$\ln(q_e - q_i) = -0.015t + 2.29$	9.92	0.015	0.9835
二级动力学	$t/q_i = 0.091t + 4.093$	10.98	0.002	0.9938

长速率最快, 60~150 min 内增长速率变缓, 150~300 min 增长速率趋于一条直线, LX-17 静态吸附和解吸平衡时间为 2.5 h。由表 6 可知, 二级动力学模型的决定系数最大, 为 0.9938, 表明 LX-17 树脂对芒果核仁多酚的吸附过程与二级动力学模型更吻合。

## 2.6 动态吸附和解吸试验

由图 4(a)可知, 随着上样体积的增加, 流出液多酚质量浓度逐渐增加, 当上样体积为 0~150 mL 时, 多酚质量浓度增长速率增大; 当上样体积为 150~250 mL 时, 多酚质量浓度增长速率减缓; 继续增加上样体积, 流出液多酚质量浓度增长速率趋于一条直线。流出液多酚质量浓度达到初始质量浓度的 10% 时为泄漏点<sup>[22]</sup>。吸附流速不同, 扩散速度不同, 泄漏点也不同。当上样流速分别为 2, 3, 4 mL/min 时, 芒果核仁粗多酚泄漏点分别为 50, 20,

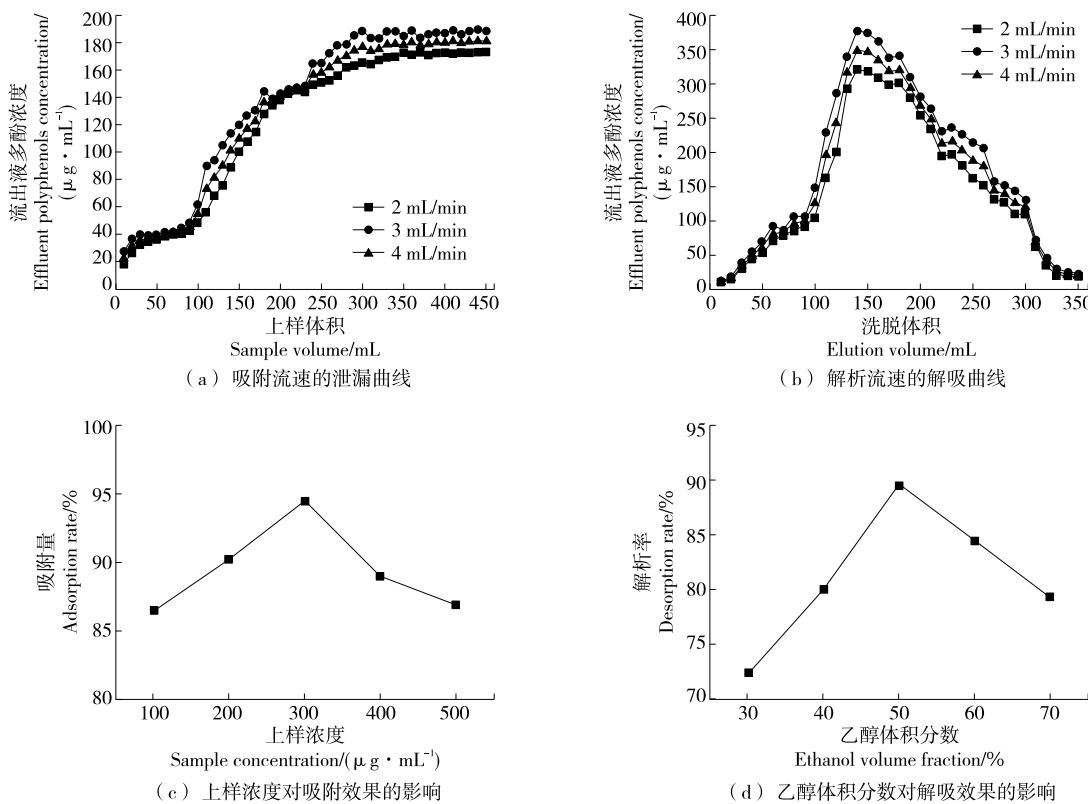


图 4 动态吸附—解吸试验结果

Figure 4 Dynamic adsorption-desorption experimental results

30 mL。当上样流速为 2~3 mL/min 时,随着上样流速的增加,树脂对芒果核仁多酚吸附量不断增加,继续增大流速至 4 mL/min,多酚吸附量随之下降,可能由于样品流速过快,树脂来不及吸附导致吸附量降低<sup>[32]</sup>。因此,确定最适吸附流速 3 mL/min,上样体积 20 mL。

由图 4(b)可知,随着洗脱剂体积的增加,多酚质量浓度先增加后降低,当洗脱液体积为 320 mL 时,流出液的芒果核仁多酚质量浓度基本保持不变,确定洗脱剂体积为 320 mL。当洗脱剂流速为 2~4 mL/min 时,流出液多酚质量浓度变化不明显,解吸曲线峰型越来越宽,呈现明细拖尾现象,这是因为流速快导致洗脱剂与树脂接触时间不足,被快速冲出<sup>[23,25]</sup>。综上,选取最适解吸流速 3 mL/min、洗脱剂用量 320 mL。

由图 4(c)所示,当上样质量浓度为 100~300 μg/mL 时,LX-17 树脂吸附率与芒果核仁粗多酚质量浓度成正比,继续增加上样质量浓度至 400,500 μg/mL,吸附率明显降低。这是由于低质量浓度的芒果核仁粗多酚溶液降低了树脂吸附能力,过高样液质量浓度可能沉积树脂孔隙,导致树脂堵塞,吸附率下降<sup>[33]</sup>。因此,选择 300 μg/mL 上样浓度。

由图 4(d)可知,随着乙醇体积分数的增大,芒果核仁多酚解吸率先增加后降低,50% 乙醇解吸效果最好,因

此,以 50% 乙醇体积分数为洗脱剂。

## 2.7 芒果核仁多酚纯度测定

经 LX-17 大孔吸附树脂纯化后,芒果核仁多酚含量从 9.93 mg/g 提高到 35.68 mg/g,提高了 3.6 倍,表明通过 LX-17 大孔吸附树脂能显著提升芒果核仁多酚纯度。

## 2.8 纯化前后芒果核仁多酚的抗氧化性能

芒果核仁多酚清除 DPPH 自由基效果如图 5(a)所示,DPPH 自由基清除能力与芒果核仁多酚质量浓度无明显的剂量关系,但纯化后芒果核仁多酚的 DPPH 自由基清除能力提高了约 7 倍,IC<sub>50</sub> 值为 19.25 μg/mL,IC<sub>50</sub> 值低,说明清除效果好,抗氧化性能强<sup>[19,34]</sup>。

由图 5(b)可知,当纯化后芒果核仁多酚质量浓度为 20 μg/mL 时,ABTS 自由基清除率为 95.12%,在试验质量浓度范围内,纯化后芒果核仁多酚与 V<sub>c</sub> 清除 ABTS 自由基的 IC<sub>50</sub> 值均为 0.02 μg/mL,其清除 ABTS 自由基能力与 V<sub>c</sub> 的相当。

由图 5(c)可知,纯化前后芒果核仁多酚及 V<sub>c</sub> 与试验质量浓度呈正相关,纯化前后芒果核仁多酚和 V<sub>c</sub> 对于羟自由基半数抑制质量浓度 IC<sub>50</sub> 值分别为 303.0,106.9,200.0 μg/mL,纯化后的芒果核仁多酚清除羟自由基能力高于 V<sub>c</sub> 的。

由图 5(d)可知,纯化后芒果核仁多酚清除 O<sub>2</sub><sup>·</sup> 自由基

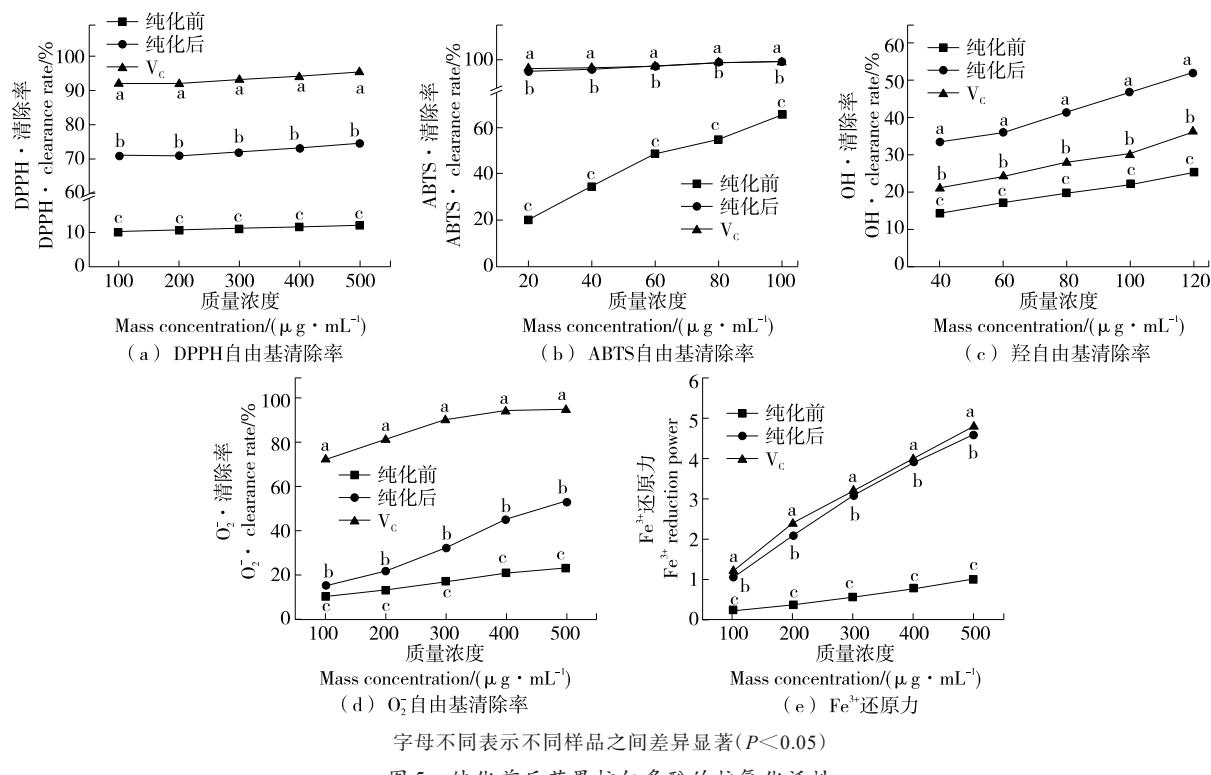


图 5 纯化前后芒果核仁多酚的抗氧化活性

Figure 5 Antioxidant activity of mango kernel polyphenols before and after purification

表 7 芒果核仁多酚抗氧化活性

Table 7 Antioxidant activity of mango kernel polyphenols

试样	IC <sub>50</sub> /(μg·mL <sup>-1</sup> )			
	DPPH自由基清除率	ABTS自由基清除率	羟自由基清除率	O <sub>2</sub> <sup>·</sup> 自由基清除率
纯化前	9 120	1.64	303	1 280
纯化后	19.25	0.02	106.9	464
V <sub>c</sub>	0.02	0.02	200	0.02

能力明显高于纯化前,与试验质量浓度呈明显剂量关系,当质量浓度为 500 μg/mL 时,纯化后芒果核仁多酚对 O<sub>2</sub><sup>·</sup>自由基清除能力为 53.48%,IC<sub>50</sub> 值为 464 μg/mL,但纯化前后芒果核仁多酚对于 O<sub>2</sub><sup>·</sup>自由基清除能力均低于 V<sub>c</sub> 的。

由图 5(e)可知,纯化后芒果核仁多酚及 V<sub>c</sub> 与试验质量浓度呈正相关,质量浓度越大,两者总还原力差值越小,当质量浓度为 500 μg/mL 时,纯化后芒果核仁多酚及 V<sub>c</sub> 的总还原力分别为 4.5 和 4.8,纯化后芒果核仁多酚总还原力相当于 V<sub>c</sub> 的 93.75%。综上,纯化后芒果核仁多酚的抗氧化能力明显提高,其抗氧化活性与 V<sub>c</sub> 的相当。

### 3 结论

采用超声辅助浸提法,以多酚含量为指标,芒果核仁粗多酚提取的最佳工艺条件为超声功率百分比 20%,超声时间 30 min,料液比 1:40 (g/mL),乙醇体积分数 50%,

浸提温度 65 °C,提取时间 70 min,该条件下多酚含量为 9.93 mg/g。LX-17 大孔吸附树脂对芒果核仁多酚的静态吸附和解吸平衡时间为 2.5 h;动态吸附—解吸条件为上样液质量浓度 300 μg/mL、体积 40 mL、流速 3 mL/min,洗脱剂乙醇体积分数 50%、体积 320 mL、流速 2 mL/min。此条件下芒果核仁多酚纯度从 9.93 mg/g 提高到 35.68 mg/g。纯化后芒果核仁多酚对 DPPH 自由基、ABTS 自由基、羟自由基、O<sub>2</sub><sup>·</sup>自由基和 Fe<sup>3+</sup>还原力均有显著性增加,IC<sub>50</sub> 值分别为 19.25, 0.02, 106.90, 464.00 μg/mL,其中对 DPPH 自由基和 O<sub>2</sub><sup>·</sup>自由基的清除能力低于维生素 C 的,ABTS 自由基清除能力和 Fe<sup>3+</sup>还原力与维生素 C 的相当,羟自由基清除能力高于维生素 C 的。邢宇航等<sup>[10]</sup>采用 UPLC-MS 对芒果核仁多酚类化合物鉴定分析表明,芒果核仁多酚类包括 28 种多酚及衍生物。芒果核仁提取物具有优异的抗菌活性<sup>[2,6,11,35]</sup>。因此,后续可以进一步研究芒果核仁色谱柱分级纯化、多酚结构及抑菌性能。

### 参考文献

- [1] MWAURAH P W, KUMAR S, KUMAR N, et al. Physicochemical characteristics, bioactive compounds and industrial applications of mango kernel and its products: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2 421-2 446.

- [2] CHOUDHARY P, DEVI T B, TUSHIR S, et al. Mango seed kernel: a bountiful source of nutritional and bioactive compounds[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(2): 289-312.
- [3] TORRES-LEÓN C, ROJAS R, CONTRERAS-ESQUIVEL J C, et al. Mango seed: functional and nutritional properties[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 55: 109-117.
- [4] BENIWAL P, JOOD S, ARORA S. Mango seed kernel: physico-chemical properties, nutritional composition and antioxidant activity[J]. *Annals of Agri Bio Research*, 2016, 21(2): 179-182.
- [5] SOGI D S, SIDDIQ M, GREIBY I, et al. Total phenolics, antioxidant activity, and functional properties of 'Tommy Atkins' mango peel and kernel as affected by drying methods[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2 649-2 655.
- [6] MUTUA J K, IMATHIU S, OWINO W. Evaluation of the proximate composition, antioxidant potential, and antimicrobial activity of mango seed kernel extracts[J]. *Food Science & Nutrition*, 2017, 5(2): 349-357.
- [7] 胡方洋, 刘彩华, 何玲玲, 等. 干燥方式对台农芒果粉功能性成分及性质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 187-196.  
HU F Y, LIU C H, HE L L, et al. Effects of drying methods on functional components and properties of Tainong mango powder [J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(3): 187-196.
- [8] DUANG X Y, WANG Q, ZHOU X D, et al. Mangiferin: a possible strategy for periodontal disease to therapy[J]. *Medical Hypotheses*, 2011, 76(4): 486-488.
- [9] AHMED T, SETZER W N, NABAVI S F, et al. Insights into effects of ellagic acid on the nervous system: a mini review[J]. *Current Pharmaceutical Design*, 2016, 22(10): 1 350-1 360.
- [10] 邢宇航, 郑烨宇, 薛璐, 等. 不同品种芒果核中多酚类化合物的鉴定及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 63-70.  
XING Y H, ZHENG Y Y, XUE L, et al. Identification and antioxidant activity analysis of polyphenols in different mango kernels cultivars[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(9): 63-70.
- [11] 高云涛, 付艳丽, 李正全, 等. 超声与双水相体系耦合提取芒果核多酚及活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(9): 164-167.  
GAO Y T, FU Y L, LI Z Q, et al. Study on the ultrasound extraction coupling with two-phase aqueous system in the extraction of polyphenols from mango nuclear and its antioxidantion activity[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2009, 35(9): 164-167.
- [12] EKORONG AKOUAN ANTA J F, MBOUGUENG P D, DURAND E, et al. Model development to enhance the solvent extraction of polyphenols from mango seed kernel[J]. *Journal of Biologically Active Products from Nature*, 2018, 8(1): 51-63.
- [13] 康超, 刘凤听, 刘云芬, 等. 不同品种芒果核多酚和黄酮含量及抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 100-105.  
KANG C, LIU F T, LIU Y F, et al. Contents of polyphenols and flavonoids and its antioxidant activity evalution in different kinds of mango kernel seeds[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(20): 100-105.
- [14] HAYAT Z, RIAZ T, SALEEM K, et al. Optimization of Gallic acid-rich extract from mango (*Mangifera indica*) seed kernels through ultrasound-assisted extraction[J]. *Separations*, 2023, 10(7): 376.
- [15] 刘晓珍, 李福香, 祝兆亮, 等. 芒果核多酚超声辅助提取工艺优化及抑菌活性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(14): 56-60, 70.  
LIU X Z, LI F X, ZHU Z L, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction and antimicrobial activity of polyphenols from mango core[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(14): 56-60, 70.
- [16] 周丽明. 芒果多酚的提取、分离纯化及抗氧化、抑菌作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007: 18-32.  
ZHOU L M. Study on extraction, separation, purification, antioxidant and antimicrobial activity of mango polyphenols [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007: 18-32.
- [17] 李燕. 芒果核多酚分离、纯化及其抗氧化活性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2017: 27-47.  
LI Y. Study on separation, purification and antioxidant activity of polyphenol from mango kernel seeds[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017: 27-47.
- [18] LEE H A, LEE J H, HAN J S. A phlorotannin constituent of *Ecklonia cava* alleviates postprandial hyperglycemia in diabetic mice[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2017, 55(1): 1 149-1 154.
- [19] 郑斌, 赵巧丽, 文定青, 等. 提取方法对芒果核仁多酚提取得率及抗氧化活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(9): 76-87.  
ZHENG B, ZHAO Q L, WEN D Q, et al. Effects of different extraction methods on the extraction yield and antioxidation of polyphenols from mango kernel[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(9): 76-87.
- [20] 邢艺缤, 王馨悦, 王慕尧, 等. 人参不定根总皂苷的提取工艺优化及其抗氧化与抗疲劳作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 193-201.  
XING Y B, WANG X Y, WANG M Y, et al. Process optimization of total saponins from adventitious roots of ginseng and their antioxidant and anti-fatigue effects[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(6): 193-201.
- [21] 吴婕, 宫江宁. 大孔树脂纯化甜茶多酚及其对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶抑制活性和DPPH·抗氧化性的研究[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 113-119.  
WU J, GONG J N. Purification of polyphenols from sweet tea by the macroporous resins and its inhibitory activity on

- $\alpha$ -glucosidase and DPPH[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2021, 23(6): 113-119.
- [22] 何袅袅, 陈雅鑫, 蔡树芸, 等. 铜藻多酚的分离纯化及抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 183-191.
- HE N N, CHEN Y X, CAI S Y, et al. Separation and purification and antioxidant activity of polyphenols from *Sargassum horneri*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 183-191.
- [23] 李晓洁, 刘金鑫, 李建华, 等. 大孔吸附树脂纯化茶多酚的工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(13): 214-223.
- LI X J, LIU J X, LI J H, et al. Optimization of purification of tea polyphenols with macroporous adsorption resin and research of their antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(13): 214-223.
- [24] BAI Y D, MA J, ZHU W F, et al. Highly selective separation and purification of chicoric acid from *Echinacea purpurea* by quality control methods in macroporous adsorption resin column chromatography[J]. *Journal of Separation Science*, 2019, 42(5): 1 027-1 036.
- [25] 张慧慧, 李灿, 刘会平, 等. 肉桂多糖的提取纯化及体外抗氧化和降血糖活性分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(7): 15-24.
- ZHANG H H, LI C, LIU H P, et al. Extraction and purification of cinnamomum cassia polysaccharides and its antioxidant and hypoglycemic activities *in vitro*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(7): 15-24.
- [26] 李游. 板栗壳多酚的提取及抗氧化、抑菌特性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021: 21-37.
- LI Y. Extraction, antioxidant and antibacterial properties of polyphenols from chestnut shell[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021: 21-37.
- [27] TANG Q L, HUANG G L. Preparation and antioxidant activities of cuaurbit polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117: 362-365.
- [28] JIAMBOONSRI P, PITHAYANUKUL P, BAVOVADA R, et al. Factors influencing oral bioavailability of Thai mango seed kernel extract and its key phenolic principles[J]. *Molecules*, 2015, 20(12): 21 254-21 273.
- [29] TACIAS-PASCACIO V G, CASTANEDE-VALBUENA D, FERNANDEZ-LAFUENTE R, et al. Phenolic compounds in mango fruit: a review[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(1): 619-636.
- [30] YANG J W, YAN Z, LI L N, et al. Green extraction of phenolic compounds from lotus (*nelumbo nucifera* gaertn) leaf using deep eutectic solvents: process optimization and antioxidant activity[J]. *Separations*, 2023, 10(5): 272.
- [31] LIM K J A, CABAJAR A A, LOBARBIO C F Y, et al. Extraction of bioactive compounds from mango (*Mangifera indica* L. var. Carabao) seed kernel with ethanol - water binary solvent systems[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(5): 2 536-2 544.
- [32] KURIHARA H, KONNO R, TAKAHASHI K. Fucophlorellol C, a phlorotannin as a lipoxygenase inhibitor[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2015, 79(12): 1 954-1 956.
- [33] 赵聪. 核桃种皮多酚的提纯鉴定及抗氧化活性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016: 22-36.
- ZHAO C. Purification, identification and antioxidant activity of polyphenols from walnut kernel pellicle[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2016: 22-36.
- [34] BOUCHEFFA S, SOBHI W, ATTOUI A, et al. Effect of the main constituents of *Pistacia lentiscus* leaves against the DPPH radical and xanthine oxidase: experimental and theoretical study[J]. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2022, 40(20): 9 870-9 884.
- [35] TORRES-LEÓN C, VICENTE A A, FLORES-LÓPEZ M L, et al. Edible films and coatings based on mango (var. Ataulfo) by-products to improve gas transfer rate of peach[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 97: 624-631.