DOI:10.12441/spyswjs.20240522003 [文章编号] 1673-1689(2024)09-0107-09

不同溶剂对枇杷果提取物抗氧化活性和多酚稳定性的影响

周立稳 彭效明* 居瑞军 杨思敏 严晓强 管 洁

(北京石油化工学院新材料与化工学院,北京 102617)

摘要:枇杷果(*Eriobotrya japonica* Lindl.)是一种原产于中国的保健水果,营养丰富,具有较高的药用价值。作者探讨了不同溶剂对枇杷果提取物抗氧化活性和多酚质量分数的影响,分析了两者之间的相关性,并探讨了温度、pH、金属离子和食品添加剂对枇杷果多酚稳定性的影响。结果显示,体积分数20%乙醇的提取效率最高。枇杷果各溶剂提取物的抗氧化活性与多酚质量分数之间显示强相关性,乙酸乙酯提取物在抗氧化活性和多酚质量分数方面表现最为突出。高温会降低枇杷果多酚的稳定性,pH为6时对多酚稳定性影响最小,金属离子Na^+、Ca^{2+}、Fe^{2+},Na_2SO_3和食品添加剂均会导致枇杷果多酚稳定性的下降。该研究为枇杷果多酚的提取提供了依据,也为深入研究多酚的稳定性和扩大枇杷果的应用领域提供参考。

关键词:枇杷果;多酚质量分数;抗氧化;相关性分析;稳定性

Effect of Different Solvents on the Antioxidant Activity and Polyphenol Stability of Loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) Fruit Extract

ZHOU Liwen PENG Xiaoming JU Ruijun YANG Simin YAN Xiaoqiang GUAN Jie*

(College of New Materials and Chemical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: Loquat (*Eriobortya japonica* Lindl.) is a health-promoting fruit native to China, rich in nutrients and with high medicinal value. The author investigated the effects of different solvents on the antioxidant activity and polyphenol mass fraction of loquat fruit extracts, analyzed the correlation between the two, and explored the effects of temperature, pH, metal ions, and food additives on the stability of loquat polyphenols. The results showed that the extraction efficiency was highest with 20% ethanol by volume. A strong correlation was observed between the antioxidant activity and polyphenol mass fraction of the various solvent extracts from loquat fruit, with ethyl acetate extracts exhibiting the most prominent antioxidant activity and polyphenol mass fraction. High temperature reduced the stability of loquat polyphenols, with pH 6 showing the least impact on their stability. Metal ions such as Na^+, Ca^{2+}, Fe^{2+}, Na_2SO_3, and food additives all contributed to a decrease in loquat polyphenol stability. This study provides a basis for the extraction of loquat polyphenols and offers a reference for further research on polyphenol stability, as well as expanding the applications of loquat fruit.

Keywords: loquat fruit; polyphenols mass fraction; antioxidant; correlation analysis; stability

枇杷在我国各地都有栽培,枇杷果有丰富的营养和药用价值,如润肺止咳和降逆止呕[1],在传统中医药领域应用广泛。枇杷果乙酸乙酯相的提取物对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的生长有抑制

基金项目:北京市教委科技计划一般项目(KM202210017011);北京市科协青年人才托举工程项目(BYESS2023259);北京石油化工学院校内学科平台建设项目(2019XK006)。

通信作者:彭效明(1983—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事天然产物研究与开发。E-mail:pengxiaoming@bipt.edu.cn

收稿日期:2024-05-22 **修回日期:**2024-08-27

作用，其多种活性成分（如多酚和黄酮类化合物）在抗氧化、抗炎、肝损伤保护和抑制肺癌细胞活力方面有潜在的健康功效[2-5]。

目前，枇杷果常用的提取溶剂为纯水和乙醇[6-7]，有关乙酸乙酯和石油醚等非传统溶剂的研究相对较少。玉澜等[8]通过双水相和Box-Behnken响应面法优化超声波辅助提取技术，提高了枇杷叶多糖的提取率及其抗氧化活性。赵欣等[9]优化了枇杷果中多酚的超声提取工艺，并提高了其提取率。研究表明，优化提取条件和深入筛选提取溶剂有利于提高枇杷果提取物的生物活性和经济价值。

枇杷果是消费者喜爱的季节性水果，但果实采摘后易变质，从而影响其贮藏品质[10]。此外，相关提取溶剂的研究[11-12]需要在枇杷果原料稳定的基础上进行，因此有必要研究枇杷果的稳定性。

基于DPPH自由基清除率、$ABTS^+$自由基清除率和总还原能力对枇杷果不同溶剂提取物（体积分数20%乙醇、体积分数40%乙醇、体积分数60%乙醇、体积分数80%乙醇、体积分数95%乙醇、乙酸乙酯和纯水）的抗氧化活性进行研究，并测定其多酚质量分数，同时对乙酸乙酯提取物中的多酚稳定性进行了研究[13]。

1 材料与方法

1.1 仪器与设备

超声波清洗器：KQ-500E型，昆山禾创超声有限公司；酶标仪：SLXFATS型，美国伯腾仪器有限公司；冷冻干燥机：SCIENTZ-50F型，宁波新芝生物股份有限公司；循环水式多用真空泵：SHZ-95B型，天津科诺仪器设备有限公司；旋转蒸发仪：R-1005型，郑州长城科工贸有限公司。

1.2 材料与试剂

枇杷果：品种为‘广西白沙’，采购于广西壮族自治区，呈果干状；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼：美国Sigma公司；过硫酸钾：北京耦合科技有限公司；三氯乙酸：上海麦克林生化科技有限公司；铁氰化钾和三氯化铁：上海阿拉丁试剂有限公司；甲醇：北京百灵威科技有限公司；抗坏血酸：山东西亚股份有限公司；乙醇、氢氧化钠：北京化工厂有限责任公司；乙酸乙酯、无水乙醇：分析纯，福晨（天津）化学试剂有限公司；亚硫酸钠：天津市福晨化学试剂厂；无水碳酸钠、福林酚、PBS和蔗糖：大连美仑生物技术有限公司；氯化钙：北京现代东方精细化学品有限公司；过氧化氢：国药集团化学试剂北京有限公司；氯化钠、柠檬酸钠：天津市光复科技发展有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 枇杷果不同极性溶剂提取物的制备

取适量枇杷果放入粉碎机中粉碎，破碎后筛分（100目，即150 μm）。用7种不同极性的溶液从筛分后的粉末中提取活性成分，包括体积分数20%乙醇、体积分数40%乙醇、体积分数60%乙醇、体积分数80%乙醇、体积分数95%乙醇、乙酸乙酯和纯水，质量体积比为1 g∶10 mL。过滤、浓缩并冷冻干燥，得到不同极性溶剂的枇杷果提取物样品粉末。

1.3.2 没食子酸标准曲线的制备

精准称量2 mg没食子酸于10 mL的容量瓶中，用蒸馏水稀释至刻度，得到其储备溶液。分别取0、20、40、60、100、200、300、400、500 μL的储备液，加入体积分数60%的乙醇，制备质量浓度分别为0、4、8、12、20、40、60、80、100 mg/L的没食子酸工作溶液。将工作溶液和福林酚试剂加入离心管中，体积比为2∶5，摇匀，静置5 min。加入250 μL质量分数为15%的Na_2CO_3溶液，用去离子水稀释至刻度，摇匀[13]。在40 ℃水浴中保温60 min，取出后立即冷却，静置20 min，于波长778 nm处测定其吸光度。横坐标为没食子酸的质量浓度，纵坐标为吸光度，绘制标准曲线[14-15]。

1.3.3 枇杷果不同溶剂提取物中多酚质量分数的测定

将样品溶液和福林酚试剂以2∶5的体积比加入离心管中，摇匀，静置5 min。加入250 μL质量分数为15%的Na_2CO_3溶液，用去离子水稀释至刻度，摇匀。在40 ℃水浴60 min，静置冷却20 min，在778 nm波长处测量样品的吸光度，并根据标准曲线计算样品溶液中多酚的质量分数。

1.3.4 枇杷果提取物抗氧化活性测定

抗氧化活性是植物多酚的重要性质，植物多酚中相邻羟基的易氧化性以及捕获活性氧和其他自由基的能力使其具有很强的清除自由基的能力[16]。枇杷果多酚是一种天然的抗氧化活性剂[17]，作者针对枇杷果提取物抗氧化能力进行了以下测定：

1）清除DPPH自由基能力的测定：准备DPPH溶液，用锡箔包裹，在黑暗条件中储存备用。用枇杷果提取物制备5种不同质量浓度的溶液，分别为0.25、0.50、1.00、2.00、4.00 mg/mL。VC溶液的质量浓度与上述相同。取200 μL样品溶液，加入离心管中，向每个样品中加入600 μL的DPPH溶液。将200 μL不同质量浓度的提取物加入600 μL甲醇中作为阴性对照组，用蒸馏水替代待测样品作为空白组。将离心管充分摇匀，在室温下避光反应30 min。以8 000 r/min的速度离心2 min，取200 μL上清液，加入96孔板中，每个样品设置3个复孔。使用酶标仪测量517 nm处的吸光度。DPPH自由基清除率计算公式见式（1）[18]。

$$S_{DPPH}=\frac{A_0-(A_1-A_j)}{A_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

S_{DPPH}——DPPH自由基清除率，%；

A_0——空白组的吸光度；

A_1——待测样品的吸光度；

A_j——阴性对照组的吸光度。

2）还原能力的测定：枇杷果不同极性溶剂提取物和VC溶液的制备方法与清除DPPH自由基能力的测定方法相同。样品溶液、PBS和亚铁氰化钾溶液的体积比为141∶353∶353。将溶液置于50 ℃水浴中，在恒温下反应20 min，取出并冷却至室温。加入553 μL质量分数10%的三氯乙酸溶液，以3 000 r/min的速度离心10 min。上清液、无水乙醇和氯化铁溶液的体积比为148∶44∶9，充分混合[14]。用VC溶液作为阳性对照重复上述操作。使用酶标仪测定593 nm处的吸光度[19]。

3）清除$ABTS^+$自由基能力的测定：准备$ABTS^+$工作溶液，避光备用，枇杷果不同极性溶剂提取物和VC溶液的制备方法与清除DPPH自由基能力的测定方法相同。取200 μL的$ABTS^+$工作溶液和10 μL样品溶液于96孔板中。以PBS工作液替代$ABTS^+$工作液作为对照组；以$ABTS^+$工作液和VC溶液混合作为阳性对照组；空白组由$ABTS^+$工作液和PBS工作溶液组成；每组设3个平行。使用酶标仪在734 nm波长下测量样品的吸光度[20-21]。

样品组$ABTS^+$自由基清除率按照式（2）计算[22]。

$$S_1=\frac{1-(A_2-A_c)}{A_0}\times 100\% \quad (2)$$

式中：

S_1——样品组$ABTS^+$自由基清除率，%；

A_0——空白组的吸光度；

A_2——样品组的吸光度；

A_c——对照组的吸光度。

VC的$ABTS^+$自由基清除率按照式（3）计算。

$$S_2=(1-A_k)/A_0\times 100\% \quad (3)$$

式中：

S_2——VC的$ABTS^+$自由基清除率，%；

A_k——阳性对照组的吸光度；

A_0——空白组的吸光度。

1.3.5　枇杷果多酚质量分数稳定性的研究

使用无水乙醇配制质量浓度4 mg/mL的枇杷果乙酸乙酯多酚提取物作为稳定性研究的样品溶液。

1）温度对枇杷果多酚稳定性的影响：试管中加入样品溶液，分别置于20、40、60、80、100 ℃水浴中恒温反应1、2、4、6、10 h后取样，按照1.3.3的方法检测样品中多酚质量分数[23]。

2）蔗糖对枇杷果多酚稳定性的影响：蔗糖属于食品原料中的原辅料，研究其对枇杷果多酚的稳定性非常必要。分别将蔗糖加入样品溶液中，使得添加剂在溶液中的质量浓度分别为0.10、0.15、0.20、0.25、0.50 mg/mL，静置6 h，按照1.3.3方法检测样品中多酚质量分数[24]。

3）金属离子对枇杷果多酚稳定性的影响：向样品溶液中分别加入NaCl、$CaCl_2$、$FeCl_2$，使得金属离子在样品溶液中的质量浓度分别为0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 mg/mL，将金属离子水溶液静置30 min，按照1.3.3的方法检测样品中多酚质量分数[25]。

4）pH对枇杷果多酚稳定性的影响：将去离子水调节至不同pH，分别加入等体积的样品溶液，室温避光30 min，各取1 mL作为待测液，按照1.3.3的方法检测样品中多酚质量分数[26]。

5）还原物对枇杷果多酚稳定性的影响：配制含有等体积样品溶液的Na_2SO_3溶液，质量浓度分别为0、0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 mg/mL。混合均匀后静置30 min，按照1.3.3的方法检测样品中多酚质量分数[27]。

1.4　统计分析

采用Excel 2010和Origin 2018对数据进行统计分析、差异性分析、相关性分析[28]以及图表分析。

2 结果与讨论

2.1 溶剂对枇杷果提取率的影响

使用不同溶剂对枇杷果进行提取，结果见表 1。体积分数 20% 乙醇的提取率最高，为 17.6%，表明低体积分数的乙醇在提取枇杷果有效成分时优势明显。纯水的提取率也较高，达到 16.0%，说明纯水也是有效的提取介质。相比之下，乙酸乙酯的提取率仅为 0.3%，是所有测试溶剂中最低的。随着乙醇体积分数的增加，提取率呈现下降趋势。这为选择枇杷果的提取溶剂提供了依据，建议在实际应用中优先考虑使用体积分数 20% 乙醇或纯水作为提取溶剂，以便最大化提取枇杷果中的有效成分，同时考虑溶剂的溶解能力、安全性和成本效益。

表 1 不同溶剂提取枇杷果的结果

Table 1 Results of extraction of loquat fruit with different solvents

提取溶剂	枇杷果质量/g	提取物质量/g	提取率/%
体积分数 20% 乙醇	50	8.8	17.6
体积分数 40% 乙醇	50	6.5	13.0
体积分数 60% 乙醇	50	7.1	14.2
体积分数 80% 乙醇	50	5.6	11.2
体积分数 95% 乙醇	50	2.0	4.0
纯水	50	8.0	16.0
乙酸乙酯	50	0.2	0.3

2.2 不同提取物中多酚的质量分数

通过标准曲线以及线性回归方程，得出不同极性溶剂提取物中多酚的质量分数，见图 1。标准曲线方程为 Y=31.111X+0.247 7，相关系数 R^2 为 0.991，表明拟合效果良好。乙酸乙酯提取物的多酚质量分数最高，达到 6.48 mg/g；纯水提取物的多酚质量分数最低，仅为 2.28 mg/g。结果表明不同溶剂对多酚提取效果的差异，这些发现对于优化提取工艺、提高多酚产率具有重要意义。

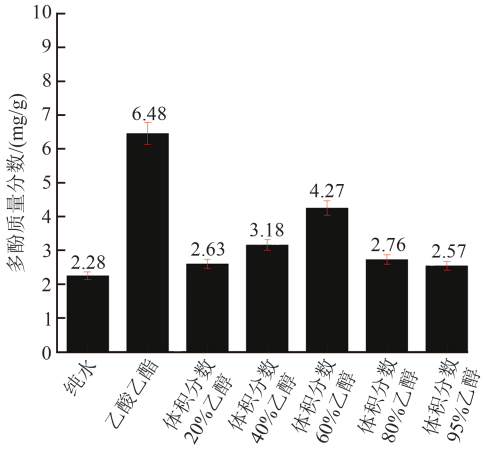


图 1 枇杷果不同溶剂提取物中多酚的质量分数

Fig. 1 Mass fraction of polyphenols in loquat fruit extracts obtained with different solvents

2.3 枇杷果提取物的体外抗氧化活性评价

2.3.1 DPPH 自由基清除能力

由图 2 可知，所有溶剂提取的枇杷果提取物均具有清除 DPPH 自由基的能力。清除率随着样品质量浓度的增加而增强[14]。各溶剂提取物清除 DPPH 自由基的能力排序为：纯水提取物<体积分数 95% 乙醇提取物<体积分数 20% 乙醇提取物<体积分数 80% 乙醇提取物<体积分数 40% 乙醇提取物<体积分数 60% 乙醇提取物<乙酸乙酯提取物。枇杷果的乙酸乙酯提取物在体外抗氧化活性测试中表现最佳，特别是在 1~4 mg/mL 时，乙酸乙酯提取物展示了最高的抗氧化活性，清除率从 55.78% 增至 99.36%。

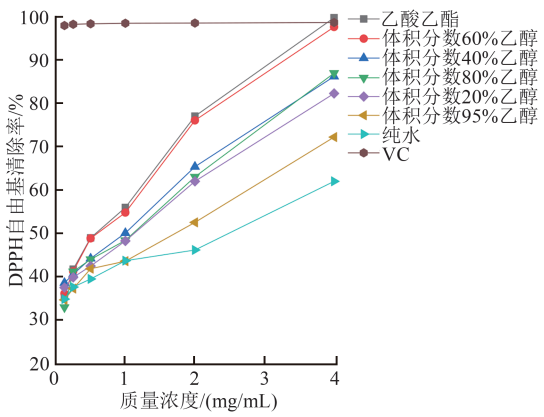


图 2 枇杷果不同溶剂提取物对 DPPH 自由基清除率的影响

Fig. 2 Effect of loquat fruit extracts obtained with different solvents on DPPH radical scavenging rate

2.3.2 还原能力

枇杷果提取物的还原能力可以用吸光度来表征，吸光度越大，表明其还原能力越强[28]。由图 3 可知，枇杷果提取物的还原能力随着样品质量浓度的增加而增强，质量浓度为 4 mg/mL 时，吸光度的最大值达到 0.31。乙酸乙酯提取物在其中表现出较明显的还原能力。各提取物的还原能力排序

与DPPH自由基清除能力的顺序一致。

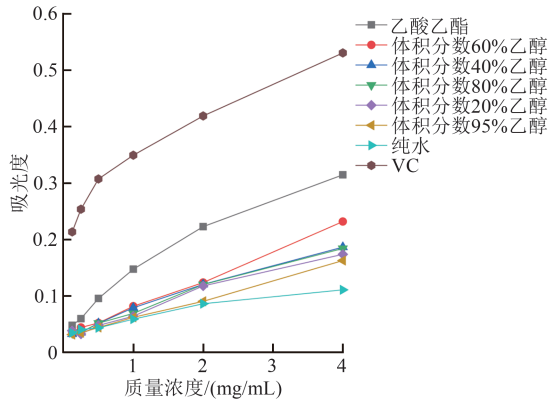


图3　枇杷果不同溶剂提取物对总还原能力的影响

Fig. 3　Effect of loquat fruit extracts obtained with different solvents on total reducing power

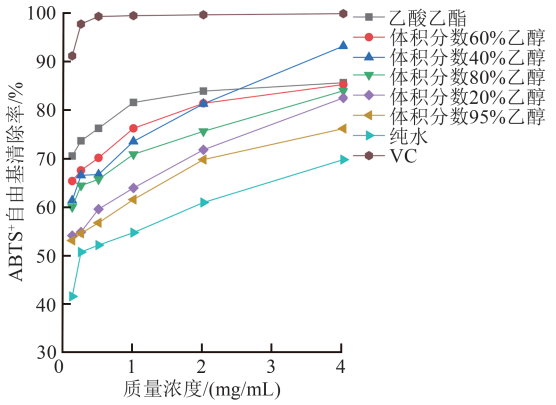


图4　枇杷果不同溶剂提取物对ABTS⁺自由基清除率的影响

Fig. 4　Effect of loquat fruit extracts obtained with different solvents on ABTS⁺ free radical clearance rate

2.3.3　清除ABTS⁺自由基的能力

从图4可以看出，枇杷果不同溶剂提取物对ABTS⁺自由基的清除能力均低于VC，但随着样品质量浓度的增大，不同溶剂提取物的ABTS⁺自由基清除率都有所提高。乙酸乙酯提取物表现出最强的清除能力，在质量浓度为4 mg/mL时其清除率接近85.64%。体积分数40%乙醇提取物在2~4 mg/mL时也表现出较好的清除率。

2.3.4　枇杷果抗氧化活性的IC_{50}值分析

对枇杷果不同溶剂提取物的抗氧化能力进行了定量分析，计算了IC_{50}值，即在体外试验中抑制50%的自由基所需的提取物质量浓度。IC_{50}值较低表示抗氧化能力较强。同时，总还原力以吸光度为0.5时对应的质量浓度来表示，结果见表2。各提取物对DPPH、ABTS⁺自由基的清除能力和总还原力之间存在差异。乙酸乙酯提取物的抗氧化活性与其他溶剂提取物的抗氧化活性之间有显著性差异。乙酸乙酯提取物在抗氧化性能评估中（包括DPPH和ABTS⁺自由基清除能力及总还原力）表现最为突出，其IC_{50}值在所有溶剂中最低，表明乙酸乙酯不仅有效地提取了枇杷果中的多酚类化合物，而且这些多酚具有较强的抗氧化能力。乙酸乙酯是最适合提取枇杷果中具有强抗氧化活性化合物的溶剂，这一发现对于优化提取条件和溶剂的筛选具有重要意义。

表2　枇杷果不同溶剂提取物抗氧化活性的IC_{50}值

Table 2　IC_{50} values of antioxidant activity in loquat fruit extracts obtained with different solvents

提取溶剂	抗氧化活性的IC_{50}值/（mg/mL）		
	DPPH自由清除能力	ABTS⁺自由基清除能力	总还原能力
体积分数20%乙醇	0.621	0.136	5.3×10^{3}
体积分数40%乙醇	0.545	0.057	3.3×10^{3}
体积分数60%乙醇	0.443	0.014	4.0×10^{2}
体积分数80%乙醇	0.602	0.037	3.4×10^{3}
体积分数95%乙醇	0.926	0.138	1.6×10^{4}
纯水	1.502	0.197	4.1×10^{7}
乙酸乙酯	0.430	0.002	49.0

2.3.5　枇杷果提取物中多酚质量分数与抗氧化活性的相关性分析

研究表明，枇杷果各提取物均具有抗氧化活性，且均呈量效关系[28]。将不同溶剂提取物中多酚的质量分数分别与DPPH自由基、ABTS⁺自由基以及总还原能力进行相关性分析，结果见表3。总还原能力与多酚质量分数之间具有相关性，相关系数为0.90。DPPH、ABTS⁺自由基清除能力与多酚质

量分数的相关性极显著（P<0.001），相关系数为0.99和0.98。进一步验证了枇杷果提取物的多酚质量分数与其抗氧化活性之间存在明显的正相关。

表 3　枇杷果多酚质量分数与抗氧化活性的相关性分析

Table 3　Correlation analysis between total polyphenol mass fraction and antioxidant activity in loquat fruit

因素	水平			总还原能力
	多酚质量分数	DPPH	$ABTS^+$	
多酚质量分数	1			
DPPH 自由基	0.99***	1		
$ABTS^+$自由基	0.98***	0.98**	1	
总还原能力	0.90	0.92	0.92	1

注：**表示在 P<0.01 水平上枇杷果的多酚质量分数与抗氧化活性有显著性差异；***表示在 P<0.001 水平上枇杷果的多酚质量分数与抗氧化活性有极显著性差异。

2.4　枇杷果多酚稳定性分析

2.4.1　温度对枇杷果多酚稳定性的影响

温度对枇杷果多酚稳定性的影响见图5。在20~40 ℃，枇杷果乙酸乙酯提取物的多酚质量分数表现出较高的稳定性。当温度升高至40~60 ℃时，枇杷果乙酸乙酯提取物的多酚质量分数明显上升，超过60 ℃后，数值略有上升，可能是由于高温导致了枇杷果多酚受热分解。因此，建议在提取和保存枇杷果多酚时，应将温度控制在20~40 ℃。在生产和储存过程中，应将枇杷果多酚置于阴凉处，以确保其稳定性。

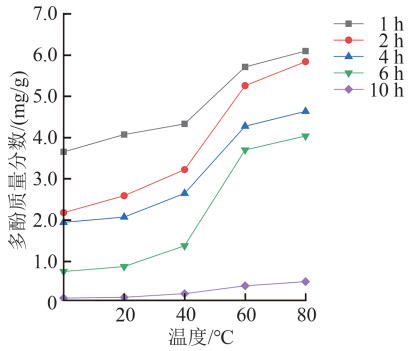


图 5　温度对枇杷果多酚稳定性的影响

Fig. 5　Effect of temperature on the stability of polyphenols in loquat fruit

2.4.2　蔗糖对枇杷果多酚稳定性的影响

蔗糖对枇杷果多酚稳定性的影响结果见图6。加入蔗糖后枇杷果乙酸乙酯提取物的多酚质量分数明显下降，这表明蔗糖对枇杷果多酚的稳定性影响较大。因此，在以枇杷果为原料制成的食品中应适量添加蔗糖，过量添加可能会起反作用。

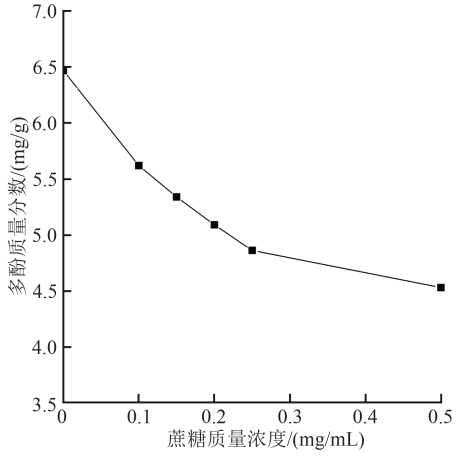


图 6　蔗糖对枇杷果多酚稳定性的影响

Fig. 6　Effect of sucrose on the stability of polyphenols in loquat fruit

2.4.3　金属离子对枇杷果多酚稳定性的影响

通过向枇杷果乙酸乙酯提取物溶液中加入不同质量浓度的Na^+、Ca^{2+}、Fe^{2+}来研究金属离子对枇杷果多酚稳定性的影响，结果见图7。Na^+、Ca^{2+}、Fe^{2+}对枇杷果多酚质量分数均有影响，其中Fe^{2+}对枇杷果多酚质量分数的影响最大。当金属离子质量浓度达到0.05 mg/mL时，枇杷果多酚质量分数明显降低。因此，枇杷果多酚应避免与Na^+、Ca^{2+}、Fe^{2+}接触，以保持其稳定性。

2.4.4　pH 对枇杷果多酚稳定性的影响

pH对枇杷果多酚稳定性的影响见图8。随着pH的增大，枇杷果多酚质量分数呈现先增后减的

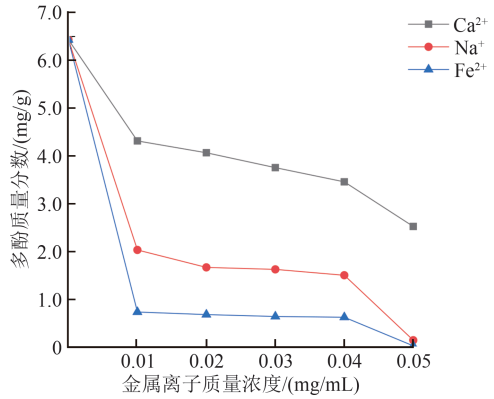


图 7　不同质量浓度金属离子对枇杷果多酚稳定性的影响

Fig. 7　Effect of metal ions at different mass fractions on the stability of polyphenols in loquat fruit

趋势。当pH为6时，数值最高，多酚的质量分数由6.48 mg/g下降至5.35 mg/g，保留率在80%以上，当pH＜5或pH＞7时，枇杷果乙酸乙酯提取物多酚质量分数变得不稳定。当pH为12时，数值最低，多酚的质量分数由6.48 mg/g下降至3.14 mg/g，保留率仅有48.5%。因此，枇杷果多酚应保持在pH为6的环境中，以保持其稳定性。

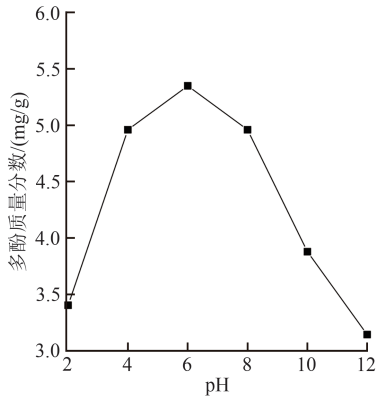


图8　pH对枇杷果的多酚稳定性影响

Fig. 8　Effect of pH on the stability of polyphenols in loquat fruit

2.4.5　还原物对枇杷果多酚稳定性的影响

还原物对枇杷果多酚稳定性的影响见图9。随着Na_2SO_3质量浓度的增加，枇杷果多酚提取物的多酚质量分数呈现下降趋势。这表明Na_2SO_3可能破坏了枇杷果多酚的结构。因此，在生产和存储过程中，应避免枇杷果多酚与Na_2SO_3接触，以维持其稳定性。

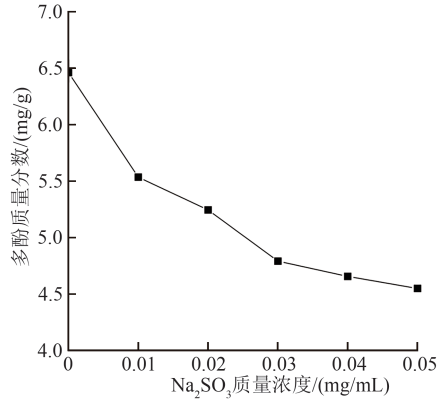


图9　Na_2SO_3对枇杷果多酚稳定性的影响

Fig. 9　Effect of Na_2SO_3 on the stability of polyphenols in loquat fruit

3　结论

作者对枇杷果进行了不同类型溶剂的提取率分析，结果表明，体积分数20%的乙醇提取率最高，为17.6%，纯水的提取效率也较高，达到16.0%。相比之下，乙酸乙酯的提取率最低，仅为0.3%。建议在实际应用中优先考虑使用体积分数20%乙醇或纯水作为提取溶剂。在不同提取物多酚的质量分数测定中，枇杷果乙酸乙酯提取物的多酚质量分数最高，达到6.48 mg/g，纯水提取物的多酚质量分数最低，仅为2.28 mg/g，不同溶剂对多酚的提取效果有明显差异。各溶剂提取物均有较好的抗氧化性能，样品质量浓度增大，自由基清除率随之提高。枇杷果乙酸乙酯提取物抗氧化能力最高。枇杷果不同溶剂提取物的多酚质量分数与DPPH自由基清除能力、总还原能力和$ABTS^+$自由基清除能力之间存在显著的正相关，说明枇杷果多酚可作为天然抗氧化剂。枇杷果多酚稳定性研究结果表明，在储存和运输过程中，温度应控制在20~40 ℃，避免与Na^+、Ca^{2+}、Fe^{2+}、蔗糖和Na_2SO_3接触，并在pH为6的环境中保存。该研究可以为枇杷果多酚的提取工艺优化和抗氧化性能以及稳定性研究提供理论参考。

参考文献

[1] 吴锦程，夏海玲，唐朝晖，等. 白肉枇杷多酚氧化酶酶学特性研究[J]. 中国农学通报，2005，21(11)：96-98，113.
WU J C，XIA H L，TANG C H，et al. Study on characteristics of polyphenol oxidase in white pulp loquat [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2005，21(11)：96-98，113.(in Chinese)

[2] 张娜，吴绍康，沈先荣，等. 枇杷叶水提物祛痰止咳及抗炎作用研究[J]. 中华中医药学刊，2014，32(9)：2175-2177.
ZHANG N，WU S K，SHEN X R，et al. Study on expectorant，antitussive and anti-inflammatory effects of aqueous extract of *Eriobotrya japonica* leaves[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine，2014，32(9)：2175-2177.(in Chinese)

[3] WU S K，ZHANG N，SHEN X R，et al. Preparation of total flavonoids from loquat flower and its protective effect on acute alcohol-induced liver injury in mice[J]. Journal of Food and Drug Analysis，2015，23(1)：136-143.

[4] 吴颖. 枇杷叶提取物抑制肺癌细胞INHβB表达及侵袭转移[D]. 长沙：湖南中医药大学，2022.

[5] 姜少娟，刘晓莉. 枇杷果渣提取物的抑菌活性[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版)，2013，34(4)：368-370.
JIANG S J，LIU X L. Research on antibacterial activity of extract from loquat fruit residue[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)，2013，34(4)：368-370.(in Chinese)

[6] 林俊豪，闫启东，金昌权，等. 枇杷叶中活性物质提取方法研究进展[J]. 化学分析计量，2023，32(10)：113-116.
LIN J H，YAN Q D，JIN C Q，et al. Research progress on extraction methods of active substances from loquat leaf [J]. Chemical Analysis and Meterage，2023，32(10)：113-116.(in Chinese)

[7] SHIN H J，KIM K H，HWANG H R，et al. Antioxidant activities of extract fractions of leaves from loquat (*Eriobotrya japonica* lindl.) by cultivars[J]. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition，2012，41(8)：1029-1034.

[8] 玉澜，肖云，陈燕萌，等. Box-Behnken响应面优化超声波辅助双水相提取枇杷叶多糖及其抗氧化活性研究[J]. 饲料研究，2024，47(7)：94-99.
YU L，XIAO Y，CHEN Y M，et al. Ultrasonic-assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharide from loquat leaves by Box-Behnken response surface optimization and its antioxidant activity[J]. Feed Research，2024，47(7)：94-99.(in Chinese)

[9] 赵欣，王萍，杨兴斌，等. Box-Behnken响应面法优化枇杷果多酚超声提取工艺研究[J]. 现代中药研究与实践，2017，31(6)：40-43，55.
ZHAO X，WANG P，YANG X B，et al. Optimization of ultrasonic extraction of total polyphenols from loquat fruit by Box-Behnken response surface method[J]. Research and Practice on Chinese Medicines，2017，31(6)：40-43，55.(in Chinese)

[10] ZHANG H F，PU J，LIU H，et al. Effects of *L*-cysteine and *γ*-aminobutyric acid treatment on postharvest quality and antioxidant activity of loquat fruit during storage[J]. International Journal of Molecular Sciences，2023，24(13)：10541.

[11] 黄佳婷，余美珍，陈虹，等. 枇杷花黄酮纳米颗粒的制备工艺优化及其稳定性研究[J]. 食品工业科技，2024，45(15)：223-232.
HUANG J T，YU M Z，CHEN H，et al. Preparation process optimization and stability study of loquat flower flavonoid nanoparticles[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(15)：223-232.(in Chinese)

[12] ZENG L P，WANG T，YANG G M，et al. Preparation of the antibacterial film incorporated with *Litsea cubeba* oil and its application in quality preservation of loquat fruit[J]. Basic Clinical Pharmacology Toxicology，2020，12771-72.

[13] 秦小桐，曹昱莹，居瑞军，等. 虎杖根不同溶剂提取物的抗氧化活性研究[J]. 现代化工，2024，44(4)：128-133.
QIN X T，CAO Y Y，JU R J，et al. Study on antioxidant activity of *Polygonum cuspidatum* root extracts by different solvents[J]. Modern Chemical Industry，2024，44(4)：128-133.(in Chinese)

[14] 杨颖，彭效明，居瑞军，等. 白芍不同极性部位的抗氧化活性及其与总萜含量的相关性研究[J]. 现代化工，2024，44(2)：109-112.
YANG Y，PENG X M，JU R J，et al. Antioxidant activity of different polar parts of *Paeonia lactiflora* and correlation with total terpene content [J]. Modern Chemical Industry，2024，44(2)：109-112.(in Chinese)

[15] 祝媛媛，任晓聪，刘元松，等. 响应面法优化马齿苋总多酚提取工艺及其抗氧化活性分析[J]. 粮食与油脂，2024，37(4)：119-123.
ZHU Y Y，REN X C，LIU Y S，et al. Optimization of total polyphenols extraction process from *Portulaca oleracea* L. by response surface method and analysis of its antioxidant activity[J]. Cereals & Oils，2024，37(4)：119-123.(in Chinese)

[16] 赵扬帆，郑宝东. 植物多酚类物质及其功能学研究进展[J]. 福建轻纺，2006(11)：107-110.
ZHAO Y F，ZHENG B D. Research progress of plant polyphenols and their functions[J]. The Light & Textile Industries of Fujian，2006(11)：107-110.(in Chinese)

[17] 汤承浩. 枇杷果肉总多酚提取及体外抗氧化活性研究[J]. 辽宁化工，2020，49(9)：1055-1058.
TANG C H. Extraction of total polyphenols from loquat pulp and its antioxidant activity *in vitro*[J]. Liaoning Chemical Industry，2020，49(9)：1055-1058.(in Chinese)

[18] 蒋大珍，马佰诚，杨皎，等. 槲寄生多糖提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 北方农业学报，2023，51(5)：84-92.
JIANG D Z，MA B C，YANG J，et al. Study on the optimization of mistletoe polysaccharide extraction process and the antioxidant activities[J]. Journal of Northern Agriculture，2023，51(5)：84-92.(in Chinese)

[19] 郭瑛，赵文惠，李安林，等. 疏花蔷薇花总多酚提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发，2024，45(3)：116-122，180.
GUO Y，ZHAO W H，LI A L，et al. Optimization of extraction process of total polyphenols and their antioxidant activity in *Rosa laxa* Retz. flowers[J]. Food Research and Development，2024，45(3)：116-122，180.(in Chinese)

[20] ARAB K，GHANBARZADEH B，AYASEH A，et al. Extraction，purification，physicochemical properties and antioxidant activity of a new polysaccharide from *Ocimum album* L. seed[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2021，180：643-653.

[21] 吴丽丽，陈江龙，李莎. 水翁花蕾多酚的提取及其抗氧化、抑菌活性研究[J]. 食品工业，2024，45(1)：66-70.
WU L L，CHEN J L，LI S. Optimization of extraction of polyphenols from buds of *Cleistocalyx operculatus* and

study of its antioxidant and antibacterial activities[J]. The Food Industry,2024,45(1):66-70.(in Chinese)
[22] 方菲,陈惠敏,汪少芸. 鲷鱼鳞多肽-木糖美拉德反应产物的制备、结构与功能[J]. 食品科学,2018,39(8):182-190.
FANG F,CHEN H M,WANG S Y. Preparation,structure and biological activities of Maillard reaction products derived from snapper fish scale peptides and xylose[J]. Food Science,2018,39(8):182-190.(in Chinese)
[23] 冯靖,彭效明,李翠清,等. 银杏叶黄酮的抗氧化性及其稳定性研究[J]. 食品科技,2019,44(4):244-249.
FENG J,PENG X M,LI C Q,et al. Antioxidant activity and stability of flavonoids from ginkgo leaves[J]. Food Science and Technology,2019,44(4):244-249.(in Chinese)
[24] WANG S Y,YANG Z W,PENG N,et al. Optimization of ionic liquids-based microwave-assisted hydrolysis of puerarin and daidzein derivatives from Radix *Puerariae lobatae* extract[J]. Food Chemistry,2018,256:149-155.
[25] THAKKER M R,PARIKH J K,DESAI M A. Synergism between ionic liquid and ultrasound for greener extraction of geraniol:optimization using different statistical tools,comparison and prediction[J]. Chemical Engineering Research and Design,2018,134:162-171.
[26] 郭亚鹏. 三种藜麦多酚抗氧化活性及稳定性研究[D]. 郑州:河南工业大学,2021.
[27] 李利华,宋凤敏,郭豫梅. 桂皮多酚的提取及稳定性研究[J]. 中国调味品,2019,44(11):18-21.
LI L H,SONG F M,GUO Y M. Study on extraction and stability of cinnamon polyphenols[J]. China Condiment,2019,44(11):18-21.(in Chinese)
[28] 王萍,王宇鹤,李辉,等. 枇杷核不同极性萃取物总黄酮、总多酚含量与其抗氧化活性的相关性[J]. 化学试剂,2020,42(9):1067-1072.
WANG P,WANG Y H,LI H,et al. Correlation between the content total flavonoids and total polyphenols in loquat nuclear with different extracts and their antioxidant activities[J]. Chemical Reagents,2020,42(9):1067-1072.(in Chinese)

（责任编辑：闫林红）

（上接第38页）

[25] KUMAR M,RANA S,BENIWAL V,et al. Optimization of tannase production by a novel *Klebsiella pneumoniae* KP715242 using central composite design[J]. Biotechnology Reports,2015,7:128-134.
[26] RAGHUWANSHI S,DUTT K,GUPTA P,et al. *Bacillus sphaericus*: the highest bacterial tannase producer with potential for gallic acid synthesis[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering,2011,111(6):635-640.
[27] TRIPATHI A D,LAKSHMI B. Statistical optimization of extracellular tannase production by *Streptomyces* sp. AT 13 using response surface methodology and Plackett-Burmen design[J]. Bioscience Biotechnology Research Communications,2018,11(4):691-698.
[28] JIMÉNEZ N,ESTEBAN-TORRES M,MANCHEÑO J M,et al. Tannin degradation by a novel tannase enzyme present in some *Lactobacillus plantarum* strains[J]. Applied and Environmental Microbiology,2014,80(10):2991-2997.
[29] 陈一凡,阚新意,蒋晓岚,等. 茶树单宁酶CsTA的理化性质及其在绿茶饮料中的应用[J]. 茶叶科学,2023,43(1):124-134.
CHEN Y F,KAN X Y,JIANG X L,et al. Physicochemical properties of tannase in tea plants(*Camellia sinensis*) and its application on green tea beverages[J]. Journal of Tea Science,2023,43(1):124-134.(in Chinese)
[30] YOU X,QIN Z,LI Y X,et al. Structural and biochemical insights into the substrate-binding mechanism of a novel glycoside hydrolase family 134 β-mannanase[J]. Biochimica et Biophysica Acta(BBA)-General Subjects,2018,1862(6):1376-1388.
[31] 靳燕,李延啸,马俊文,等. 嗜热杜邦菌α-淀粉酶的定向进化及高效表达[J]. 食品工业科技,2022,43(13):139-147.
JIN Y,LI Y X,MA J W,et al. Directed evolution and high-level expression of α-amylase from *Thermomyces dupontii*[J]. Science and Technology of Food Industry,2022,43(13):139-147.(in Chinese)
[32] MATOBA Y,TANAKA N,NODA M,et al. Crystallographic and mutational analyses of tannase from *Lactobacillus plantarum*[J]. Proteins: Structure,Function,and Bioinformatics,2013,81(11):2052-2058.
[33] SCHARBERT S,HOLZMANN N,HOFMANN T. Identification of the astringent taste compounds in black tea infusions by combining instrumental analysis and human bioresponse[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2004,52(11):3498-3508.
[34] KIM M,PARK S K. Effects of enzyme treatment on volatile and non-volatile compounds in dried green tea leaves[J]. Food Science and Biotechnology,2022,31(5):539-547.

（责任编辑：史润东东）