DOI:10.12441/spyswjs.20241207001 [文章编号] 1673-1689(2025)08-0097-10

茶花多酚提取工艺优化及其抗氧化、降血糖活性分析

陈 龙[1,2] 杨晓聪[1,2] 邢淑婕[2,3] 史欣窈[1] 郑雪珂[1,2] 朱 静[1,2*]

(1. 信阳农林学院食品科学与工程学院,河南 信阳 464399; 2. 河南省大别山特色食物资源综合利用工程技术研究中心,河南 信阳 464399; 3. 漯河职业技术学院食品技术创新学院,河南 漯河 462002)

摘要:【目的】优化茶花(*Camellia japonica*,*C. japonica*)多酚提取工艺,并初步研究茶花多酚抗氧化、降血糖等功能特性,以提高茶花利用率。**【方法】**以信阳毛尖茶花为原料,采用超声波辅助法提取茶花多酚,并对其抗氧化、降血糖活性进行分析。以茶花多酚提取率为评价指标,采用响应面法探究乙醇体积分数、料液比、提取时间、超声功率对茶花多酚提取率的影响。**【结果】**当乙醇体积分数为54%、料液比为1 g∶33 mL、提取时间为49.5 min、超声功率为210 W时,验证试验的实际提取率为12.60%,相对标准偏差(RSD)为2.28%,优化结果可靠。此外,茶花多酚对DPPH自由基、羟基自由基和$ABTS^+$自由基具有较强的清除能力,且该清除能力与茶花多酚质量浓度呈正相关,其半抑制质量浓度(IC_{50})分别为0.044、0.065、0.068 mg/mL。茶花多酚对α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶的活性有良好的抑制作用,其IC_{50}分别为0.054、0.057 mg/mL。**【结论】**茶花多酚可作为一种较好的天然抗氧化剂和降糖剂,具有潜在的应用价值,该研究可为茶花精细化加工提供理论依据。

关键词:茶花;多酚;提取工艺;抗氧化;降血糖

Extraction Process Optimization and Antioxidant and Blood Glucose-lowering Effect Evaluation of Polyphenols from *Camellia japonica* Flowers

CHEN Long[1,2] *YANG Xiaocong*[1,2] *XING Shujie*[2,3] *SHI Xinyao*[1] *ZHENG Xueke*[1,2] *ZHU Jing*[1,2*]

(1. School of Food Science and Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464399, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Characteristic Food Resources in Dabie Mountains, Xinyang 464399, China; 3. Institute of Food Technology and Innovation, Luohe Vocational Technology College, Luohe 462002, China)

Abstract: [**Objective**] This study optimized the extraction process of polyphenols from *Camellia japonica* (*C. japonica*) flowers and preliminarily explored the antioxidant and blood glucose-lowering effects of the extracted polyphenols, aiming to improve the utilization of *C. japonica* flowers. [**Method**] With the flowers of Xinyang Maojian as raw materials, the ultrasonic-assisted method was adopted to extract polyphenols from *C. japonica* flowers, and the antioxidant and blood glucose-lowering activities of the extracted polyphenols were analyzed. With the extraction rate of polyphenols from *C. japonica* flowers as the evaluation index, the response surface methodology was adopted to explore the effects of ethanol volume fraction, solid-liquid ratio, extraction time, and ultrasonic power on the extraction rate of polyphenols from *C. japonica* flowers. [**Result**] Under the conditions of the ethanol volume fraction of 54%, the solid-liquid ratio of 1 g∶33 mL, the extraction time of 49.5 min, and the ultrasonic power of 210 W, the actual extraction rate obtained from verification experiment was 12.60%,

基金项目:河南省重点研发专项项目(231111312800);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(232102230071,242102110090);河南省高等学校重点科研计划项目(24B550017,24B180016,25B550014);信阳农林学院科技创新团队项目(XNKJTD-001)。

通信作者:朱静(1982—),女,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事发酵食品研究。E-mail:zhujingcy@163.com

收稿日期:2024-12-07 **修回日期:**2025-02-27

with a relative standard deviation (RSD) of 2.28%, which indicated that the optimization results were reliable. In addition, the polyphenols from *C. japonica* flowers had strong scavenging abilities against DPPH, hydroxyl, and $ABTS^+$ free radicals. The scavenging abilities were positive correlated with the mass concentration of the extracted polyphenols, and the half-inhibitory mass concentrations (IC_{50}) were 0.044, 0.065, and 0.068 mg/mL, respectively. The extracted polyphenols had good inhibitory effects on the activities of α-glucosidase and α-amylase, with the IC_{50} of 0.054 and 0.057 mg/mL, respectively. [**Conclusion**] The polyphenols from *C. japonica* flowers can be used as a good natural antioxidant and blood glucose-lowering agent, demonstrating potential application value. This study provides a theoretical foundation for the refined processing of *C. japonica* flowers.

Keywords: *Camellia japonica*; polyphenol; extraction process; antioxidant; lowering blood glucose

茶花是山茶科山茶属植物，是一种可再生且无需栽种培育的天然资源，茶圣陆羽在《茶经》中就用“花如白蔷薇”来形容茶花[1]。茶花中富含多种生物活性成分，包括茶多酚、茶氨酸、蛋白质、氨基酸、茶皂素、茶多糖和黄酮类化合物等[2]，其中茶多酚质量分数为3.62%~4.48%（以干质量计）、总糖质量分数为16.15%~23.25%（以干质量计）、茶氨酸质量分数为3.92%~5.03%（以干质量计）。茶花还具有生津解渴、增强免疫力以及控制血糖和血脂水平的效果，对于糖尿病、发热咽痛、高血压等疾病有一定的辅助治疗效果[3]。此外，高含量的茶多酚也赋予了茶花优异的抗氧化、抗菌能力[4]。目前，茶花不止应用于食品领域，其在日常洗涤用品、医药以及保健品领域均有广泛的应用[5-6]。深层开发茶花的功能特性有助于进一步拓展茶产业链以及提升产品经济价值[7]。

我国山茶属植物资源丰富[8]，信阳市位于北亚热带与暖温带的过渡区，气候温和，雨量充沛，日照时间长，茶花品质特征优异、茶多酚含量高，信阳毛尖茶花是理想的茶多酚提取材料。但信阳市更加重视茶叶资源的开发利用，茶花的利用率较低，因此茶花折损率较高，基本都是自然脱落，造成了茶花资源浪费。目前，对于茶花的研究主要集中在贵州金花茶花，而关于信阳茶花的报道较少。研究表明，金花茶花具有多种保健功能，包括延缓衰老、预防癌变、预防人体动脉粥样硬化等功效[9-12]。基于此，作者拟探究信阳茶花多酚的提取工艺，并对信阳茶花多酚的抗氧化及降血糖功能进行研究。我国关于茶多酚的提取方法较多，包括超声波辅助提取法、酶提取法、溶剂浸提法等，其中最为常见的是超声波辅助提取法[2]。茶花多酚的提取效率及质量受料液比、提取时间、乙醇体积分数以及超声功率等条件的影响，因此，有必要进一步优化茶花多酚的提取工艺，并对其功能特性进行研究。

作者采用响应面法对茶花多酚提取工艺中的乙醇体积分数、料液比、提取时间、超声功率共4个关键因素进行优化，以提高茶花多酚的提取率，并对其抗氧化和降血糖活性进行分析，为茶花在食品、保健品和药物开发等领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

信阳毛尖茶花：采自信阳市董家河镇余庙村老岗山，经干燥、粉碎、过筛后制成茶花粉。

无水乙醇（分析纯）、硫酸亚铁（分析纯）、无水碳酸钠（分析纯）、可溶性淀粉（分析纯）、盐酸（分析纯）、水杨酸（分析纯）、α-淀粉酶（20 U/mL）等：郑州派尼化学试剂厂；没食子酸、酒石酸钾钠：分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；氢氧化钠：分析纯，天津市大茂化学试剂厂；对硝基苯基-β-*D*-吡喃半乳糖苷（PNPG）试剂（分析纯）、二硝基水杨酸（DNS）试剂（分析纯）、α-葡萄糖苷酶（100 U/mg）：上海源叶生物科技有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）试剂、维生素C（VC）：分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；阿卡波糖片：纯度≥95%，拜耳医药保健有限公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平：CP214型，奥纳思克（上海）仪器设备有限公司；电热恒温水浴锅：DZKW-D-2型，上海安亭科学仪器厂；离心机：DZ267-32C6型，上海安亭科学仪器厂；电热恒温鼓风干燥箱：DHG-9240A（101A-36）型，上海跃进医疗器械有限公司；超声波清洗机：GN-100S型，深圳歌能清洗设备有限公司；紫外可见分光光度计：A390型，翱艺仪器（上海）有限公司；粉碎机：800C型，永康市红太阳机电有限公司；冷冻干燥机：FD-1A-50型，上海比郎仪器制造公司。

1.3　方法

1.3.1　茶花多酚提取及功能分析工艺流程

茶花→粉碎机粉碎→烘箱烘干→超声波辅助提取→3 000 r/min离心15 min→取上清液测吸光度→干燥→抗氧化活性分析→降血糖活性分析。

1.3.2　标准曲线的绘制与茶花多酚提取率的测定

参照都昌乐等[13]和谢佳函等[14]的方法并稍加修改，测定没食子酸标准品的吸光度，以没食子酸质量浓度为横坐标、吸光度为纵坐标绘制标准曲线，得到回归方程为：y=0.000 4x−0.003 4，R^2=0.991 3。

按照单因素试验和正交试验设置的条件参数制备茶花混合液，吸取上清液1.0 mL，置于25.0 mL容量瓶内，加4.0 mL蒸馏水和5.0 mL酒石酸亚铁溶液，用磷酸盐缓冲液（pH 7.5）定容。以试剂空白作为参比，于540 nm波长处测吸光度。同时称取等量茶花粉溶液至25.0 mL容量瓶中（不加酒石酸亚铁溶液），按上述操作定容后测定吸光度，以试剂空白作为参比。按式（1）计算茶花多酚提取率。

$$Y=\frac{C\times V\times N}{1\,000\times m}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

Y——茶花多酚提取率，%；

C——茶花多酚质量浓度，mg/mL；

N——稀释倍数；

V——茶花多酚提取液体积，mL；

m——茶花粉质量，g。

1.3.3　单因素试验设计

1）乙醇体积分数对茶花多酚提取率的影响：准确称取5份1 g茶花粉，在料液比1 g∶30 mL、提取时间45 min、超声功率210 W的条件下，分别加入体积分数为30%、40%、50%、60%、70%的乙醇溶液，于45 ℃条件下提取茶花多酚，测定乙醇体积分数对茶花多酚提取率的影响。

2）料液比对茶花多酚提取率的影响：准确称取5份1 g茶花粉，在乙醇体积分数50%、提取时间45 min、超声功率210 W的条件下，设置料液比分别为1 g∶20 mL、1 g∶30 mL、1 g∶40 mL、1 g∶50 mL、1 g∶60 mL，于45 ℃条件下提取茶花多酚，测定料液比对茶花多酚提取率的影响。

3）提取时间对茶花多酚提取率的影响：准确称取5份1 g茶花粉，在乙醇体积分数50%、料液比1 g∶30 mL、超声功率210 W的条件下，于45 ℃条件下分别超声15、30、45、60、75 min以提取茶花多酚，测定超声提取时间对茶花多酚提取率的影响。

4）超声功率对茶花多酚提取率的影响：准确称取5份1 g茶花粉，在乙醇体积分数50%、料液比1 g∶30 mL、提取时间45 min的条件下，设置超声功率分别为120、150、180、210、240 W，于45 ℃条件下提取茶花多酚，测定超声功率对茶花多酚提取率的影响。

1.3.4　响应面试验设计

根据单因素试验结果确定显著性因素的3个水平，并以茶花多酚提取率为响应值，利用Box-Behnken模型进行茶花多酚提取工艺的响应面优化设计。

1.3.5　抗氧化活性测定

1）DPPH自由基清除能力的测定：在试管中加入2 mL质量浓度分别为0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/mL的茶花多酚提取液和3 mL 2 mmol/L DPPH-乙醇工作液，避光条件下反应30 min，于517 nm处测定吸光度[15]，用无水乙醇替代DPPH-乙醇工作液作为对照组，用无水乙醇替代茶花多酚提取液作为空白组，以VC作为阳性对照，重复测定3次。茶花多酚的DPPH自由基清除率按式（2）计算。

$$R_1=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100\% \quad (2)$$

式中：

R_1——DPPH自由基清除率，%；

A_0——空白组吸光度；

A_1——样品组吸光度；

A_2——对照组吸光度。

2）羟基自由基清除能力的测定：在试管中加入2 mL质量浓度分别为0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/mL的茶花多酚提取液，再加入2 mL 1.5 mmol/L $FeSO_4$、1 mL 3 mmol/L水杨酸−乙醇溶液和2 mL体积分数0.1%的H_2O_2，混匀，于37 ℃下反应30 min，冷却至室温后于512 nm处测定吸光度，用蒸馏水替代H_2O_2作为对照组，用蒸馏水替代茶花多酚提取液作为空白组，以VC作为阳性对照[16]，重复测定3次。茶花多酚的羟基自由基清除率按式（3）计算。

$$R_2=\left(1-\frac{A_4-A_5}{A_3}\right)\times 100\% \quad (3)$$

式中：

R_2——羟基自由基清除率，%；

A_3——空白组吸光度；

A_4——样品组吸光度；

A_5——对照组吸光度。

3）$ABTS^+$自由基清除能力的测定：将 5.0 mL 7.0 mmol/L 的 $ABTS^+$ 自由基溶液和 1.0 mL 15 mmol/L 的 $K_2S_2O_8$ 溶液混合均匀，于室温下避光放置 24 h，得到 $ABTS^+$ 自由基工作液。将 1 mL 不同质量浓度（0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/mL）的茶花多酚提取液与 3 mL $ABTS^+$ 自由基工作液充分混匀。于室温下避光反应 15 min，于 734 nm 波长处测定吸光度，用 3 mL 蒸馏水替代 $ABTS^+$ 自由基工作液作为对照组，用蒸馏水替代茶花多酚提取液作为空白组，以 VC 作为阳性对照[17]，重复测定 3 次。$ABTS^+$ 自由基清除率按式（4）计算。

$$R_3=\left(1-\frac{A_7-A_8}{A_6}\right)\times 100\% \quad (4)$$

式中：

R_3——$ABTS^+$ 自由基清除率，%；

A_6——空白组吸光度；

A_7——样品组吸光度；

A_8——对照组吸光度。

1.3.6 降血糖活性测定

1）茶花多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用：将 0.5 mL 0.2 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶溶液与 0.5 mL 茶花多酚提取液混合，在 37 ℃的条件下水浴 20 min，加入 1 mL 磷酸盐缓冲液（pH 7.5）和 0.5 mL 0.3 mg/mL 的 PNPG 试剂，在 37 ℃的条件下水浴 20 min，加入 1 mL 0.2 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液终止反应，测定 405 nm 波长处的吸光度，以阿卡波糖代替茶花多酚提取液作为阳性对照[18]。α-葡萄糖苷酶抑制率按式（5）计算。

$$R_4=\left(1-\frac{A_{10}-A_{11}}{A_9}\right)\times 100\% \quad (5)$$

式中：

R_4——α-葡萄糖苷酶抑制率，%；

A_9——不加茶花多酚提取液的酶反应液的吸光度；

A_{10}——加入茶花多酚提取液后酶反应液的吸光度；

A_{11}——只加茶花多酚提取液的溶液的吸光度。

2）茶花多酚对 α-淀粉酶的抑制作用：参照羡荣华等[19]的方法并稍加改动，取 0.5 mL 1 U/mL 的 α-淀粉酶溶液和 0.5 mL 茶花多酚提取液混合，于 37 ℃水浴 15 min，加入 1 mL 质量分数 1% 的淀粉溶液，于 37 ℃水浴 10 min，加入 1 mL DNS 试剂，沸水浴 15 min，冷却后于 540 nm 波长处测定吸光度，以阿卡波糖代替茶花多酚提取液作为阳性对照组，按上述方法处理。α-淀粉酶抑制率按式（6）计算。

$$R_5=\left(1-\frac{A_{13}-A_{14}}{A_{12}}\right)\times 100\% \quad (6)$$

式中：

R_5——α-淀粉酶抑制率，%；

A_{12}——不加茶花多酚提取液的酶反应液的吸光度；

A_{13}——加入茶花多酚提取液后酶反应液的吸光度；

A_{14}——只加茶花多酚提取液的溶液的吸光度。

1.3.7 数据处理

采用 Excel 2016、SPSS 26.0、Design-Expert V8.0.6.1、Origin 2021 分析数据和绘图。

2 结果与讨论

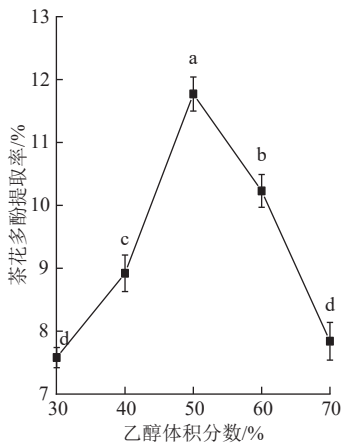
2.1 单因素试验结果分析

2.1.1 乙醇体积分数对茶花多酚提取率的影响分析

由图 1 可知，茶花多酚提取率随着乙醇体积分数的增加先升高后降低。在乙醇体积分数为 50% 时，茶花多酚提取率达到最大值（11.70%），之后茶花多酚提取率随着乙醇体积分数的增加而降低，这可能是由于过高的乙醇体积分数会导致酚类、蛋白质等大分子物质沉淀[20]。因此，最佳乙醇体积分数为 50%。

2.1.2 料液比对茶花多酚提取率的影响分析

由图 2 可知，料液比分别为 1 g∶20 mL、

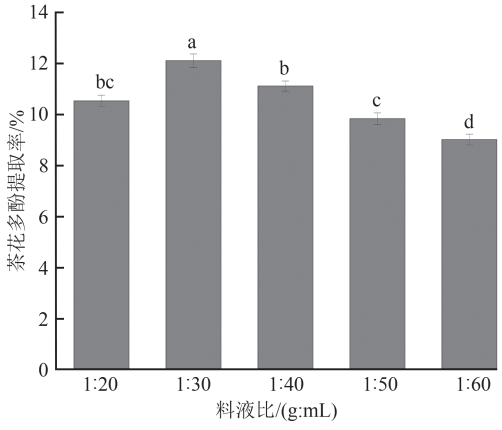


不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

图 1 乙醇体积分数对茶花多酚提取率的影响

Fig. 1 Effect of ethanol volume fraction on the extraction rate of polyphenols from *C. japonica* flowers

1 g∶30 mL时，茶花多酚提取率上升；茶花多酚提取率在料液比为1 g∶30 mL时达到最大值（12.17%）；当料液比分别为1 g∶30 mL、1 g∶40 mL、1 g∶50 mL、1 g∶60 mL时，茶花多酚提取率呈下降趋势。这可能由多种原因导致：料液比过高时，提取溶剂体积过大，导致茶花多酚的溶解度增加，但单位体积提取溶剂中的茶花多酚水平降低，溶剂分子也会减弱超声波对茶花多酚的提取作用[21]；并且料液比过高时，过量乙醇会导致酚类等大分子物质沉淀[20]；此外，提取溶剂体积增加可能导致茶花粉中其他非茶花多酚类物质（如蛋白质、多糖等）的溶出量增加，这些物质可能与茶花多酚竞争溶剂或形成复合物，阻碍茶花多酚的进一步溶解[22]。因此，最佳料液比为1 g∶30 mL。



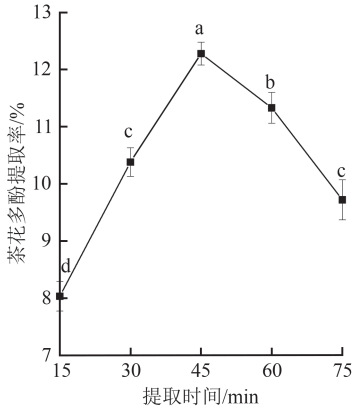
不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

图2　料液比对茶花多酚提取率的影响

Fig. 2　Effect of solid-liquid ratio on the extraction rate of polyphenols from *C. japonica* flowers

2.1.3　提取时间对茶花多酚提取率的影响分析

由图3可知，茶花多酚提取率随着提取时间的延长先上升后下降。在提取时间为45 min时，茶花多酚提取率达到最大值（12.28%），说明超声能有效促进茶花多酚的提取。但随着提取时间继续延长，茶花多酚提取率显著下降，这可能是因为长时间的超声处理导致局部温度升高，引起茶花粉中的酚类物质受到破坏，从而导致茶花多酚提取率降低[23]。此外，随着提取时间的延长，超声波的空化效应和机械效应会导致多酚空间构型改变，随着其他杂质的溶出，茶花多酚的溶出速度减慢，且过长的提取时间会增大溶液黏度和溶液体系中的传质阻力，不利于多酚溶出[24]。因此，最佳提取时间为45 min。



不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

图3　提取时间对茶花多酚提取率的影响

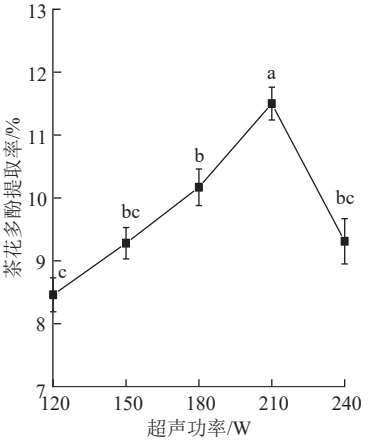
Fig. 3　Effect of extraction time on the extraction rate of polyphenols from *C. japonica* flowers

2.1.4　超声功率对茶花多酚提取率的影响

超声功率对茶花多酚提取率的影响见图4。茶花多酚提取率随超声功率的增加先上升后下降，当超声功率为210 W时，茶花多酚提取率达到最大值（11.50%）。这可能是因为适当提升超声功率会促进提取液的流动，有助于茶花多酚的提取。但过高的超声功率可能会提高局部温度，引起目标成分的热降解，降低茶花多酚提取率。此外，过高的超声功率可能导致空化气泡破裂时产生的冲击波过强，破坏茶花多酚的分子结构，从而降低其稳定性，最终导致提取率下降[25-26]。因此，最佳超声功率为210 W。

2.1.5　单因素方差分析结果

单因素试验方差分析结果表明，乙醇体积分



不同小写字母代表差异显著（$P<0.05$）。

图4　超声功率对茶花多酚提取率的影响

Fig. 4　Effect of ultrasonic power on the extraction rate of polyphenols from *C. japonica* flowers

数（P=3.0×10^{-6}）、料液比（P=2.7×10^{-5}）、提取时间（P=7.0×10^{-6}）、超声功率（P=2.0×10^{-4}）对茶花多酚提取率的影响均达到极显著水平（P<0.01）。因超声功率属于固定档位，单因素试验可直接优化出最优值，故选择乙醇体积分数、料液比和提取时间进行响应面试验。

2.2 响应面试验结果分析

2.2.1 试验方案及方差分析结果

利用 Box-Behnken 模型，以乙醇体积分数（A）、料液比（B）、提取时间（C）为影响因素设计响应面试验，茶花多酚提取的试验设计方案及结果如表 1 所示。

表 1 Box-Behnken 设计方案和试验结果

Table 1 Box-Behnken design scheme and test results

序号	乙醇体积分数/%	料液比/（g∶mL）	提取时间/min	提取率/%
1	50	1∶20	60	8.90
2	40	1∶40	45	10.10
3	50	1∶30	45	13.35
4	50	1∶30	45	12.85
5	60	1∶30	60	11.80
6	40	1∶20	45	10.90
7	50	1∶30	45	11.85
8	40	1∶30	30	10.20
9	60	1∶30	30	9.20
10	50	1∶30	45	12.43
11	40	1∶30	60	10.35
12	50	1∶40	30	8.50
13	50	1∶30	45	12.85
14	60	1∶20	45	9.10
15	50	1∶40	60	10.70
16	60	1∶40	45	11.90
17	50	1∶20	30	9.70

2.2.2 回归方程的方差分析

由表 2 可知，一次项 A、B 不显著，一次项 C 和交互项 AC、BC 显著，交互项 AB 极显著，通过 F 值可确定各因素对茶花多酚提取率的影响顺序为：C>B>A。

2.2.3 回归方程的误差统计分析

由 Design-Expert V8.0.6.1 软件得出茶花多酚提取率的二次回归方程为：y=12.67+0.056A+0.33B+0.52C+0.90AB+0.61AC+0.75BC−0.61A^2−1.55B^2−1.66C^2，y 代表茶花多酚提取率，多元相关系数 R^2=0.953 1，接近于 1，说明方程相关性优良。变异系数为 0.73%（<4%），表明试验的可靠性和准确性

表 2 方差分析

Table 2 Analysis of variance

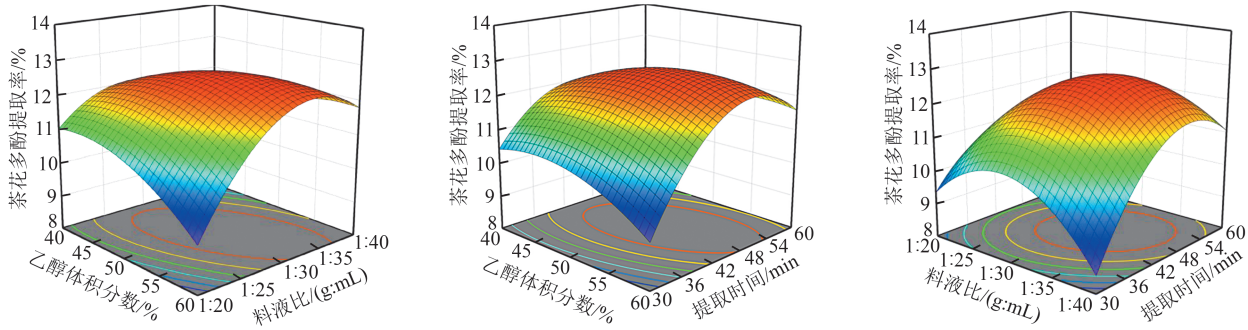
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	35.69	9	3.970	15.81	0.000 7	**
A	0.03	1	0.025	0.10	0.760 0	
B	0.85	1	0.850	3.37	0.109 0	
C	2.15	1	2.150	8.59	0.022 0	*
AB	3.24	1	3.240	12.92	0.008 8	**
AC	1.50	1	1.500	5.98	0.044 3	*
BC	2.25	1	2.250	8.97	0.020 1	*
A^2	1.59	1	1.590	6.34	0.040 0	*
B^2	10.14	1	10.140	40.43	0.000 4	**
C^2	11.66	1	11.660	46.51	0.000 2	**
残差	1.76	7	0.250			
失拟项	0.50	3	0.170	0.53	0.686 4	
纯误差	1.26	4	0.310			
总和	37.44	16				

注：“*”代表差异显著（P<0.05）；“**”代表差异极显著（P<0.01）。

相当高，精密度为 10.831（>4），表明该模型是合理的。从二次回归方程可知，茶花多酚提取率与各工艺参数之间存在显著的非线性关系。模型解析显示，提取时间对茶花多酚提取率的独立正向影响最为显著；乙醇体积分数与料液比之间存在强烈的协同增效交互作用。此外，所有因素的二次项系数均为负值，证实茶花多酚提取率随参数升高均呈现先增后降的趋势，表明存在明确的极值点。

2.2.4 响应面分析

各因素交互作用响应面结果见图 5。由图 5（a）可知，响应曲面呈现明显的凸起形态，对应的等高线图呈现出椭圆形态，表明乙醇体积分数与料液比存在明显的交互作用。在乙醇体积分数适中、料液比较低的区域，茶花多酚提取率达到较高值。由图 5（b）可知，该响应面对应的等高线图同样呈现明显的椭圆形，表明在一定的提取时间范围内，乙醇体积分数和提取时间存在明显的交互作用，随着乙醇体积分数的增加，茶花多酚提取率呈现上升趋势；但当提取时间过长时，高乙醇体积分数时的茶花多酚提取率呈下降趋势，提取时间与乙醇体积分数适中时的协同作用影响较大，说明两者需协调控制以优化提取过程。由图 5（c）可知，该响应曲面更为平缓，且对应的等高线图更接近于圆形，表明料液比与提取时间之间的交互作用相对较弱。在料液比适中、提取时间较短的条件下，茶花多酚提取率较高。



(a) 乙醇体积分数和料液比的交互作用响应面图　(b) 乙醇体积分数和提取时间的交互作用响应面图　(c) 液料比和提取时间的交互作用响应面图

图5　各因素交互作用响应面图

Fig. 5　Response surface plots of the interactions between various factors

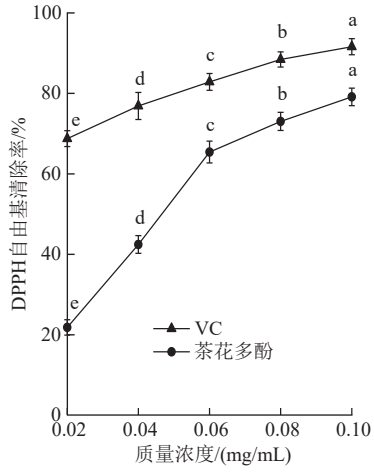
2.2.5　验证试验结果分析

根据响应面分析结果得到最优工艺参数为：乙醇体积分数54.13%、料液比1 g∶32.97 mL、提取时间49.49 min，在此条件下，茶花多酚的理论提取率为12.80%。为了便于试验操作，将工艺参数调整为：乙醇体积分数54%、料液比1 g∶33 mL、提取时间49.5 min，为了验证在此优化工艺条件下的提取率，准确称取1 g茶花粉，分别进行5次平行试验，得到茶花多酚的实际提取率为12.60%，RSD为2.28%，这验证了数据模型的合理性和可靠性，说明该模型具有良好的预测效果。

2.3　抗氧化活性结果分析

2.3.1　茶花多酚对DPPH自由基的清除能力

如图6所示，当质量浓度为0.02~0.10 mg/mL时，茶花多酚溶液与VC均显示出较好的DPPH自由基清除能力，且随着溶液质量浓度的增加呈现显著增强的趋势（P<0.05），两者的DPPH自由基清除率分别为21.84%~79.14%、68.76%~91.60%。茶花多酚和VC的DPPH自由基清除能力的IC_{50}分别为0.044、0.009 mg/mL，IC_{50}越低，抗氧化能力越强。该结果表明，茶花多酚的DPPH自由基清除能力虽弱于VC，但其抗氧化活性仍存在显著的质量浓度依赖性。



同一物质不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

图6　VC和茶花多酚的DPPH自由基清除能力对比

Fig. 6　Comparison of DPPH radical scavenging ability between VC and polyphenols from *C. japonica* flowers

2.3.2　茶花多酚对羟基自由基的清除能力

如图7所示，茶花多酚和VC均具备较好的羟基自由基清除能力，其清除效果与质量浓度呈正相关，随着质量浓度的上升，茶花多酚对羟基自由基的清除能力显著提升（P<0.05）。当质量浓度为0.10 mg/mL时，VC的羟基自由基清除率最大（91.93%），而茶花多酚的羟基自由基清除率为59.57%。茶花多酚的羟基自由基清除能力的IC_{50}为0.065 mg/mL，而VC的IC_{50}为0.013 mg/mL，该结果证实了茶花多酚在羟基自由基清除体系中同样具备有效活性。

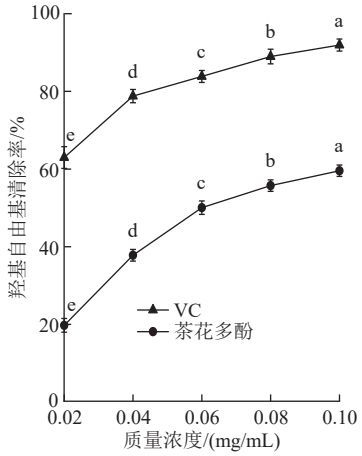
2.3.3　茶花多酚对$ABTS^+$自由基的清除能力

如图8所示，$ABTS^+$自由基清除率随着茶花多酚和VC质量浓度的上升而增加，当质量浓度为0.10 mg/mL时，VC的$ABTS^+$自由基清除率可达到91.00%，茶花多酚的$ABTS^+$自由基清除率为58.57%。茶花多酚对$ABTS^+$自由基清除能力的IC_{50}为0.068 mg/mL，VC的IC_{50}为0.026 mg/mL。虽然VC清除$ABTS^+$自由基的能力明显优于茶花多酚，但从图中仍可看出茶花多酚具有较强的$ABTS^+$自由基清除能力。

2.4　降血糖活性结果分析

2.4.1　茶花多酚对α-葡萄糖苷酶活性的抑制作用

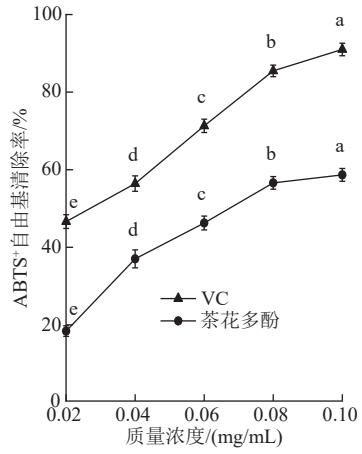
阿卡波糖是目前控制2型糖尿病的主要药物，但其存在引起患者腹痛、排气增多等副作用，也可能



同一物质不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

图 7　VC 和茶花多酚的羟基自由基清除能力的对比

Fig. 7　Comparison of hydroxyl radical scavenging ability between VC and polyphenols from *C. japonica* flowers



同一物质不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

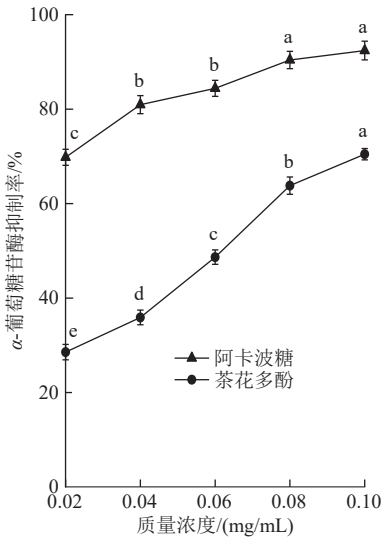
图 8　VC 和茶花多酚的 $ABTS^+$ 自由基清除能力的对比

Fig. 8　Comparison of $ABTS^+$ radical scavenging ability between VC and polyphenols from *C. japonica* flowers

导致患者出现荨麻疹、皮疹等皮肤过敏反应[27]。如图 9 所示，茶花多酚的 α-葡萄糖苷酶抑制率随着质量浓度的增加而提高，但其总体抑制效果低于阿卡波糖。当质量浓度为 0.10 mg/mL 时，茶花多酚和阿卡波糖的 α-葡萄糖苷酶抑制率均达到峰值，分别为 70.45% 和 92.40%。茶花多酚对 α-葡萄糖苷酶抑制作用的 IC_{50} 为 0.054 mg/mL，而阿卡波糖对 α-葡萄糖苷酶抑制作用的 IC_{50} 为 0.020 mg/mL，表明茶花多酚对 α-葡萄糖苷酶活性具有一定抑制效果。

2.4.2　茶花多酚对 α-淀粉酶活性的抑制作用

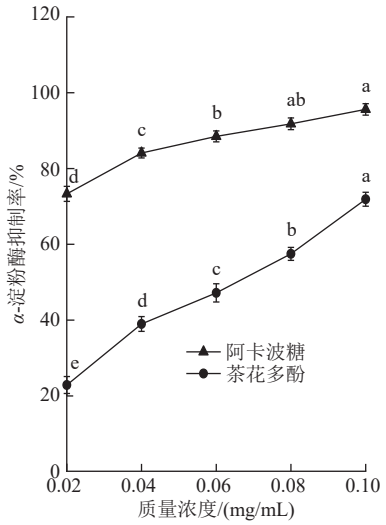
由图 10 可知，茶花多酚和阿卡波糖的 α-淀粉酶抑制率均随着质量浓度的增加而提高。在茶花多酚质量浓度为 0.10 mg/mL 时，α-淀粉酶抑制率为 71.90%，茶花多酚对 α-淀粉酶活性抑制作用的 IC_{50} 为 0.057 mg/mL，阿卡波糖对 α-淀粉酶活性抑制作用的 IC_{50} 为 0.008 mg/mL，表明茶花多酚具备一定的抑制 α-淀粉酶活性的能力。



同一物质不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

图 9　茶花多酚对 α-葡萄糖苷酶抑制率的影响

Fig. 9　Inhibition rate of polyphenols from *C. japonica* flowers on α-glucosidase



同一物质不同小写字母代表差异显著（P<0.05）。

图 10　茶花多酚对 α-淀粉酶抑制率的影响

Fig. 10　Inhibition rate of polyphenols from *C. japonica* flowers on α-amylase

3　结论

作者以信阳毛尖茶花为原料，利用超声波辅助法提取茶花多酚，通过单因素试验和响应面试验确定其最优工艺参数。结果表明，当乙醇体积

分数为54%、料液比为1 g∶33 mL、提取时间为49.5 min、超声功率为210 W时，验证试验的茶花多酚实际提取率为12.60%。抗氧化、降血糖活性研究结果表明，茶花多酚对DPPH自由基、羟基自由基和$ABTS^+$自由基均具有显著的清除能力，且与茶花多酚质量浓度呈正相关，其IC_{50}分别为0.044、0.065、0.068 mg/mL。茶花多酚对α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶的活性均有显著的抑制效果，其IC_{50}分别为0.054、0.057 mg/mL。由此可见，茶花多酚可作为一种潜在的天然抗氧化剂和降糖剂。

目前研究结果是基于粗提物的整体生物活性，其中茶花多酚类物质可能起主要作用，但茶花中的多糖（如茶多糖等）、皂苷（如茶皂苷等）等活性成分也可能通过协同作用发挥功效。后续将通过组分分离和标准化处理，建立特定成分与生物活性的量效关系，特别是需要排除多糖通过延缓葡萄糖吸收、皂苷通过调节胰岛素信号通路等机制产生的影响。该研究为茶花多酚在食品及医药领域的应用提供了理论基础。

参考文献

[1] 胡海艳. 清代宫廷文献中的药膳方整理研究[D]. 合肥：安徽中医药大学，2021.

[2] 许金伟，张星海，赵鏊，等. 茶树花中功能性成分的提取与分析研究[J]. 广州化工，2014，42(3)：65-67.
XU J W，ZHANG X H，ZHAO L，et al. The extraction and analysis of functional compositions in tea tree flowers[J]. Guangzhou Chemical Industry，2014，42(3)：65-67.(in Chinese)

[3] 刁梦瑶，申琳，生吉萍. 茶树花资源研究利用现状与展望[J]. 中国食物与营养，2017，23(12)：24-28.
DIAO M Y，SHEN L，SHENG J P. The status and prospect of utilization of tea (*Camellia sinensis*) flower [J]. Food and Nutrition in China，2017，23(12)：24-28.(in Chinese)

[4] WAY T D，LIN H Y，HUA K T，et al. Beneficial effects of different tea flowers against human breast cancer MCF-7 cells[J]. Food Chemistry，2009，114(4)：1231-1236.

[5] 陈美链. 茶树花真空冷冻干燥工艺优化及茶树花肉脯开发研究[D]. 福州：福建农林大学，2023.

[6] CHEN D，DING Y，CHEN G J，et al. Components identification and nutritional value exploration of tea (*Camellia sinensis* L.) flower extract：evidence for functional food[J]. Food Research International，2020，132：109100.

[7] 田采云，周承哲，傅海峰，等. 茶树花的保健功效及其研究进展[J]. 园艺与种苗，2019，39(6)：6-10.
TIAN C Y，ZHOU C Z，FU H F，et al. Health function and research progress of tea flower[J]. Horticulture & Seed，2019，39(6)：6-10.(in Chinese)

[8] 闵天禄，张文驹. 山茶属植物的进化与分布[J]. 云南植物研究，1996(1)：1-13.
MIN T L，ZHANG W J. The evolution and distribution of genus *Camellia*[J]. Acta Botanica Yunnanica，1996(1)：1-13.(in Chinese)

[9] 梅南菊. 金花茶提取物的制备及对H9C2心肌细胞的保护作用研究[D]. 天津：天津商业大学，2023.

[10] 吴清孝. 金花茶花浸提物体外抑制胃蛋白酶和胰蛋白酶的作用效果研究[D]. 湛江：广东海洋大学，2021.

[11] 李美玲，彭健玲，江海都，等. 9种金花茶花抗氧化活性及其主要活性物质含量的研究[J]. 广西科学院学报，2020，36(4)：419-426.
LI M L，PENG J L，JIANG H D，et al. Study on antioxidant activity and content of main active components of 9 kinds of yellow *Camellia* flowers[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences，2020，36(4)：419-426.(in Chinese)

[12] 林华娟，秦小明，曾秋文，等. 金花茶茶花的化学成分及生理活性成分分析[J]. 食品科技，2010，35(10)：88-91.
LIN H J，QIN X M，ZENG Q W，et al. Analysis on chemical and bioactive components in flower of *Camellia chrysantha* (Hu) Tuyama [J]. Food Science and Technology，2010，35(10)：88-91.(in Chinese)

[13] 都昌乐，杨紫雨，陈贝言，等. 超声波辅助乙醇提取茶多酚工艺的正交优化研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版)，2022，42(4)：29-34.
DU C L，YANG Z Y，CHEN B Y，et al. Orthogonal optimization study on the extraction of polyphenols from by ultrasonic-assisted ethanol [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)，2022，42(4)：29-34.(in Chinese)

[14] 谢佳函，刘回民，刘美宏，等. 红豆皮多酚提取工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 中国食品学报，2020，20(1)：147-157.
XIE J H，LIU H M，LIU M H，et al. Extraction process optimization and antioxidant activity analysis of polyphenols from azuki bean coats (*Vigna angularis*)[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2020，20(1)：147-157.(in Chinese)

[15] 莫玉静，宋佳佳，余金燕，等. 超声提取砂糖橘落果总黄酮及其抗氧化活性研究[J]. 食品科技，2023，48(10)：188-194.
MO Y J，SONG J J，YU J Y，et al. Ultrasound extraction and antioxidant activity of total flavonoids from 'Shatangju' mandarin drop fruit[J]. Food Science and Technology，2023，48(10)：188-194.(in Chinese)

[16] 刘佳怡，黄磊磊，王天怡，等. 超声协同低共熔溶剂提取紫丁香花多酚工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2024，45(4)：171-179.
LIU J Y，HUANG L L，WANG T Y，et al. Optimization of *Syringa oblata* Lindl. flower for extraction of polyphenols by ultrasound-assisted deep eutectic solvents and analysis of antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry，2024，45(4)：171-179.(in Chinese)

[17] 陆廷亚，陈琪，赵晓歌，等. 大高良姜地下根茎挥发油化学成分及体外药理活性研究[J]. 天然产物研究与开发，2020，32(11)：1866-1875.
LU T Y，CHEN Q，ZHAO X G，et al. Chemical constituents and *in vitro* pharmacological activities of essential oil from rhizome of *Alpinia galangal* (L.) Willd[J]. Natural Product Research and Development，2020，32(11)：1866-1875.(in Chinese)

[18] 晏俊玲，李茂，张伟建，等. 深共熔溶剂提取酒糟多酚类物质及其体外抗氧化、降血糖活性研究[J]. 食品与发酵工业，2024，50(18)：265-272.
YAN J L，LI M，ZHANG W J，et al. Deep eutectic solvent extraction of distiller's grains polyphenols and its antioxidant and hypoglycemic abilities *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries，2024，50(18)：265-272.(in Chinese)

[19] 羡荣华，蒲铎文，樊梓鸾，等. 老山芹多糖的分离纯化、结构表征及体外降糖活性研究[J]. 食品与发酵工业，2023，49(18)：113-118，124.
XIAN R H，PU D W，FAN Z L，et al. Isolation，purification，structure characterization，and hypoglycemic activity analysis of polysaccharides from *Heraclenm dissectum*[J]. Food and Fermentation Industries，2023，49(18)：113-118，124.(in Chinese)

[20] 李培睿，王丽娜. 超声波辅助提取绿茶中茶多酚的工艺研究[J]. 许昌学院学报，2021，40(5)：71-74.
LI P R，WANG L N. Extraction process of TP from green tea assisted by ultrasonic wave[J]. Journal of Xuchang University，2021，40(5)：71-74.(in Chinese)

[21] 曹叶霞，李慧卿，陈雪涛，等. 黑苦荞多酚提取及其对油脂的抗氧化研究[J]. 中国粮油学报，2023，38(8)：124-130.
CAO Y X，LI H Q，CHEN X T，et al. Extraction of polyphenols from black Tartary buckwheat and its antioxidation to oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2023，38(8)：124-130.(in Chinese)

[22] 张媛婷，夏艺菲，何晓琦，等. 绿茶和白茶中茶多酚提取工艺优化及抗氧化活性比较[J]. 茶叶通讯，2021，48(3)：507-513.
ZHANG Y T，XIA Y F，HE X Q，et al. Optimization of extraction process of tea polyphenols from green tea and white tea and comparison of antioxidant activity[J]. Tea Communication，2021，48(3)：507-513.(in Chinese)

[23] 陈云. 超声波辅助提取碧螺春茶多酚工艺研究[J]. 中国食品添加剂，2018(2)：105-111.
CHEN Y. Study on technique of ultrasonic extraction of tea polyphenols from Biluochun tea[J]. China Food Additives，2018(2)：105-111.(in Chinese)

[24] LI J K，WU C C，LI F，et al. Optimization of ultrasound-assisted water extraction of flavonoids from *Psidium guajava* leaves by response surface analysis[J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology，2019，49(1)：21-29.

[25] 张孟凡，岳丽，敬思群，等. 超声辅助-酶解协同作用提取红枣渣膳食纤维及其促消化作用[J]. 食品工业科技，2019，40(7)：205-212.
ZHANG M F，YUE L，JING S Q，et al. Extraction of dietary fiber from red jujube residue by ultrasonic-enzymatic hydrolysis synergistic action and its promoting digestion function[J]. Science and Technology of Food Industry，2019，40(7)：205-212.(in Chinese)

[26] 马艳，姜亦超，董格格，等. 超声辅助提取玄米茶多酚工艺的优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业，2023，44(8)：22-27.
MA Y，JIANG Y C，DONG G G，et al. Optimization on process of polyphenols from Genmaicha by ultrasonic-assisted extraction and its antioxidant activities study[J]. The Food Industry，2023，44(8)：22-27.(in Chinese)

[27] 尹国利，赵露，邹成梅，等. 超声波辅助提取苦丁茶多酚及其抗氧化与降糖活性研究[J]. 食品研究与开发，2020，41(17)：48-55.
YIN G L，ZHAO L，ZOU C M，et al. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from *Ilex latifolia* Thunb. and its antioxidant and hypoglycemic activities[J]. Food Research and Development，2020，41(17)：48-55.(in Chinese)

（责任编辑：闫林红）