

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.60022

金银花无硫护色工艺优化及干燥技术比较

翟玉梅¹ 汤晓娟¹ 付晓² 巩敏¹ 刘云国¹

(1. 临沂大学生命科学学院, 山东 临沂 276000; 2. 平邑县农业农村发展服务中心, 山东 平邑 273300)

摘要: [目的] 开发绿色加工技术, 抑制新鲜金银花褐变并提升其干燥品质。[方法] 以多酚氧化酶相对酶活力和色差值为评价指标, 通过响应面法优化无硫复合护色剂(柠檬酸、D-异抗坏血酸钠、DL-苹果酸钠)工艺, 并对比分析真空冷冻、微波等干燥方式对护色后产品品质的影响。[结果] 柠檬酸的抑褐变效果最佳, 其最佳工艺参数为柠檬酸浓度 0.105 mol/L, D-异抗坏血酸钠浓度 0.124 mol/L, 热烫时间 146 s。真空冷冻干燥可最大程度保留产品活性成分, 但效率较低; 微波干燥在保持产品品质的同时可显著提高干燥效率。[结论] 优化后的无硫护色工艺结合微波干燥可实现高效抑褐与品质提升。

关键词: 金银花; 多酚氧化酶; 护色; 干燥方式

Optimization of sulfur-free color protection process and comparison of drying techniques for honeysuckle

ZHAI Yumei¹ TANG Xiaojuan¹ FU Xiao² GONG Min¹ LIU Yunguo¹

(1. College of Life Sciences, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China; 2. Pingyi County Agricultural and Rural Development Service Center, Pingyi, Shandong 273300, China)

Abstract: [Objective] To develop green processing technology to inhibit the browning of fresh honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb) and enhance its drying quality. [Methods] With polyphenol oxidase relative enzyme activity and color difference values as evaluation indicators, the process of sulfur-free compound color-protecting agents (citric acid, D-sodium erythorbate, and DL-sodium malate) is optimized through response surface methodology. Additionally, the effect of various drying methods, including vacuum freeze drying and microwave drying, on the quality after color protection is compared and analyzed. [Results] Citric acid demonstrates the best anti-browning effect. The process parameters are optimal when citric acid concentration is 0.105 mol/L, with D-sodium erythorbate concentration of 0.124 mol/L and blanching time of 146 s. Vacuum freeze drying is found to retain active components to the greatest extent but exhibits lower efficiency. Microwave drying significantly improves drying efficiency while maintaining product quality. [Conclusion] The optimized sulfur-free color protection process, combined with microwave drying, can achieve efficient anti-browning and quality enhancement.

Keywords: honeysuckle; polyphenol oxidase; color protection; drying method

金银花 (*Lonicera japonica* Thunb) 为忍冬科半常绿藤本植物, 作为中国传统中药材, 具有清热解毒、抗炎、抗菌等药理活性, 被广泛应用于医药、食品及保健品领域^[1-3]。但其组织脆嫩, 花蕾水分含量高达 82.20%^[4], 采后易因多酚氧化酶 (PPO) 催化多酚类物质氧化生成醌类化合物^[5],

引发褐变。褐变不仅使色泽劣化, 还会降解绿原酸、木犀草苷等活性成分, 降低商品价值^[6-7]。

传统护色工艺多依赖硫护色剂 (如亚硫酸盐), 虽能有效抑制褐变, 但存在硫残留风险^[8]。随着绿色加工理念的普及, 开发高效无硫护色技术成为研究热点。复合护

基金项目: 山东省高等学校青创人才引育计划项目 (编号: 鲁教科函 (2021) 51 号)

通信作者: 巩敏 (1990—), 女, 临沂大学讲师, 博士。E-mail: gongmin@lyu.edu.cn

刘云国 (1977—), 男, 临沂大学教授, 博士。E-mail: yuoliu@163.com

收稿日期: 2025-02-25 改回日期: 2025-05-21

引用格式: 翟玉梅, 汤晓娟, 付晓, 等. 金银花无硫护色工艺优化及干燥技术比较 [J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 120-129.

Citation: ZHAI Yumei, TANG Xiaojuan, FU Xiao, et al. Optimization of sulfur-free color protection process and comparison of drying techniques for honeysuckle [J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 120-129.

色剂可通过协同作用降低单一组分浓度并提升护色效能。唐金蕾等^[9]采用1.5%柠檬酸、0.8%抗坏血酸、0.1% L-半胱氨酸和1.5% NaCl复合液处理鲜山药,显著抑制了酶活性并减少了尿囊素等活性成分损失;李丹丹等^[10]通过响应面法优化鲜莲藕防褐变工艺,确定0.60%柠檬酸、0.50%氯化钙与0.70%抗坏血酸为最优配比。但现有研究多集中于果蔬领域^[11-12],针对金银花复合护色剂的协同作用机制及工艺优化仍缺乏系统性研究。

干燥工艺是影响金银花品质的关键环节。传统的干燥方式包括晒干、烘干和阴干等,不同地区根据气候条件和生产规模选择不同的加工方法。宋梦璐等^[13]研究表明,烘干法在保留金银花中的总酚酸和总黄酮含量方面表现最佳,而阴干法在抗氧化性方面具有一定优势。邹容等^[14]研究了热风干燥、自然阴干、真空干燥及真空冷冻干燥对金银花多酚类物质及抗氧化活性的影响,发现真空冷冻干燥能较好地保留金银花多酚类物质,并具有较强的抗氧化活性。但目前有关研究多聚焦于单一干燥方式,护色预处理与干燥工艺的协同效应对品质的影响尚未明晰。

研究拟考察热烫温度、热稳定性及不同浓度的无硫护色剂对金银花PPO相对酶活力的钝化效果,优化复合护色剂配比。并将优化护色工艺与多种干燥技术相结合,对比不同干燥方式对金银花品质的影响,为金银花的高效加工及品质提升提供依据。

1 材料与方 法

1.1 主要材料与试剂

新鲜金银花:采自临沂市平邑县,经临沂大学刘云国教授鉴定品种为四季花;

柠檬酸:食品级,河南万邦化工科技有限公司;

D-异抗坏血酸钠:食品级,江苏采薇生物技术有限公司;

DL-苹果酸钠:食品级,湖北雅迈德生物医药有限公司;

磷酸氢二钠、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、没食子酸、福林酚、芦丁、硝酸铝、碳酸钠、氢氧化钠、95%乙醇:分析纯,上海源叶生物科技有限公司;

邻苯二酚、亚硝酸钠:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

维生素C测定试剂盒:南京建成生物工程研究所有限公司;

总糖含量检测试剂盒、DPPH自由基清除能力试剂盒、超氧阴离子自由基清除能力试剂盒、羟自由基清除能

力试剂盒:北京索莱宝科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

电热鼓风干燥箱:DHG-9123A型,上海一恒科学仪器有限公司;

冻干机:A1pha 1-2LD型,上海巴玖实业有限公司;

微波炉:211A/213B型,美的厨房电器制造有限公司;

超声波清洗器:KQ5200E型,昆山市超声仪器有限公司;

恒温水浴锅:HH-4型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

微型旋涡混合仪:XW-80A型,上海沪西分析仪器厂有限公司;

分光测色仪:CS-820N型,杭州彩谱科技有限公司;

紫外可见分光光度计:752NPlus型,上海仪电分析仪器有限公司;

低温冷冻离心机:MIKRO 220R型,德祥科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 原料预处理 以无损伤的金银花鲜花为原料,经护色处理后,按特定条件干燥至水分含量低于12%。

1.3.2 金银花的护色工艺

(1) 热烫温度对新鲜金银花的影响:根据李洁媛等^[15]的方法并修改。取邻苯二酚溶液1 mL、磷酸盐缓冲液4 mL和PPO提取液1 mL,分别于20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 °C水浴100 s,测定护色处理后金银花PPO相对酶活力。

(2) 热稳定性对新鲜金银花的影响:根据李洁媛等^[15]的方法并修改。取邻苯二酚溶液1 mL、磷酸盐缓冲液4 mL和PPO提取液1 mL,分别于30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 °C保持0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 s,冷却,测定护色处理后金银花PPO相对酶活力。

(3) 单一护色剂对新鲜金银花的影响:根据李洁媛等^[15]的方法并修改。将1 mL不同浓度(0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16 mol/L)的柠檬酸、D-异抗坏血酸钠和DL-苹果酸钠分别与1 mL邻苯二酚及4 mL磷酸盐缓冲液混合,搅拌后加入1 mL PPO提取液,浸泡5 min,测定护色处理后金银花PPO相对酶活力。

(4) 物理—化学协同护色对新鲜金银花的影响:使用不同浓度的柠檬酸、D-异抗坏血酸钠和DL-苹果酸钠作为化学护色剂,进行单一和复合护色处理,并结合物理与化学方法(表1),45 °C干燥,测定护色处理后金银花PPO相对酶活力、色差值(ΔE)及干燥后的色差变化。

(5) 单因素试验:固定复合护色剂中D-异抗坏血酸

表 1 金银花的物理化学护色工艺条件[†]

Table 1 Technical conditions for physical and chemical color protection process of honeysuckle

工艺编号	工艺处理
1	0.10 mol/L 柠檬酸
2	0.12 mol/L D-异抗坏血酸钠
3	0.14 mol/L DL-苹果酸钠
4	0.10 mol/L 柠檬酸+热烫
5	0.12 mol/L D-异抗坏血酸钠+热烫
6	0.14 mol/L DL-苹果酸钠+热烫
7	0.10 mol/L 柠檬酸+0.12 mol/L D-异抗坏血酸钠
8	0.10 mol/L 柠檬酸+0.14 mol/L DL-苹果酸钠
9	0.12 mol/L D-异抗坏血酸钠+0.14 mol/L DL-苹果酸钠
10	0.10 mol/L 柠檬酸+0.12 mol/L D-异抗坏血酸钠+热烫
11	0.10 mol/L 柠檬酸+0.14 mol/L DL-苹果酸钠+热烫
12	0.12 mol/L D-异抗坏血酸钠+0.14 mol/L DL-苹果酸钠+热烫
13	单一热烫
14	未处理鲜花

† 所选护色剂浓度及热烫参数(50 ℃, 120 s)均基于前期对金银花护色工艺关键因素的研究确定。

钠浓度 0.12 mol/L, 柠檬酸浓度 0.10 mol/L, 50 ℃热烫 120 s, 分别考察柠檬酸浓度(0.08, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12 mol/L)、D-异抗坏血酸钠浓度(0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14 mol/L)和热烫时间(120, 130, 140, 150, 160 s)对金银花 PPO 相对酶活力和 ΔE 的影响。

(6) 响应面试验: 基于单因素试验, 通过 Design-Expert 13 软件进行响应面优化, 以柠檬酸浓度、D-异抗坏血酸钠浓度和热烫时间为自变量, PPO 相对酶活力和 ΔE 为响应值, 设计三因素三水平的响应面试验优化护色工艺。

1.3.3 PPO 相对酶活力测定 根据刘畅^[6]的方法并修改。取 1 g 新鲜金银花, 加入含 0.27 g 聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、pH 值为 7.9 的磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液 6 mL, 研磨 10 min, 4 ℃浸提 20 min, 9 000 r/min 冷冻离心 15 min, 收集上清液。使用分光光度计测定 410 nm 处吸光度, 分别按式(1)、式(2)计算最高酶活力和相对酶活。以最高酶活力为 100%, 测定不同护色处理后的酶活力, 计算相对酶活力。试验重复 3 次, 取平均值。

$$U = \frac{\Delta A_{420\text{nm}} \times V_T}{V_s \times 0.001 \times M \times t}, \quad (1)$$

$$R = \frac{U_1}{U_2} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

U ——多酚氧化酶活力, $U/(g \cdot \text{min})$;

$\Delta A_{420\text{nm}}$ ——反应时间内吸光度变化值;

V_T ——加样缓冲液总体积, mL;

M ——金银花鲜重, g;

V_s ——取样比色体积, mL;

t ——反应时间, min;

R ——相对酶活力, %;

U_1 ——不同护色处理后的残余酶活力, $U/(g \cdot \text{min})$;

U_2 ——未经护色处理的原始酶活力, $U/(g \cdot \text{min})$ 。

1.3.4 色差值测定 用色差仪测定金银花的 L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度)值, 重复 3 次, 取平均值, 按式(3)计算 ΔE^* 。

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}. \quad (3)$$

1.3.5 金银花的干燥方法 将护色处理后的金银花按表 2 进行冷冻干燥、室内干燥、微波干燥和鼓风干燥, 以未处理鲜花作为对照。

表 2 金银花的干燥方法及处理条件

Table 2 Drying methods and treatment conditions of honeysuckle

干燥方法	设备/地点	设定温度/℃	干燥时间
冷冻干燥	冷冻干燥机	-40	30 h
室内干燥	室内	21	72 h
微波干燥	微波炉	30~40	25 min
鼓风干燥	电热鼓风干燥箱	45	16 h
未处理—冷冻干燥	冷冻干燥机	-40	30 h
未处理—室内干燥	室内	21	72 h
未处理—微波干燥	微波炉	30~40	25 min
未处理—鼓风干燥	电热鼓风干燥箱	45	16 h

1.3.6 活性成分测定

(1) 总多酚: 根据何晓梅等^[16]的方法并修改。配制 0.1 mg/mL 没食子酸标准溶液, 取 0.2~1.4 mL 于容量瓶中, 加入 1.5 mL 0.25 mol/L 福林酚溶液, 反应 6 min, 加入 1.5 mL 15% Na_2CO_3 溶液, 用蒸馏水定容。40 ℃水浴 60 min, 冷却, 测定 760 nm 处吸光值。取金银花 1 g, 加入 40 mL 70% 乙醇超声提取 30 min, 4 000 r/min 离心 10 min, 取 1 mL 上清液按上述步骤处理, 测定 760 nm 处吸光度。没食子酸标准曲线方程 $Y=0.0774X-0.0053$, $R^2=0.9979$ 。按式(4)计算多酚含量。

$$P_0 = \frac{(C - C_0) \times V \times f}{m \times 1000} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

P_0 ——多酚含量,%;
 C ——样品中总多酚质量浓度,mg/mL;
 C_0 ——空白中总多酚质量浓度,mg/mL;
 m ——称取样品质量,g;
 V ——提取液体积,mL;
 f ——稀释倍数。

(2) 总黄酮:根据肖作为等^[17]的方法并修改。制备0.2 mg/mL芦丁标准溶液。取1.00~7.00 mL芦丁溶液,加入6 mL蒸馏水,依次加入5%亚硝酸钠1 mL、10%硝酸铝1 mL,振荡并静置6 min,加入5%氢氧化钠10 mL,振荡后静置15 min,用蒸馏水定容。以试剂空白为对照,测定510 nm处吸光度。取1 g金银花,加入20 mL 60%乙醇超声提取30 min,8 000 r/min离心10 min,取1 mL上清液,按上述步骤处理,测定510 nm处吸光度。按式(5)计算总黄酮含量。芦丁标准曲线方程 $Y=0.020 2X-0.014 1$, $R^2=0.997 8$ 。

$$F = \frac{C_1 \times V \times t}{m \times 1000} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

F ——总黄酮含量,%;
 C_1 ——由标准曲线计算得出的吸取待测试液黄酮类

化合物质量浓度,mg/mL;
 V ——定容体积,mL;
 t ——稀释倍数;
 m ——样品质量,g。

(3) 总糖:采用总糖含量检测试剂盒测定金银花总糖含量。葡萄糖标准曲线方程 $Y=0.000 7X-0.014 7$, $R^2=0.999 6$ 。

(4) 维生素C:采用维生素C测定试剂盒进行定量分析。

1.3.7 抗氧化活性测定 采用DPPH自由基、超氧阴离子自由基和羟自由基清除试剂盒测定金银花的抗氧化能力。

1.4 数据处理

使用SPSS 23软件进行数据分析,显著性水平 $P < 0.05$;采用Design-Expert 13软件进行响应面设计,每个试验重复3次。

2 结果与分析

2.1 护色工艺关键控制因素

温度是影响金银花护色的关键因素^[18]。由图1(a)可知,金银花PPO相对酶活力在40℃时达到峰值,与多数植

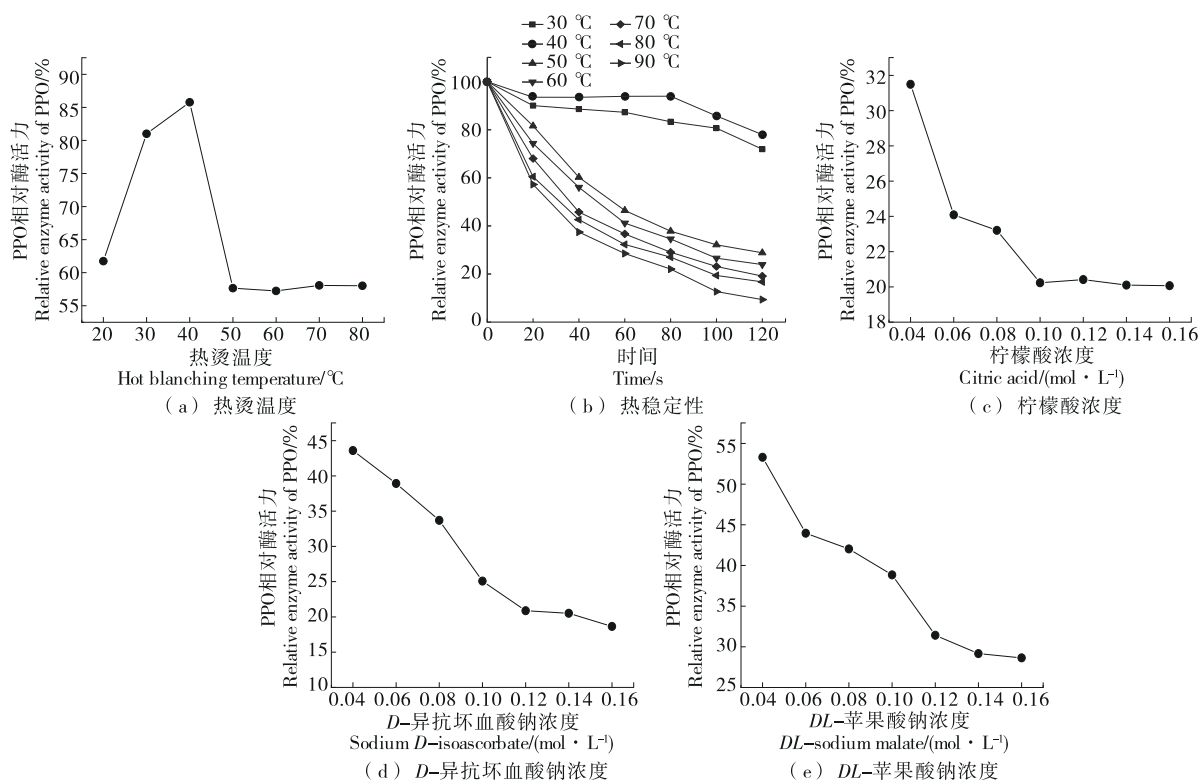


图1 热烫温度、热稳定性及护色剂对金银花中PPO相对酶活力的影响

Figure 1 Effect of blanching temperature, thermal stability, and color-protecting agents on the relative enzyme activity of polyphenol oxidase in honeysuckle

物 PPO 的最适温度(15~50 °C)一致^[19],如巨大口蘑 PPO 相对酶活力最适温度为 30 °C^[20],而枸杞鲜果相对酶活力最适温度为 36~40 °C^[21]。温度对酶活性具有双重作用,低温可通过限制酶-底物复合物的形成从而抑制反应速度,高温则破坏酶蛋白的三级结构导致不可逆失活^[22]。由图 1(b)可知,PPO 相对酶活力在 50 °C 处理 120 s 后骤降至 29.46%,显著低于巨大口蘑 PPO 在 60 °C 处理后的残余活力^[20],表明金银花 PPO 对高温更敏感。这与其酶分子中热敏感结构域(如疏水核心或金属辅基结合位点)的差异有关^[23]。当温度 > 50 °C 时,金银花颜色褐变明显,这与酚类物质的非酶促氧化有关^[24]。

由图 1(c)~图 1(e)可知,柠檬酸可通过降低 pH 值和螯合铜离子双重机制抑制酶活,这与金针菇中柠檬酸亚锡二钠的高效抑制作用类似^[25]。但高浓度柠檬酸(>0.10 mol/L)会导致色差值上升,可能因其过度螯合金属离子反而促进酚类物质氧化。*D*-异抗坏血酸钠的强效抑制则通过还原作用阻断褐变链式反应^[26]。*DL*-苹果酸钠在 0.04~0.14 mol/L 浓度范围内表现出较强的抑制作用,使 PPO 相对酶活力降低至 29.17%。

2.2 物理-化学协同护色工艺优化

2.2.1 协同护色工艺筛选

由表 3 可知,工艺 10 因柠檬酸(pH 调节与色泽稳定)、*D*-异抗坏血酸钠(氧化阻断)及热烫(酶活钝化)的协同作用^[25],抑制褐变效果最佳。故选择工艺 10 作为最终护色方法。

表 3 护色工艺对金银花色差值和酶活性的影响[†]

Table 3 Effect of color protection process on color difference and enzyme activity of honeysuckle

工艺编号	护色后色差值	干燥后色差值	相对酶活力/%
1	6.72±0.08 ^d	12.12±0.08 ^h	21.24±0.03 ⁱ
2	8.33±0.00 ^b	15.98±0.03 ^e	23.60±0.03 ^g
3	4.50±0.05 ⁱ	11.94±0.05 ^j	32.42±0.03 ^b
4	4.69±0.01 ^h	18.34±0.02 ^c	20.46±0.03 ^j
5	5.69±0.01 ^e	17.94±0.04 ^d	22.57±0.04 ^h
6	3.29±0.01 ^l	15.35±0.07 ^f	29.90±0.01 ^d
7	3.72±0.02 ^j	6.95±0.07 ^l	17.56±0.03 ^l
8	7.18±0.02 ^c	11.62±0.08 ^j	32.22±0.03 ^c
9	5.53±0.05 ^f	8.67±0.04 ^k	19.60±0.04 ^k
10	1.33±0.01 ^m	4.92±0.03 ⁿ	12.58±0.02 ⁿ
11	4.81±0.02 ^g	13.57±0.03 ^g	27.42±0.07 ^f
12	3.40±0.05 ^k	6.67±0.10 ^m	16.88±0.02 ^m
13	8.98±0.01 ^a	19.83±0.04 ^b	28.75±0.05 ^e
14		23.51±0.05 ^a	100.00±0.00 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2.2 单因素试验

由图 2 可知,*D*-异抗坏血酸钠的最佳护色浓度为 0.12 mol/L,柠檬酸的最佳护色浓度为 0.10 mol/L。但高浓度可能因 pH 降低抑制酶促褐变,同时因金属离子络合作用增强 PPO 活性^[27]。此外,140 s 的热烫时间表现出了最佳的护色效果。

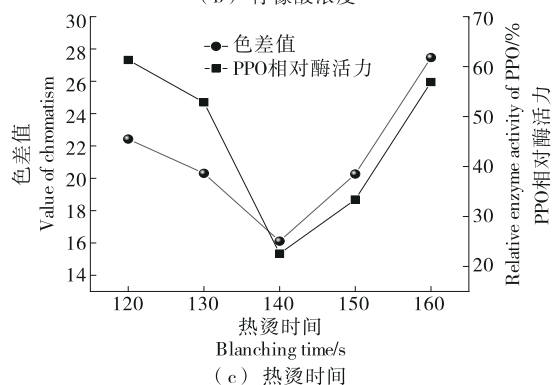
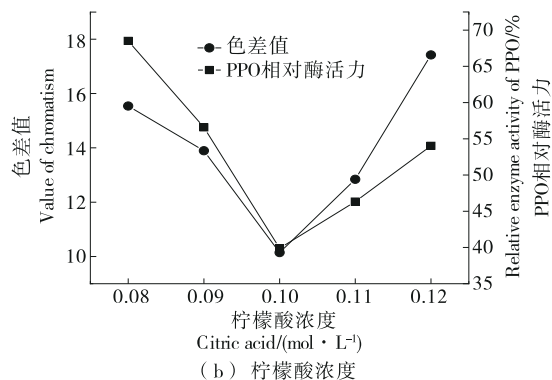
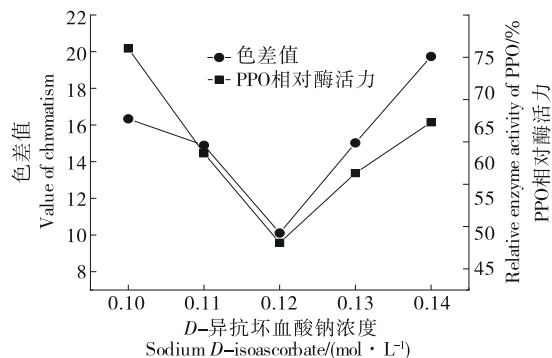


图 2 单因素试验对金银花色差值和 PPO 相对酶活性的影响

Figure 2 Effect of single-factor test on color difference and PPO relative enzyme activity of honeysuckle

2.2.3 响应面试验

基于响应面法构建以柠檬酸浓度、*D*-异抗坏血酸钠浓度和热烫时间为自变量,色差值和 PPO 相对酶活力为响应值的模型。响应面试验水平见表 4,试验设计及结果见表 5。

表 4 响应面试验水平表

Table 4 Response surface test levels

水平	A 柠檬酸浓度/ (mol·L ⁻¹)	B D-异抗坏血酸钠浓度/ (mol·L ⁻¹)	C 热烫时 间/s
-1	0.09	0.11	130
0	0.10	0.12	140
1	0.11	0.13	150

运用 Design-Expert 13 软件对试验数据进行模型拟合,得回归方程:

$$Y_1 = 7.42 - 2.34A + 0.7825B + 0.37C - 3.04AB + 1.33AC - 1.71BC + 4.27A^2 + 8.80B^2 + 5.48C^2, \quad (6)$$

$$Y_2 = 26.69 - 2.75A - 1.69B - 2.82C - 1.65AB - 0.531AC - 1.95BC + 20.97A^2 + 21.48B^2 + 5.91C^2. \quad (7)$$

由表 6 可知,模型 P 均 < 0.05 , 失拟项 P 均 > 0.05 , 决定系数 R^2 (0.997 5 和 0.997 8) 和 R_{adj}^2 (0.994 3 和 0.994 9) 均接近 1, 变异系数均 $< 10\%$, 证实模型具有高拟合度和良好置信度。结合图 3 和表 6 可知,各因素对色差值影响顺序为 $A > B > C$, 对 PPO 相对酶活力影响顺序为 $A = C > B$ 。热烫时间 (146 s) 是仅次于抑制剂浓度的关键因素。短时间热烫无法充分破坏 PPO 结构,而过度加热会导致细胞破裂释放更多酚类底物,加剧褐变。与金银花 POD

表 5 响应面试验设计及结果

Table 5 Design and results of response surface test

试验号	A	B	C	Y_1 色差值	Y_2 相对酶活力/%
1	-1	0	1	18.37±0.02	52.87±0.02
2	-1	0	-1	20.84±0.01	59.62±0.06
3	-1	-1	0	18.89±0.07	72.86±0.12
4	0	1	-1	23.52±0.02	57.99±0.02
5	0	0	0	7.68±0.04	25.64±0.02
6	1	1	0	16.03±0.09	62.13±0.02
7	0	0	0	7.21±0.02	28.30±0.13
8	1	-1	0	20.48±0.01	70.51±0.03
9	0	-1	1	23.30±0.04	54.07±0.01
10	0	-1	-1	18.59±0.02	55.78±0.01
11	-1	1	0	26.58±0.02	71.07±0.17
12	0	0	0	8.13±0.02	26.27±0.05
13	0	0	0	7.29±0.17	26.26±0.13
14	0	1	1	21.39±0.09	48.50±0.02
15	0	0	0	6.79±0.02	26.99±0.07
16	1	0	1	16.16±0.01	48.60±0.13
17	1	0	-1	13.31±0.01	53.22±0.02

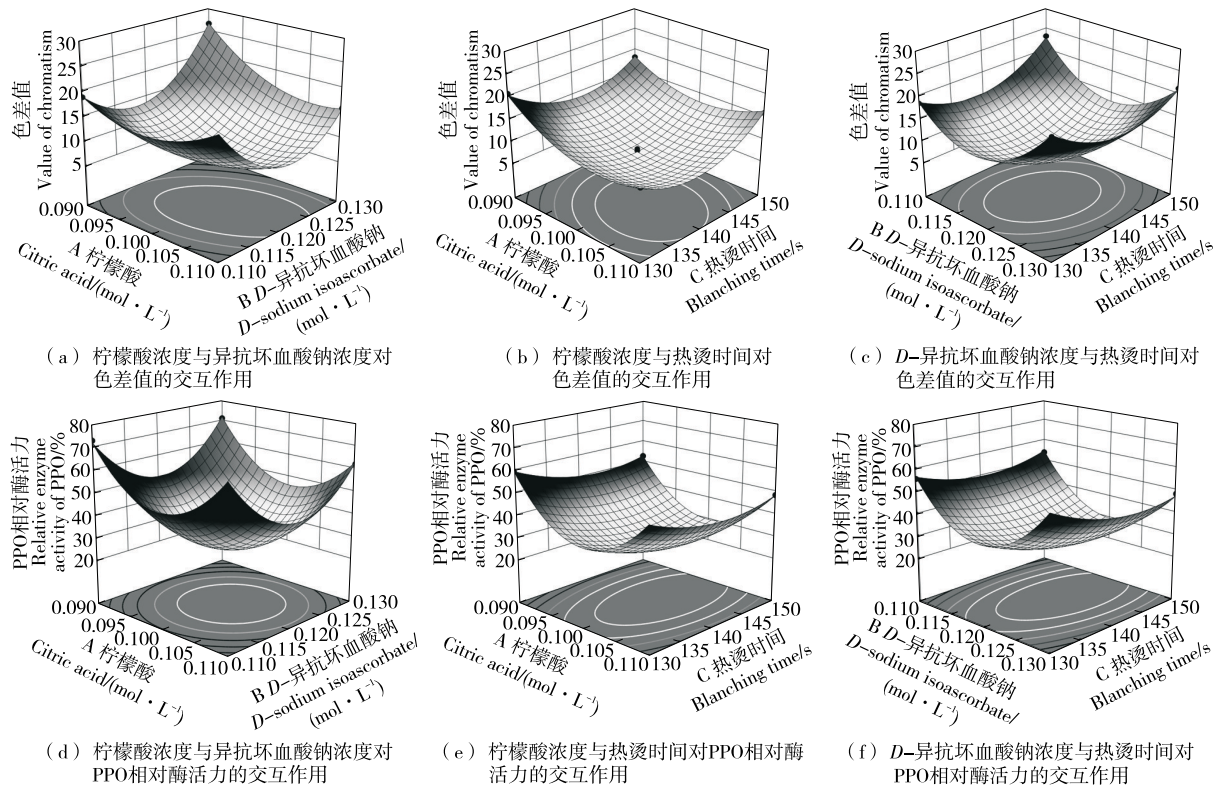


图 3 各因素相互作用对金银花色差值及 PPO 相对酶活力的影响

Figure 3 Effect of interaction among factors on color difference and PPO enzyme activity of honeysuckle

的热稳定性研究对比发现,POD在 50 °C下处理 60 min 仍保留 60%的活性^[28],而 PPO在相同温度下迅速失活,表明同一植物中不同酶的热稳定性存在显著差异($P<0.05$)。

经 Design-Expert 13 软件分析,最佳护色工艺为柠檬酸浓度 0.105 mol/L,*D*-异抗坏血酸钠浓度 0.124 mol/L,热烫时间 146 s,此条件下模型预测的色差值为 11.16,PPO 相对酶活力为 34.45%。进行 3 次验证实验,得到护色后金银花的色差值为 12.13,PPO 相对酶活力为 34.50%,与预测值高度吻合,说明该工艺可行。

2.3 干燥方式对金银花活性成分的影响

由表 7 可知,冷冻干燥组(未处理与护色后)在总多

酚、总黄酮及维生素 C 等指标上保持最高水平,其低温真空环境有效抑制了热敏性成分的降解与氧化^[29]。相比之下,鼓风干燥组因高温导致总多酚含量显著降低(未处理组 5.16%,护色组 5.08%),表明高温处理加剧了酚类物质的分解。

由图 4 可知,护色处理后的微波干燥组在抗氧化性能提升方面表现突出,归因于护色剂(如 *D*-异抗坏血酸钠)通过抑制 PPO 活性减少多酚损耗,同时其还原特性与内源性多酚协同作用,提高了自由基清除效率^[26]。

由表 8 可知,总多酚含量与维生素 C 含量呈极显著正相关($r=0.996$),且二者均与 DPPH 自由基清除率($r=$

表 6 Box-Behnken 试验方差分析[†]

Table 6 Analysis of variance of Box-Behnken test

方差来源	自由度		平方和	均方		F 值		P 值	
	色差值	PPO 相对酶活力		色差值	PPO 相对酶活力	色差值	PPO 相对酶活力	色差值	PPO 相对酶活力
模型	689.27	4 469.15	9	76.59	496.57	312.29	347.16	<0.000 1**	<0.000 1**
A	43.71	60.29	1	43.71	60.29	178.24	42.15	<0.000 1**	0.000 3**
B	4.90	22.88	1	4.90	22.88	19.97	16.00	0.002 9**	0.005 2**
C	1.10	63.64	1	1.10	63.64	4.47	44.49	0.072 4	0.000 3**
AB	36.84	10.85	1	36.84	10.85	150.24	7.59	<0.000 1**	0.028 3*
AC	7.08	1.13	1	7.08	1.13	28.85	0.79	0.001 0**	0.404 1
BC	11.70	15.14	1	11.70	15.14	47.69	10.59	0.000 2**	0.014 0
A ²	76.86	1 851.94	1	76.86	1 851.94	313.40	1 294.70	<0.000 1**	<0.000 1**
B ²	326.25	1 942.86	1	326.25	1 942.86	1 330.31	1 358.26	<0.000 1**	<0.000 1**
C ²	126.33	147.14	1	126.33	147.14	515.12	102.86	<0.000 1**	<0.000 1**
残差	1.72	10.01	7	0.25	1.43				
失拟项	0.69	5.86	3	0.23	1.95	0.89	1.88	0.519 0	0.273 5
纯误差	1.03	4.15	4	0.26	1.04				
总和	690.99	4 479.17	16						

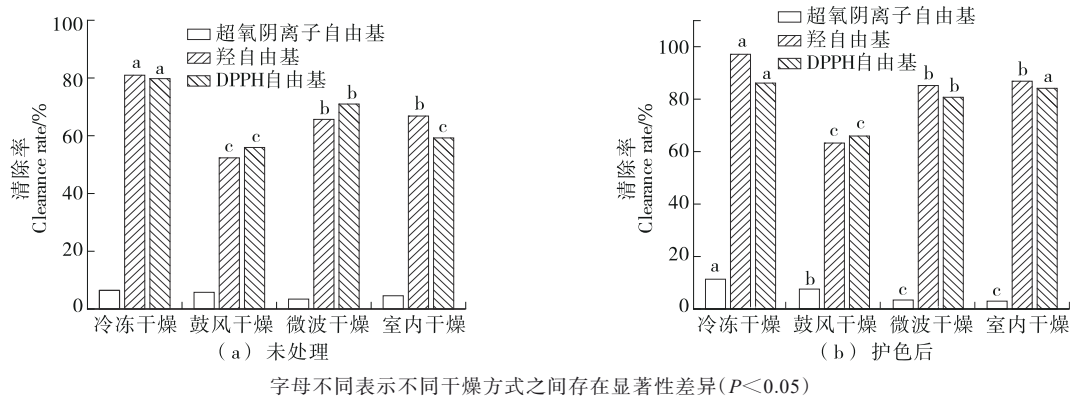
† *差异显著($P<0.05$),**差异极显著($P<0.01$);色差: $R^2=0.997 5, R_{Adj}^2=0.994 3$;PPO 相对酶活力: $R^2=0.997 8, R_{Adj}^2=0.994 9$ 。

表 7 不同干燥处理方式下金银花活性成分的比较[†]

Table 7 Comparison of active components of honeysuckle under different drying treatments

处理	干燥方式	总多酚/%	总黄酮/%	总糖/%	维生素 C/(10 ⁻² mg·g ⁻¹)
未处理	冷冻干燥	6.43±0.05 ^a	9.39±0.04 ^a	11.50±0.05 ^a	44.23±2.26 ^a
	室内干燥	5.30±0.02 ^c	1.83±0.04 ^d	3.49±0.04 ^d	12.59±1.34 ^c
	微波干燥	6.30±0.06 ^{ab}	7.26±0.06 ^c	10.43±0.07 ^b	43.16±1.09 ^a
	鼓风干燥	5.16±0.06 ^{cd}	5.88±0.02 ^c	6.17±0.05 ^c	17.81±1.50 ^b
护色后	冷冻干燥	6.37±0.07 ^{ab}	9.42±0.01 ^a	11.54±0.01 ^a	44.86±2.41 ^a
	室内干燥	5.29±0.12 ^c	5.76±0.04 ^d	3.54±0.04 ^d	13.09±0.22 ^c
	微波干燥	6.26±0.09 ^b	7.22±0.01 ^b	10.54±0.11 ^b	43.91±0.02 ^a
	鼓风干燥	5.08±0.13 ^d	1.84±0.09 ^d	6.22±0.02 ^c	19.19±0.51 ^b

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



字母不同表示不同干燥方式之间存在显著性差异($P < 0.05$)

图4 不同干燥方式下金银花的抗氧化能力对比

Figure 4 Comparison of antioxidant capacity under different drying methods

表8 护色干燥处理后金银花活性成分与抗氧化性能的皮尔逊相关性分析†

Table 8 Pearson correlation analysis of active components and antioxidant capacity of honeysuckle after color protection drying treatment

项目	总酚含量	总黄酮含量	总糖含量	维生素C含量	超氧阴离子自由基清除率	羟自由基清除率	DPPH自由基清除率
总酚含量	1.000						
总黄酮含量	0.702*	1.000					
总糖含量	0.905**	0.912**	1.000				
维生素C含量	0.996**	0.671*	0.893**	1.000			
超氧阴离子自由基清除率	0.296	0.817**	0.529	0.250	1.000		
羟自由基清除率	0.754**	0.284	0.462	0.754**	0.161	1.000	
DPPH自由基清除率	0.643*	0.084	0.294	0.650*	-0.017	0.979**	1.000

† *在0.05水平上相关性显著;**在0.01水平上相关性显著。

0.643, $r=0.650$)及羟自由基清除率($r=0.754$)存在显著相关性,证实酚类—维生素C复合体系在抗氧化过程中的主导作用^[30]。超氧阴离子自由基清除率与总黄酮含量高度相关($r=0.817$),揭示黄酮类化合物通过电子传递机制靶向清除特定自由基^[31-32]。此外,羟自由基清除率与DPPH自由基清除率极显著相关($r=0.979$)。综上,冷冻干燥结合护色处理可作为金银花干燥工艺优化的重要方向,通过物理—化学协同作用可实现活性成分与抗氧化性能的双重保护。

3 结论

金银花无硫护色工艺的关键控制因素为热烫温度 $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,多酚氧化酶活性因蛋白变性显著下降,但高温会引发非酶褐变;柠檬酸(0.10 mol/L)和D-异抗坏血酸钠(0.12 mol/L)可通过抑制多酚氧化酶活性及络合金属离子协同抑制褐变。金银花的最佳护色工艺条件为柠檬酸浓度0.105 mol/L、D-异抗坏血酸钠浓度0.124 mol/L、热烫

时间146 s,此条件下的色差值和多酚氧化酶相对酶活力与预测值误差 $< 2.5\%$,验证了模型可靠。真空冷冻干燥可最大程度保留金银花中的活性成分,且其抗氧化能力最优,而微波干燥兼顾效率与品质,适用于规模化生产。皮尔逊分析证实,总酚含量和维生素C与羟自由基清除率、DPPH自由基清除率呈极显著正相关($P < 0.01$),总黄酮含量则特异性影响超氧阴离子自由基清除率。后续需深入解析护色剂分子机制及贮藏过程中活性成分的动态变化。

参考文献

- [1] ZHANG R Q, LI Y Q, GUAN F Q, et al. A homogalacturonan-rich pectic polysaccharide isolated from *Lonicera japonica* Thunb. modulates galectin-4-mediated bioactivity and anti-hepatocellular carcinoma activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 302: 140618.
- [2] SHARMA A K, SATI D M, MURTI Y, et al. A comprehensive review on Chinese honeysuckle (*Quisqualis indica*): a traditional

- Chinese plant[J]. Toxicology Reports, 2024, 13: 101768.
- [3] ZHANG J Q, LIU H C, XU W T, et al. Comparative analysis of chloroplast genome of *Lonicera japonica* cv. Damaohua[J]. Open Life Sciences, 2024, 19(1): 20220984.
- [4] 李冬梅, 夏日耀, 杜莲朵, 等. 金银花不同部位营养成分分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(18): 190-194.
LI D M, XIA R Y, DU L D, et al. Study on nutrient contents of different parts of *Lonicera japonica* thunb[J]. Food Research and Development, 2018, 39(18): 190-194.
- [5] HUANG J, GAO X G, SU L L, et al. Purification, characterization and inactivation kinetics of polyphenol oxidase extracted from *Cistanche deserticola*[J]. Planta, 2023, 257(5): 85.
- [6] 刘畅. 金花茶花护色工艺优化及其贮藏稳定性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020: 1-85.
LIU C. The optimization of color protection process and storage stability of camellia nitidissima flowers[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020: 1-85.
- [7] PENG Z Y, WANG G C, HE Y, et al. Tyrosinase inhibitory mechanism and anti-browning properties of novel kojic acid derivatives bearing aromatic aldehyde moiety[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100421.
- [8] 王晓雨, 任贵平, 程竹林, 等. 响应面法优化枸杞无硫烘干护色工艺及其对品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(19): 246-255.
WANG X Y, REN G P, CHENG Z L, et al. Optimization the sulfur-free drying and color protection process of *Lycium barbarum* by response surface methodology and its effect on quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(19): 246-255.
- [9] 唐金蕾, 陈媛媛, 程代, 等. 复合保鲜液对鲜切山药的护色保鲜作用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(3): 212-220.
TANG J L, CHEN Y Y, CHENG D, et al. Effect of compound preservation liquid on color protection and preservation of fresh-cut yam[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(3): 212-220.
- [10] 李丹丹, 李永生, 贾凤娟, 等. 复合护色液对鲜切莲藕防褐变的研究[J]. 农产品加工, 2024(19): 5-9.
LI D D, LI Y S, JIA F J, et al. Study on the prevention of browning of freshly cut lotus root with compound color protecting liquid[J]. Farm Products Processing, 2024(19): 5-9.
- [11] 方锐琳, 邓利珍, 田煜琦, 等. 护色剂对全组分芒果汁高温灭菌过程的品质和风味影响[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 72-80.
FANG R L, DENG L Z, TIAN Y Q, et al. Impact of color fixatives on the quality and flavor of whole mango juice during high temperature sterilization[J]. Food Science, 2025, 46(8): 72-80.
- [12] 毕双同. 果蔬加工过程中的褐变及护色措施[J]. 农业与技术, 2018, 38(23): 22-23.
BI S T. Browning and color protection measures during fruit and vegetable processing[J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(23): 22-23.
- [13] 宋梦璐, 蓝孝浩, 陈潇潇. 三种不同干燥方式对金银花活性成分与抗氧化性的影响[J]. 山东化工, 2017, 46(20): 89-91.
SONG M L, LAN X H, CHEN X X. Effects of three different drying methods on active constituents and antioxidant activity of *Lonicera japonica*[J]. Shandong Chemical Industry, 2017, 46(20): 89-91.
- [14] 邹容, 游玉明, 陈泽雄, 等. 干燥方式对金银花多酚组分及其抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(5): 78-83.
ZOU R, YOU Y M, CHEN Z X, et al. Effects of drying methods on polyphenol compounds and antioxidant activities of *Lonicera japonica* flower[J]. Food Science, 2016, 37(5): 78-83.
- [15] 李洁媛, 李东, 童凯, 等. 马铃薯多酚氧化酶的分离纯化、酶学性质及酶促合成茶黄素性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(11): 26-31.
LI J Y, LI D, TONG K, et al. Enzymatic properties of purified polyphenol oxidase from potato and its ability to enzymatic synthesis of theaflavins[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(11): 26-31.
- [16] 何晓梅, 陈存武, 宋程, 等. 大别山栽培白及不同部位总酚含量测定及其抗氧化活性研究[J]. 中成药, 2022, 44(2): 656-660.
HE X M, CHEN C W, SONG C, et al. Determination of total phenolic content and antioxidant activity in different parts of *Bletilla striata* cultivated in Dabie Mountains[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2022, 44(2): 656-660.
- [17] 肖作为, 谢梦洲, 甘龙, 等. 山银花、金银花中绿原酸和总黄酮含量及抗氧化活性测定[J]. 中草药, 2019, 50(1): 210-216.
XIAO Z W, XIE M Z, GAN L, et al. Determination of chlorogenic acid, total flavones, and anti-oxidant activity of *Flos Lonicerae Japonicae* and *Flos Lonicerae*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(1): 210-216.
- [18] 侯爽爽. 金银花热风干燥过程中颜色劣变机理及抑制研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2011: 1-42.
HOU S S. Research on mechanism of honeysuckle color degeneration in hot air drying and the rejection[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2011: 1-42.
- [19] ZHANG S. Recent advances of polyphenol oxidases in plants[J]. Molecules, 2023, 28(5): 2 158.
- [20] 刘欣芊, 肖利丽, 莫转林, 等. 巨大口蘑多酚氧化酶的酶学特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(24): 35-41.

- LIU X Q, XIAO L L, MO Z L, et al. Enzymatic properties of polyphenol oxidase from *Macrocybe gigantea*[J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 35-41.
- [21] 朱金霞, 孔德杰, 李苗, 等. 两种宁夏枸杞鲜果中多酚氧化酶的酶学特性及其影响因子研究[J]. 植物生理学报, 2020, 56(3): 382-388.
- ZHU J X, KONG D J, LI M, et al. The studies on the enzymatic characteristics of polyphenol oxidase and its influence factors in two kinds of fresh fruits of *Lycium barbarum* L. [J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(3): 382-388.
- [22] ZHENG N, CAI Y C, ZHANG Z H, et al. Tailoring industrial enzymes for thermostability and activity evolution by the machine learning-based iCASE strategy[J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 604.
- [23] 熊建华, 李世传, 罗秋水, 等. 金银花叶多酚氧化酶的酶学特性[J]. 中国食品学报, 2012, 12(11): 59-63.
- XIONG J H, LI S C, LUO Q S, et al. Properties of polyphenol oxidase in *Lonicera Japonica* leaves[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(11): 59-63.
- [24] NAVINA B, KESHAV HUTHAASH K, VELMURUGAN N K, et al. Insights into recent innovations in anti browning strategies for fruit and vegetable preservation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 139: 104128.
- [25] 孙月娥, 张俊韬, 王卫东. 金针菇中多酚氧化酶活性测定及其护色研究[J]. 食品工业, 2011, 32(11): 68-70.
- SUN Y E, ZHANG J T, WANG W D. PPO activity determination and antibrowning measurement for *flammulina velutipes*[J]. The Food Industry, 2011, 32(11): 68-70.
- [26] 罗磊, 周燕燕, 朱文学, 等. 金银花多酚氧化酶特异性与抑制剂动力学研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 202-208.
- LUO L, ZHOU Y Y, ZHU W X, et al. Specificity and inhibition kinetics of polyphenol oxidase from honeysuckle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 202-208.
- [27] 楚倩倩, 任广跃, 段续, 等. 不同预处理方式对热风干燥黄花菜褐变及干燥特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 81-88.
- CHU Q Q, REN G Y, DUAN X, et al. Effects of different pretreatment methods on browning and drying characteristics of hot air-dried daylily buds[J]. Food Science, 2023, 44(7): 81-88.
- [28] 刘娜娜. 金银花中多酚氧化酶和过氧化物酶的分离纯化及特性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013: 1-64.
- LIU N N. Study on purification and characterization of polyphenol oxidase and peroxidase from the flower buds of *Lonicera japonica* Thunb[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013: 1-64.
- [29] SARKHOSH A, HABIBI F, SARGENT S A, et al. Freeze-drying does not affect bioactive compound contents and antioxidant activity of muscadine fruit[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(9): 2 735-2 744.
- [30] SUBROTO E, NUR'ALIFIA G, PUTRI, et al. Bioavailability and bioactivity of vitamin C: a review[J]. International Journal of Pharmaceutical Research, 2021, 13(2): 128-142.
- [31] MU Y W, ZHANG B H, ZENG C Z, et al. Mechanistic and multi-parametric insights into preserving nutritional, bioactive, and flavor attributes of daylily (*Hemerocallis citrina*): a comparative evaluation of freeze-drying, hot-air drying, and sun drying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 218: 117510.
- [32] DONNO D, NEIROTTI G, FIOCCARDI A, et al. Freeze-drying for the reduction of fruit and vegetable chain losses: a sustainable solution to produce potential health-promoting food applications[J]. Plants, 2025, 14(2): 168.