DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260131002
引用格式: 薛娟萍, 孟宪福, 杨绍英, 等. 响应面法-NSGA-II 算法双目标优化金银花罗汉果茶泡制工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(14): 256–264.
Xue Juanping, Meng Xianfu, Yang Shaoying, et al. Bi-objective optimization of brewing process of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea using response surface methodology-NSGA-II algorithm [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(14): 256–264. (in Chinese with English abstract).

响应面法-NSGA-II 算法双目标优化金银花罗汉果茶泡制工艺

薛娟萍, 孟宪福, 杨绍英, 姚勇志*
(广西生态工程职业技术学院, 柳州 545004)

摘 要: 目的 对金银花罗汉果茶进行感官和绿原酸含量的双目标优化, 获得最优工艺。**方法** 采用单因素实验、Box-Behnken 响应面设计对金银花提取工艺进行实验, 再用响应面法和带精英策略的非支配排序遗传(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)算法对金银花罗汉果茶进行感官和绿原酸含量的双目标优化, 构建预测模型 Y_1 和预测模型 Y_2, 并对最优条件下制作的茶汤中的绿原酸含量、总酚含量和 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率进行检测。**结果** 最优工艺为罗汉果添加量 1.3 g/500 mL, 泡制时间 22.3 min、泡制温度 88.1 ℃、金银花添加量 2.3 g/500 mL, 所得金银花罗汉果茶的感官评分为 9.4 分, 其绿原酸含量为 162.6 μg/g。模型预测结果: 金银花罗汉果茶的感官评分为 9.72 分, 其绿原酸含量为 159.25 μg/g, 模型误差均在 5%以内, 验证了模型的预测有效性。最优条件下制作的茶汤中绿原酸含量在前 3 d 降低较缓, 超过第 3 d 后降低较快, 总酚及自由基清除率随着贮存时间的延长呈现先增加后降低的趋势。**结论** 本研究实现了活性成分含量与感官评价的同步提升, 为金银花罗汉果茶工艺优化提供了系统化方法。

关键词: 响应面法; 带精英策略的非支配排序遗传算法; 双目标优化; 金银花罗汉果茶
中图分类号: TS272.5 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)14–0256–09

Bi-objective optimization of brewing process of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea using response surface methodology-NSGA-II algorithm

XUE Juan-Ping, MENG Xian-Fu, YANG Shao-Ying, YAO Yong-Zhi*
(*Guangxi Eco-engineering Vocational and Technical College*, *Liuzhou* 545004, *China*)

ABSTRACT: Objective To conduct bi-objective optimization for the sensory properties and chlorogenic acid content of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea, determine the optimal processing parameters. **Methods** Single-factor experiments and Box-Behnken response surface design were firstly applied to explore the extraction

收稿日期: 2026-01-31
基金项目: 柳州市教育科学规划重点课题项目(2025ZJB027); 广西生态工程职业技术学院校级课题项目(2024KY11)
第一作者: 薛娟萍(1979—), 女, 副教授, 主要研究方向为食品新产品研发与健康养生。E-mail: 52754035@qq.com
***通信作者:** 姚勇志(1974—), 男, 正高级讲师, 主要研究方向为食品保健及康养。E-mail: 435538761@qq.com

process of *Lonicera japonica*. On this basis, response surface methodology combined with non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) algorithm was adopted to perform the bi-objective optimization of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea in terms of sensory quality and chlorogenic acid content. The 2 prediction models (Y_1 and Y_2) were established correspondingly. Furthermore, the chlorogenic acid content, total phenolic content and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging rate of the tea infusion prepared under optimal conditions were determined and analyzed. **Results** The optimal processing conditions were determined as follows: *Siraitia grosvenorii* addition of 1.3 g/500 mL, brewing time of 22.3 min, brewing temperature of 88.1 ℃ and *Lonicera japonica* addition of 2.3 g/500 mL. Under the optimized conditions, the sensory score of the prepared tea reached 9.4, and the chlorogenic acid content was 162.6 μg/g. The predicted sensory score and chlorogenic acid content of the models were 9.72 and 159.25 μg/g, respectively. The relative errors of all models were less than 5%, which verified the reliable predictive validity of the established models. In the tea infusion prepared under optimal conditions, the chlorogenic acid content decreased slightly within the first 3 days and decreased significantly after the third day. In addition, the total phenolic content and radical scavenging rate showed a trend of first increasing and then decreasing with the prolongation of storage time. **Conclusion** This study realizes the synchronous improvement of active ingredient content and sensory quality of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea, which provides a systematic method for the process optimization and quality improvement of the tea product.

KEY WORDS: response surface methodology; non-dominated sorting genetic algorithm II algorithm; bi-objective optimization; *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea

0　引　言

金银花又名忍冬(*Lonicera japonica*), 隶属忍冬科(Caprifoliaceae)忍冬属(*Lonicera*)植物, 简称银花, 属于药食同源类植物[1–2]。它富含绿原酸、黄酮等活性成分, 具备抗氧化、抗炎、降血脂、保肝及免疫调节等多重药理功效, 目前研究多集中在中药制剂及药理学领域[3–6], 在功能性食品开发领域滞后[7]。罗汉果(*Siraitia grosvenorii*)是葫芦科植物, 其化学成分如罗汉果苷、罗汉果醇、类黄酮、木酚素、维生素 C 等具有抗氧化、抗炎、清除自由基的功效[7–10], 用于润肺止咳、清热生津, 常用于咽喉炎、肺热咳嗽的辅助治疗[11–12]。罗汉果苷作为最具代表性的天然甜味剂, 是当前学术界与产业界的焦点, 但对其抗氧化功能的食品化开发严重不足[13]。有研究通过正交试验及喷雾干燥工艺, 确定了金银花、罗汉果等原料的最佳配比及干燥参数, 制备固体饮料或茶包[13–14], 但研究的比较少且评价指标单一, 仅感官或活性成分含量, 没有将活性成分含量与感官品质的协同效果进行综合考量。

本研究针对罗汉果和金银花食品化开发不足的情况及评价单一的问题, 在 Box-Behnken 响应面设计基础上优化, 应用带精英策略的非支配排序遗传(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)算法多目标进化算法进行评价, 针对金银花罗汉果茶的提取工艺进行双目标(感官品质与绿原酸含量)优化, 并对其最优条件下制作的茶汤进行绿原酸含量、总酚含量和 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除率进行探索研究, 旨在确定金银花罗汉果茶的最优工艺条件, 实现活性成分含量与感官评价的同步提升, 为金银花罗汉果茶的开发提供技术支撑, 为“药食协同”实现从单一功效向综合健康管理跨越提供借鉴。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

金银花、罗汉果(北京同仁堂股份有限公司); 泡制用水(本论思泉饮用天然泉水)。

无水碳酸钠[分析纯, 天津市大茂化学试剂合伙企业(有限合伙)]; 石油醚(分析纯)、乙酸(优级纯)(四川西陇科学有限公司); 乙腈、甲醇(色谱纯, 恩科化学有限公司); 水[实验室一级水, 电导率(25 ℃)为 0.01 ms/m, 自制]; 福林酚、DPPH(分析纯)、绿原酸标准品(纯度≥99%)(合肥博美生物科技有限责任公司)。

1.2　仪器与设备

Agilent 1260LC 高效液相色谱仪(附紫外检测器)[安捷伦科技(中国)有限公司]; JP-100s 超声波清洗器(深圳市洁盟清洗设备有限公司); LD5-2B 离心机(北京京立离心机有限公司); HH6 数显恒温水浴锅(上海力辰邦仪器科技有限公司); ME204/02 电子天平[精度 0.0001 g, 梅特勒-托利多

仪器(上海)有限公司]; UV-1800PC-DS2 紫外可见分光光度计(上海美普达仪器有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 金银花罗汉果茶制备方法

取1.3 g罗汉果和500 mL水于养生壶中, 煮沸保温20 min, 添加 2.2 g 的金银花, 在 85 ℃保温 25 min, 制得微甜且含有一定量功能性成分绿原酸的养生茶。

1.3.2 单因素试验

试验基础配方为水 500 mL, 罗汉果添加量为 1.25 g, 金银花添加量为 2.00 g, 泡制温度 85 ℃, 泡制时间为 20 min, 分别考察单个因素在不同水平下对金银花罗汉果茶的感官评分影响。

(1)泡制温度对产品感官的影响

依次设定泡制温度为 75、80、85、90、95 ℃ 5 个水平, 考察泡制温度对金银花罗汉果茶的感官评分影响。

(2)泡制时间对产品感官的影响

依次设定泡制时间为 15、20、25、30 和 35 min 5 个水平, 考察泡制时间对金银花罗汉果茶的感官评分影响。

(3)金银花添加量对产品感官的影响

依次设定金银花添加量为 1.6、1.8、2.0、2.2 和 2.4 g/500 mL 5 个水平, 考察金银花添加量对金银花罗汉果茶的感官评分影响。

(4)罗汉果添加量对产品感官的影响

依次设定罗汉果添加量为 1.20、1.25、1.30、1.35 和 1.40 g/500 mL 5 个水平, 考察罗汉果添加量对金银花罗汉果茶的感官评分影响。

1.3.3 检测方法

(1)感官评价

按照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评标准》的评审人员要求, 对 10 名感官评价员进行培训, 并使其达标。参照上述标准, 结合罗汉果金银花等功能特性, 编制金银花罗汉果茶感官评分标准[15−20], 见表 1。

(2)绿原酸含量测定

根据 GB/T 22250—2025《保建食品中绿原酸的测定》进行测定[21−22]。

(3)总酚含量测定

总酚含量的测定参考钱佳仪等[23]的方法并稍加修改进行。取 1 mL 茶汤, 加入 0.5 mL 福林酚试剂, 避光反应 5 min 后, 再加 2.5 mL 7.5%的碳酸钠溶液, 定容 10 mL, 静置避光在 37 ℃水浴中放置 30 min, 在波长 760 nm 处测吸光度, 带入标准曲线方程, 得到总酚含量。没食子酸标准曲线方程测定: 没食子酸标准储备液(100 mg/L); 称取 20 mg 没食子酸标品, 转移至 200 mL 容量瓶中, 加水定容, 摇匀。没食子酸工作液: 用微量移液器分别移取 0、0.2、0.4.、0.6、0.8、1.0 mL 的没食子酸标准储备液于 10 mL 容量瓶中, 分别加水定容至刻度, 摇匀, 质量浓度分别为 0、2、4、6、8、10 mg/L。准确吸取 1 mL 各个质量浓度的没食子酸工作液, 代替样品茶汤, 按照上述总酚测定方法测定吸光值, 根据吸光值得到标准曲线(Y=0.1361X+0.0124, X 为没食子酸含量, Y 为 760 nm 处吸光度, 决定系数 r^2=0.9993)。

表 1 金银花罗汉果茶感官评分标准

Table 1 Sensory scoring criteria of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea

评价项目	权重/满分	评分等级	具体描述
汤色与澄清度	2.0	优(1.6~2.0 分)	汤色呈明亮的金黄色或浅琥珀色, 色泽均匀一致, 清澈透亮, 光泽感好; 在静置状态下, 杯底无任何肉眼可见的悬浮物、杂质或沉淀物
		良(1.0~1.5 分)	汤色呈黄色或稍深的褐色, 色泽基本均匀; 茶汤基本澄清, 允许有极微量的、不影响整体观感的细小悬浮颗粒, 但无明显浑浊和沉淀现象
		差(0~0.9 分)	汤色暗淡、发乌或色泽不均; 茶汤浑浊, 有明显的悬浮物、杂质或分层、沉淀现象
香气	3.5	优(3.0~3.5 分)	香气浓郁、纯正且持久; 能清晰地辨别出金银花特有的、鲜灵清雅的花香, 以及罗汉果纯净的甜香和果香; 两种香气协调融合, 互为衬托, 无任何焦味、陈味、霉味等异杂气味
		良(2.0~2.9 分)	具有金银花和罗汉果应有的香气, 但香气不够浓郁或不够持久; 可能其中一种香气较弱, 或二者融合度稍差, 但整体香气纯正, 无明显异杂气味
		差(0~1.9 分)	香气微弱、沉闷, 难以辨别; 或者香气不纯正, 存在明显的焦糊味、酸败味、陈味或其他令人不悦的异杂气味
滋味	4.5	优(4.0~4.5 分)	滋味甘醇、清爽润滑; 罗汉果的甜味纯正、自然、不腻口, 与金银花的微苦甘凉感达到完美平衡, 整体协调。入口顺滑, 无明显涩感, 饮后有清晰、持久的回甘和生津感
		良(2.5~3.9 分)	滋味主体正确, 甜味与甘凉感基本协调, 但可能甜度稍高或稍低, 或金银花的甘凉感不够突出; 口感尚可, 但可能带有轻微的涩感, 或回甘较短、不够明显
		差(0~2.4 分)	滋味平淡、寡薄, 或甜味过重发腻, 或苦涩味、酸味等杂味突出, 严重影响品饮; 口感粗糙, 有挂喉感, 无回甘或有不良余味

(4) DPPH 自由基清除率测定

DPPH 自由基清除率的测定参考文献[24]并稍加修改进行。将 2 mL 浓度为 0.1 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液和 2 mL 样品提取液混合, 在室温下避光放置 30 min, 在 517 nm 波长处测定吸光度。对照组用 2 mL 无水乙醇代替样品提取液。空白组为不加样品提取液, 直接用 4 mL 无水乙醇调零。反应体系的吸光度越低, 表明其清除 DPPH 自由基的能力越强。计算公式(1)如下所示。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\%=\frac{A_0-(A_s-A_{np})}{A_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中: A_0 为样品组吸光值; A_s 为空白组吸光值; A_{np} 为校正组吸光值。

(5)响应面模型拟合计算

使用 statsmodels 库进行多元线性回归, 拟合二次响应面方程使用 statsmodels 库进行多元线性回归, 拟合二次响应面方程。

(6) NSGA-II 算法代码实现

根据上述响应面模型, 使用 DEAP 库[25]实现 NSGA-II 算法, 求金银花罗汉果茶泡制工艺的帕累托最优解集。

1.3.4　响应面试验

在单因素试验结果的基础上, 以泡制时间(*A*)、泡制温度(*B*)、金银花添加量(*C*) 3 个因素为自变量, 以金银花罗汉果茶感官评分为考察值, 进行响应面优化试验, 因素水平见表 2。

表 2　因素水平表

Table 2　Table of factor level

水平	因素		
	A(泡制时间)/min	*B*(泡制温度)/℃	*C*(金银花添加量)/(g/500 mL)
–1	20	85	2.0
0	25	90	2.2
1	30	95	2.4

1.4　数据处理

所有实验均设置 3 次平行, 结果以平均值±标准偏差表示。采用 Design-expert 13.0、statsmodels、NSGA-II 算法进行实验设计及数据处理。图表绘制采用 WPS 365 教育旗舰版软件。

2　结果与分析

2.1　单因素试验结果分析

由图 1(a)可知, 随着泡制时间的延长, 金银花罗汉果茶的感官评分呈现先升后降的趋势。当泡制时间达到 25 min, 金银花罗汉果茶感官评分达到最高; 当泡制时间超过 25 min 时, 其感官评分因有较重的苦涩味降低。经单因素显著性差异分析, 泡制时间对感官评价影响显著(P<0.05)。这是由于绿原酸作为金银花的主要功效成分和风味物质, 其提取率随泡制时间的增加而逐渐增大。当泡制时间过短时, 绿原酸等有效成分未能充分溶出, 茶汤风味淡薄; 而当泡制时间过长时, 绿原酸过度提取, 含量达到 162 μg/g, 茶汤的酸涩味变得过于突出, 严重影响了整体感官体验, 本研究结果与多数植物代用茶的提取规律一致。已有研究表明, 多数含多酚类物质的茶饮, 其感官品质均随提取时间呈现先升后降的变化趋势, 这主要与多酚类物质的溶出动力学特性相关。当提取时间超过最佳值后, 苦涩味物质的过量溶出会显著降低茶饮的适口性。因此, 综合考虑风味与功效成分溶出, 本研究确定金银花罗汉果茶的最适泡制时间为 25 min。

由图 1(b)可知, 随着泡制温度的升高, 金银花罗汉果茶的感官评分同样呈现先升高后降低的趋势。当泡制温度达到 90 ℃时, 感官评分达到最高值; 当泡制温度超过 90 ℃时, 茶汤苦涩味加重, 感官评分随之下降。经单因素显著性差异分析, 泡制温度对金银花罗汉果茶的感官评价影响显著(P<0.05)。温度是影响植物有效成分提取的关键因素之一。随着温度升高, 植物细胞壁破裂速度加快, 分子热运动增强, 绿原酸等水溶性成分在溶剂中的溶解和扩散速度显著提高, 提取率随之增大。但当温度过高时, 不仅会导致绿原酸等苦涩味物质过度溶出, 还可能破坏部分热敏性香气成分, 使茶汤风味变差。文献[22]研究表明, 在 25~100 ℃范围内, 金银花中绿原酸的提取率随温度升高而持续增大, 当温度升高至 100 ℃时, 绿原酸提取率达到最高值。这与本研究中温度对绿原酸提取率的影响规律完全一致。但本研究同时发现, 虽然 100 ℃时绿原酸提取率最高, 但此时茶汤苦涩味过重, 感官品质不佳。综合考虑该养生茶的生产成本、口感及营养保留等因素, 确定最适泡制温度为 90 ℃。

由图 1(c)可知, 随着金银花添加量的增加, 金银花罗汉果茶的感官评分呈现先升后降的趋势。当金银花添加量达到 2.2 g 时, 感官评分达到最高值; 当金银花添加量超过 2.2 g 时, 茶汤苦涩味明显加重, 适口性显著降低, 导致感官评分下降。经单因素显著性差异分析, 金银花添加量对金银花罗汉果茶的感官评价影响显著(P<0.05)。绿原酸是金银花的主要功效成分, 同时也是其主要的苦涩味来源。随着金银花添加量的增加, 茶汤中绿原酸的含量也随之增加。当添加量过低时, 金银花特有的清香和保健功效不足; 而当添加量过高时, 过量的绿原酸会使茶汤产生强烈的苦涩味, 掩盖了罗汉果的甜味, 破坏了整体风味平衡。文献[26]研究证实, 绿原酸在金银花幼蕾或未开花时含量最高(约 2%~5%), 此时金银花的苦涩味也最为明显。这一研究结果为解释本试验中金银花添加量与感官评分之间的关系提供了理论依据。因此, 本研究确定金银花的最适添加量为 2.2 g,

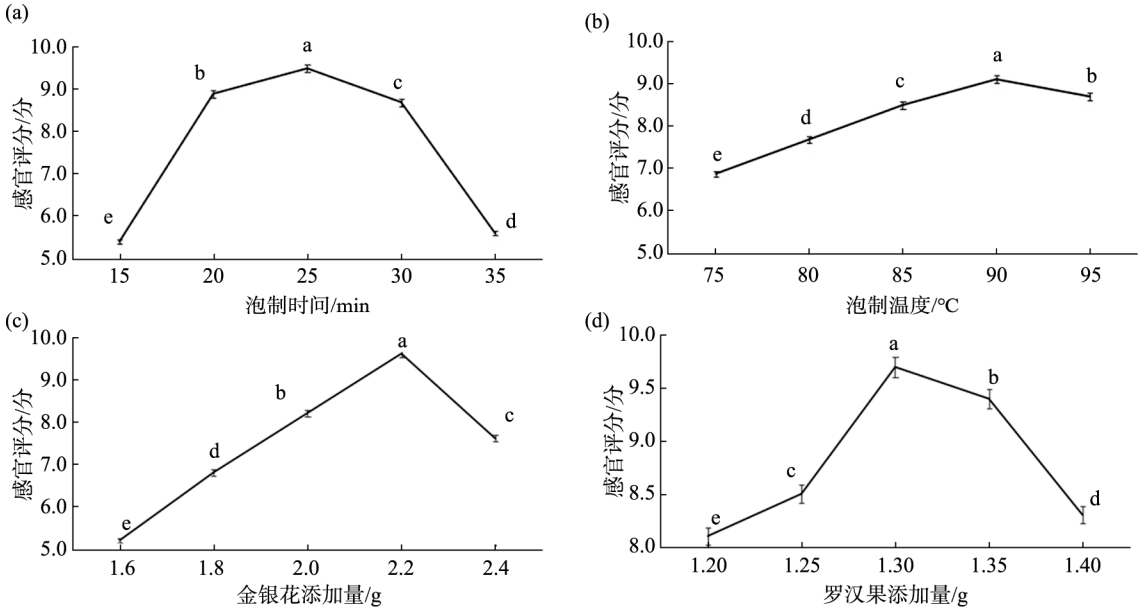
此时既能保证茶汤具有足够的金银花风味和保健功效，又能避免苦涩味过重。

由图 1(d)可知，随着罗汉果添加量的增加，金银花罗汉果茶的感官评分呈现先升后降的趋势。当罗汉果添加量达到 1.30 g 时，茶汤微甜适口，感官评分达到最高值；当罗汉果添加量超过 1.30 g 时，茶汤甜度过高，口感腻人，导致感官评分降低。经单因素显著性差异分析，罗汉果添加量对金银花罗汉果茶的感官评价影响显著(P<0.05)。罗汉果中的甜苷是一种天然高倍甜味剂，其甜度约为蔗糖的 300 倍，在金银花罗汉果茶中主要起到调节甜度、中和金银花苦涩味的作用。当罗汉果添加量过低时，无法有效中和金银花的苦涩味，茶汤口感偏酸偏涩；而当添加量过高时，甜度过高会使茶汤产生腻感，影响整体风味。文献[26]研究表明，罗汉果甜苷不被人体吸收代谢，不引起血糖波动，可作为糖尿病患者、糖耐量异常人群的安全代糖。这一特性使得金银花罗汉果茶具有更广泛的适用人群。综合考核其生产成本、工艺复杂程度及不同人群的口味需求，本研究确定在后续响应面试验中将罗汉果添加量定为1.30 g。

2.2 响应面试验结果及分析

2.2.1 优化试验

根据单因素试验的结果，以泡制时间(A)、泡制温度(B)、金银花添加量(C) 3 个因素进行响应面试验设计，每个设计进行 3 次平行试验，结果取平均值，见表 3。由表 3 可知：在响应面实验中，感官评分最高组(9.6 分)绿原酸含量多数为 144~154 μg/g，而高绿原酸组(175 μg/g)感官评分为 9.3 分，主要原因是绿原酸的含量超过 162 μg/g，茶汤的酸涩味比较突出，影响其感官评价。



注：不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

图 1 不同因素对金银花罗汉果茶感官评价的影响

Fig.1 Effects of different factors on sensory evaluation of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea

表 3 响应面实验设计及结果

Table 3 Experimental design and results of response surface

序号	A(泡制时间)/min	B(泡制温度)/℃	C(金银花添加量)/(g/500 mL)	Y_1(感官评分)/分	Y_2(绿原酸含量)/(μg/g)
1	30	90	2.0	7.8	148
2	25	85	2.4	9.5	166
3	25	85	2.0	9.5	145
4	20	90	2.4	9.3	175
5	30	85	2.2	9.5	152
6	30	95	2.2	8.1	148
7	25	90	2.2	9.6	151
8	25	90	2.2	9.5	151

表 3(续)

序号	A(泡制时间)/min	B(泡制温度)/℃	C(金银花添加量)/(g/500 mL)	Y_1(感官评分)/分	Y_2(绿原酸含量)/(μg/g)
9	25	95	2.0	9.2	134
10	25	95	2.4	7.6	162
11	30	90	2.4	7.7	160
12	25	90	2.2	9.6	144
13	20	85	2.2	9.5	147
14	20	90	2.0	9.3	137
15	25	90	2.2	9.6	151
16	25	90	2.2	9.6	154
17	20	95	2.2	8.5	150

2.2.2　二次响应面模型拟合结果与显著性分析

采用中心化后的自变量(A_c=A–25.3125, B_c=B–90.3125, C_c=C–2.20)进行回归, 得到二次响应面模型, 如下。

感官评分(Y_1)方程: Y_1=9.6000–0.0857A_c–0.1150B_c–1.0625C_c–0.0225 A_c^2 –0.0055 B_c^2 –12.8125 C_c^2 –0.0040A_cB_c–0.0250A_cC_c–0.4000B_cC_c

绿原酸含量(Y_2)方程: Y_2=150.0000–0.0250A_c–0.04000B_c+61.8750C_c+0.0500 A_c^2 –0.0800 B_c^2 +93.7500 C_c^2 –0.0700A_cB_c–6.5000A_cC_c+1.7500B_cC_c

由表 4 可知: Y_1(感官评分)响应面模型的 R^2=0.8641, P=0.0464, 说明金银花罗汉果茶的感官评分预测模型显著且有效; 由表 5 可知: Y_2(绿原酸含量)响应面模型的 R^2=0.9475, P=0.0034, 说明金银花罗汉果茶的绿原酸含量预测模型显著且有效。

2.2.3　NSGA-II 算法结果分析

根据上面的响应面模型, 使用 DEAP 库实现 NSGA-II 算法, 以感官评分(Y_1)和绿原酸含量(Y_2)为优化目标, 求解得到泡制工艺参数(A、B、C)的 Pareto 非支配解集, 所有解均满足“不存在另一组解, 使得两个目标同时更优”的非支配性原则, 完整保留了多目标优化的前沿特征, 获得金银花罗汉果茶泡制工艺的帕累托最优解集见表 6。基于“实用性”和“双目标平衡”原则, 金银花罗汉果茶泡制工艺的帕累托最优工艺组为组 3(平衡型), 即泡制时间 22.3 min, 泡制温度为 88.1 ℃, 金银花添加量为 2.3 g/500 mL 时, 感官评分为 9.72, 绿原酸含量为 159.25 μg/g。

2.3　验证实验结果分析

由表 3 可知, 感官最优为 9.6 分, 绿原酸最高含量为 175 μg/g, 因金银花罗汉果茶是养生茶, 需兼顾口感和功效, 因此, 采用 NSGA-II 算法进行双目标平衡后的参数进行验证。即选择组 3(平衡型)进行验证实验。以泡制时间 22.3 min、泡制温度 88.1 ℃、金银花添加量 2.3 g/500 mL 条件下开展平行实验 3 次。所得金银花罗汉果茶的感官评

表 4　感官评分响应面模型结果

Table 4　Results of the response surface model for sensory score

变量	系数	标准误	t	P	95 % 置信区间
截距	9.6000	0.223	42.977	0.000	9.053~10.147
A_c	–0.0875	0.032	–2.770	0.032	–0.165~0.010
B_c	–0.1150	0.032	–3.640	0.011	–0.192~0.038
C_c	–1.0625	0.790	–1.345	0.227	–2.995~0.870
A_c^2	–0.0225	0.009	–2.518	0.045	–0.044~0.001
B_c^2	–0.0055	0.009	–0.616	0.561	–0.027~0.016
C_c^2	–12.8125	5.584	–2.294	0.062	–26.477~0.852
A_cB_c	–0.0040	0.009	–0.448	0.670	–0.026~0.018
A_cC_c	–0.0250	0.223	–0.112	0.915	–0.572~0.522
B_cC_c	–0.4000	0.223	–1.791	0.124	–0.947~0.147
R^2	0.8641	R^2_{adj}	0.6602		
F	4.2376	P	0.0464		

表 5　绿原酸含量响应面模型结果

Table 5　Results of the response surface model for chlorogenic acid content

变量	系数	标准误	t	P	95 % 置信区间
截距	150.0000	1.879	79.823	0.000	145.402~154.598
A_c	–0.0250	0.266	–0.094	0.928	–0.675~0.625
B_c	–0.4000	0.266	–1.505	0.183	–1.050~0.250
C_c	61.8750	6.644	9.313	0.000	45.618~78.132
A_c^2	0.0500	0.075	0.665	0.531	–0.134~0.234
B_c^2	–0.0800	0.075	–1.064	0.328	–0.264~0.104
C_c^2	93.7500	46.979	1.996	0.093	–21.204~208.704
A_cB_c	–0.0700	0.075	–0.931	0.388	–0.254~0.114
A_cC_c	–6.5000	1.879	–3.459	0.013	–11.098~1.902
B_cC_c	1.7500	1.879	0.931	0.388	–2.848~6.348
R^2	0.9475	R^2_{adj}	0.8687		
F	12.0395	P	0.0034		

表 6 金银花罗汉果茶泡制工艺的帕累托最优解集表

Table 6 Pareto optimal solution set for the brewing process of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea

最优工艺组	*A*(泡制时间)/min	*B*(泡制温度)/℃	*C*(金银花添加量)/(g/500 mL)	模型预测 Y_1(感官评分)	模型预测 Y_2(绿原酸含量)/(μg/g)	适用场景
组 1(高绿原酸)	20.5	90.2	2.4	8.82	173.63	追求功效成分(绿原酸)优先
组 2(高感官)	24.8	85.5	2.2	10.06	149.93	追求饮用口感优先
组 3(平衡型)	22.3	88.1	2.3	9.72	159.25	兼顾口感与功效(推荐)

分为 9.4 分, 其绿原酸含量为 162.6 μg/g。将泡制条件代入预测模型 Y_1 和预测模型 Y_2, 得出金银花罗汉果茶的感官评分为 9.72 分, 其绿原酸含量为 159.25 μg/g。测定结果与预测模型计算结果进行对比, 感官评分、绿原酸含量与预测值得的误差均小于 5%, 说明预测模型可靠、有效。

2.4 金银花罗汉果茶汤抗氧化活性分析

参考文献[26–27]的抗氧化活性研究方法, 将高温杀菌后的金银花罗汉果茶汤密封处理, 置于 35 ℃条件下贮藏 7 d, 在设定时间节点测定样品绿原酸、总酚含量及 DPPH 自由基清除率, 以此探究贮藏过程中茶汤抗氧化活性的变化规律。按照优化工艺, 制作的金银花罗汉果茶汤, 对产品进行高温杀菌后, 密封贮存于 35 ℃环境中 7 d。分别于当天、第 1、2、3、5、7 d 测定产品的绿原酸含量、总酚含量和 DPPH 自由基清除率, 结果见图 5~7。

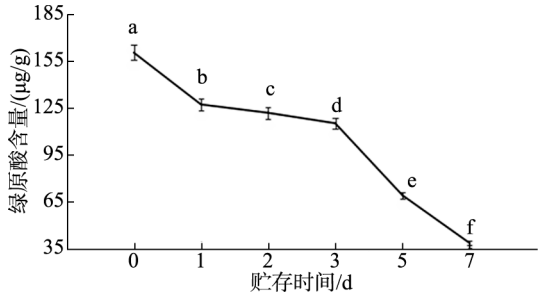


图 5 金银花罗汉果茶汤中绿原酸含量变化情况

Fig.5 Changes in chlorogenic acid content in *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea infusion

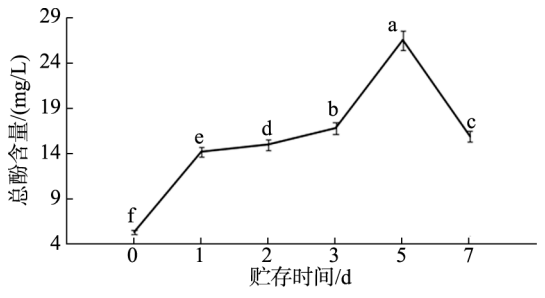


图 6 金银花罗汉果茶汤中总酚含量变化情况

Fig.6 Changes in total phenol content in *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea infusion

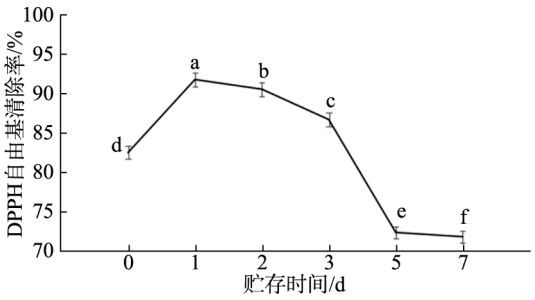


图 7 金银花罗汉果茶汤 DPPH 自由基清除率变化情况

Fig.7 Changes in DPPH free radical scavenging rate of *Lonicera japonica* and *Siraitia grosvenorii* tea infusion

由图 5~7 可知, 绿原酸降解减缓、总酚含量及自由基清除率均呈先升后降的趋势, 该变化与金银花罗汉果茶汤中还原糖的作用密切相关。还原糖可通过美拉德反应竞争、抗氧化保护作用减缓绿原酸降解[28]; 初期辅助释放结合态酚类使总酚升高, 后期因聚合、消耗作用导致总酚下降[29]; 与酚类协同增强初期自由基清除能力, 后续随自身及酚类消耗而使清除率降低[30]。综上所述, 还原糖通过多重机制, 调控了绿原酸、总酚及自由基清除率的动态变化, 与本研究观测结果高度契合。

3 结 论

本研究以罗汉果、金银花为主要原料制备金银花罗汉果养生茶。以汤色与澄清度、香气、滋味为主要内容的感官评分结合绿原酸含量为评价指标, 通过单因素试验、感官评分分析、响应面法和 NSGA-II 算法对金银花罗汉果茶进行感官和绿原酸含量的双目标优化, 在最优工艺条件下制作金银花罗汉果茶, 对其茶汤在不同贮存时间下研究绿原酸含量、总酚含量和 DPPH 自由基清除率进行探索。结果表明: 最佳配方为罗汉果添加量 1.30 g/500 mL, 泡制时间 22.3 min、泡制温度 88.1 ℃、金银花添加量 2.3 g/500 mL, 所制得的金银花罗汉果茶不仅获得良好的感官评价, 同时含有较高的绿原酸含量, 兼顾口感和功能, 并且其茶汤的绿原酸含量在前 3 d 降低较缓, 超过第 3 d 降低较快, 总酚

及自由基清除率随着贮存时间的延长呈现先增加后降低的趋势。本研究为金银花罗汉果茶及其他养生茶研发及工业化生产提供技术支撑, 对传统凉茶的产业优化升级具有一定现实意义。

参考文献

[1] 潘明飞, 杨晶莹, 李睿, 等. 药食同源食品金银花中绿原酸标准物质的研制与评价[J]. 中国食品学报, 2020, 20(4): 224–232.
Pan Mingfei, Yang Jingying, Li Rui, et al. Development and evaluation of chlorogenic acid reference material in *Honeysuckle* of medicinal and food homologous food [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(4): 224–232.

[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 342.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (volume 1) [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 342.

[3] 吴娇, 王聪, 于海川. 金银花中的化学成分及其药理作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2019, 25(4): 225–234.
Wu Jiao, Wang Cong, Yu Haichuan. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Lonicerae japonicae* Flos [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2019, 25(4): 225–234.

[4] 颜世超, 刘春红. 金银花的化学成分与药理作用研究进展[J]. 中医药信息, 2025, 42(5): 84–88.
Yan Shichao, Liu Chunhong. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Lonicera japonica* Flos [J]. Information on Traditional Chinese Medicine, 2025, 42(5): 84–88.

[5] 吕品, 李晓天. 基于体外试验和网络药理学研究金银花抗炎抗菌活性及分子机制[J]. 中国现代应用药学, 2021, 38(14): 1678–1685.
Lv Pin, Li Xiaotian. Molecular mechanism of anti-inflammatory and antibacterial activity of *Lonicerae japonicae* Flos based on *in vitro* experiments and network pharmacology [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2021, 38(14): 1678–1685.

[6] 金绍娣, 顾东雅, 裴丽, 等. 基于 SFODLPME-HPLC-QAMS 法测定金银花中黄酮类成分含量的研究[J]. 化学与生物工程, 2026, 43(1): 64–70.
Jin Shaodi, Gu Dongya, Pei Li, et al. Determination of flavonoids in *Lonicera japonica* by SFODLPME-HPLC-QAMS method [J]. Chemical and Bioengineering, 2026, 43(1): 64–70.

[7] 刘晓龙, 李春燕, 薛金涛. 金银花主要活性成分及药理作用研究进展[J]. 新乡医学院学报, 2021, 38(10): 992–995.
Liu Xiaolong, Li Chunyan, Xue Jintao. Research progress on the main active components and pharmacological effects of *Lonicera japonica* [J]. Journal of Xinxiang Medical University, 2021, 38(10): 992–995.

[8] 高杰, 李力恒, 张宇飞, 等. 金银花化学成分、药理作用及现代应用研究进展[J/OL]. 中国实验方剂学杂志, 1–15. [2026-01-24]. https://doi.org/10.13422/j. cnki. syfjx.20251730.
Gao Jie, Li Liheng, Zhang Yufei, et al. Research progress on the chemical constituents, pharmacological effects and modern applications of Lonicerae Japonicae Flos [J/OL]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 1–15. [2026-01-24]. https: //doi. org/10.13422/j. cnki. syfjx. 20251730.

[9] Suri S, Kathuria D, Mishra A, et al. Phytochemical composition and pharmacological impact of natural non-calorie sweetener-monk fruit (*Siraitia grosvenorii*): a review [J]. Nutrition & Food Science, 2021, 51(6): 897–910.

[10] 杨双艳, 李汴生, 黎来凤, 等. 化橘红罗汉果的浸提工艺及其优化[J]. 中国调味品, 2025, 50(6): 151–157.
Yang Shuangyan, Li Biansheng, Li Laifeng, et al. Extraction process of citrus grandis tomentosa and siraitia grosvenorii and its optimization [J]. China Condiments, 2025, 50(6): 151–157.

[11] 唐昀彤, 侯小涛, 杜正彩, 等. 罗汉果化学成分与药理作用的研究进展及其质量标志物(Q-Marker)预测分析[J]. 中草药, 2021, 52(9): 2843–2850.
Tang Yuntong, Hou Xiaotao, Du Zhengcai, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Siraitiae* fructus and predictive analysis on quality markers [J]. Chinese Herbal Medicines, 2021, 52(9): 2843–2850.

[12] 刘鹏, 张少梅, 段玉林, 等. 罗汉果果实组分含量特征分析及其品质评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 195–203.
Liu Peng, Zhang Shaomei, Duan Yulin, et al. Analysis of content characteristics and quality evaluation of *Siraitia grosvenorii* fruit components [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 195–203.

[13] 利晓滢, 李伟略, 曹亚兰, 等. 罗汉果金银花固体饮料工艺研究[J]. 农产品加工, 2023(18): 42–44, 47.
Li Xiaoying, Li Weilue, Cao Yalan, et al. Study on the process of the *Siraitia grosvenorii* and *Lonicerae japonicae* solid beverage [J]. Farm Products Processing, 2023(18): 42–44, 47.

[14] 赵伟志, 郑晓英, 游庭活, 等. 正交试验结合多指标权重分析法优选金银花喷雾干燥工艺[J]. 成都中医药大学学报, 2024, 47(2): 23–28.
Zhao Weizhi, Zheng Xiaoying, You Tinghuo, et al. Optimization of *Honeysuckle* spray drying process by orthogonal test combined with multi-index weight analysis method [J]. Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2024, 47(2): 23–28.

[15] 汪小谷, 戴前颖, 汤志近, 等. 茶叶审评在眉茶出口贸易中的应用[J]. 中国茶叶加工, 2021(2): 62–66.
Wang Xiaogu, Dai Qianying, Tang Zhijin, et al. Application of tea sensory evaluation on Chunmee tea export [J]. China Tea Processing, 2021(2): 62–66.

[16] 刘琳, 杨莹, 黄冰锋, 等. 茶叶审评术语分析与应用[J]. 农业技术与装备, 2021(8): 107–108.
Liu Lin, Yang Ying, Huang Bingfeng, et al. Analysis and application of tea evaluation terms [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2021(8): 107–108.

[17] Hua Jinjie, Li Jia, Ouyang Wen, et al. Effect of strobilanthes tonkinensis lindau addition on black tea flavor quality and volatile metabolite content [J]. Foods, 2022, 11(12): 1678.

[18] Qi Shunyao, Zeng Tiexin, Wu Peiling, et al. Widely targeted metabolomic analysis reveals effects of yellowing process time on the flavor of vine tea (*Ampelopsis grossedentata*) [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101446.

[19] Wang Teng, Li Ruoyu, Liu Kunyi L, et al. Changes in sensory characteristics, chemical composition and microbial succession during fermentation of ancient plants Pu-erh tea [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101003.

[20] Wang Jie, Li Xiaohan, Wu Ying, et al. HS-SPME/GC-MS reveals the season effects on volatile compounds of green tea in high-latitude region [J]. Foods, 2022, 11(19): 3016.

[21] 黄柳霞, 许雪儿, 李莲. HPLC 法同时测定植物饮料中 7 种绿原酸[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 218–223.
Huang Liuxia, Xu Xueer, Li Lian. Simultaneous determination of seven chlorogenic acids in plant vegetable beverages by HPLC [J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2024, 37(2): 218–223.

[22] 王燕, 卢恒, 邹晓菊, 等. 金银花中绿原酸提取分离纯化方法研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2022, 40(8): 186–189.
Wang Yan, Lu Heng, Zou Xiaoju, et al. Research progress on the extraction, separation and purification methods of chlorogenic acid from *Lonicerae japonicae* Flos [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2022, 40(8): 186–189.

[23] 钱佳仪, 夏熠珣, 侯姣靓, 等. 采摘时期对菊花茶汤感官及理化属性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(9): 56–65.
Qian Jiayi, Xia Yixun, Hou Jiaoliang, et al. Effects of harvesting period on sensory and physicochemical properties of chrysanthemum infusion [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(9): 56–65.

[24] 程筱阳, 万琪林, 胡栋宝, 等. 冲泡条件对蒲公英茶抗氧化活性及有效成分的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 243–253.
Cheng Xiaoyang, Wan Qilin, Hu Dongbao, et al. Effects of brewing conditions on the antioxidant activities and bioactive components of *Taraxacum mongolicum* tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 243–253.

[25] Scriven A, Kedziora D J, Musial K, et al. The technological emergence of automl: a survey of performant software and applications in the context of industry [J]. Foundations and Trends in Information Systems, 2023, 7(1-2): 1–252.

[26] Guidance for industry on abbreviated new drug applications: stability testing of drug substances and products, questions and answers; availability [Z]. U.S. Food & Drug Administration Documents/FIND, 2014, 79(94).

[27] 张丽华, 王子阳, 李顺峰, 等. 不同杜仲叶茶活性成分及抗氧化活性的比较[J]. 中国酿造, 2024, 43(11): 194–199.
Zhang Lihua, Wang Ziyang, Li Shunfeng, et al. Comparison of active components and antioxidant activities of different *Eucommia ulmoides* leaf tea [J]. China Brewing, 2024, 43(11): 194–199.

[28] 张坤, 刘小刚, 李慧永, 等. 加热时长和糖含量对咖啡果皮酱品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(24): 97–104.
Zhang Kun, Liu Xiaogang, Li Huiyong, et al. Effects of heating time and sugar content on the quality of coffee peel jam [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(24): 97–104.

[29] Li Xuan, Gao Kun, Bi Jinfeng, et al. Investigation of the effects of apple polyphenols on the chromatic values of weakly acidic lysine-fructose maillard system solutions [J]. LWT, 2020, 125(prepublish): 109237.

[30] 王玉婷, 吕佳佳, 杨新河, 等. 不同茶叶水提取物抗氧化活性研究[J]. 湖北工程学院学报, 2020, 40(6): 15–18.
Wang Yuting, Lv Jiajia, Yang Xinhe, et al. Study on antioxidant activities of different tea water extracts [J]. Journal of Hubei Engineering University, 2020, 40(6): 15–18.

(责任编辑: 安香玉 曹岱琳)