DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260323002
引用格式: 罗蓓蓓, 赵梦瑶, 张立攀, 等. 连翘叶红茶发酵工艺优化及其香气分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 141–150.
Luo Beibei, Zhao Mengyao, Zhang Lipan, et al. Optimization of fermentation process and aroma analysis of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 141–150. (in Chinese with English abstract).

连翘叶红茶发酵工艺优化及其香气分析

罗蓓蓓[1,2], 赵梦瑶[1,2], 张立攀[1,2*], 王俊朋[1,2], 李 冰[1,2], 贾子璐[3], 王冠蓝[4], 庞思雨[5], 陈建军[6]

(1. 河南省商业科学研究所有限责任公司, 郑州 450000; 2. 河南省食品质量安全控制工程技术研究中心, 郑州 450002; 3. 河南农业大学园艺学院, 郑州 450002; 4. 河南中医药大学药学院, 郑州 450046; 5. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 6. 河南师范大学生命科学学院, 新乡 453000)

摘 要: 目的 优化连翘叶红茶加工工艺, 改善并提升其风味品质, 明晰其特征香气物质组成。**方法** 以感官综合评分为评价指标, 通过单因素试验探究发酵温度、发酵湿度及发酵时间对连翘叶红茶风味品质的影响, 结合 Box-Behnken 响应面法优化最佳发酵工艺条件。采用顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)结合气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析样品挥发性风味成分, 并基于气味活度值(odor activity value, OAV)筛选关键香气活性物质。**结果** 连翘叶红茶最优发酵工艺为发酵温度 32 ℃、发酵时间 3.8 h、发酵湿度 91%, 此工艺制备的连翘叶红茶汤色红亮、香气清高、滋味浓醇, 感官品质明显提升。从样品中共鉴定出 56 种挥发性风味化合物, 包括醛类、醇类、酮类、烯类、酚类等共 8 大类; 其中 3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、苯乙醛、芳樟醇、壬醛、苯乙醇、*α*-松油醇、香叶醇、丁香酚、反,反-2,4-癸二烯醛为连翘叶红茶的关键香气活性物质。**结论** 适宜的发酵工艺可明显改善连翘叶红茶感官风味, 醛类和醇类物质是其特征香气的核心贡献成分。本研究优化的工艺稳定可行, 可为连翘叶红茶规模化生产及风味品质调控提供一定参考。

关键词: 连翘叶红茶; 风味品质; 感官评价; 响应面法; 香气
中图分类号: S571.1 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)17–0141–10

Optimization of fermentation process and aroma analysis of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves

LUO Bei-Bei[1,2], ZHAO Meng-Yao[1,2], ZHANG Li-Pan[1,2*], WANG Jun-Peng[1,2], LI Bing[1,2], JIA Zi-Lu[3], WANG Guan-Lan[4], PANG Si-Yu[5], CHEN Jian-Jun[6]

(1. *Henan Commerce Science Institute Co*., *Ltd*., *Zhengzhou* 450000, *China*; 2. *Food Quality and Safety Control Engineering Technology Research Center of Henan Province*, *Zhengzhou* 450002, *China*; 3. *College of Horticulture*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450002, *China*; 4. *School of Pharmacy*, *Henan University of Chinese Medicine*, *Zhengzhou* 450046, *China*; 5. *College of Food Science and Engineering*, *Henan University of Technology*, *Zhengzhou* 450001, *China*; 6. *College of Life Science*, *Henan Normal University*, *Xinxiang* 453000, *China*)

收稿日期: 2026-03-23
基金项目: 河南省中央引导地方科技发展资金项目(Z20241471145); 河南省科学院科技成果转化项目(241611016); 河南省重大科技专项项目(231100310200); 河南省重点研发专项项目(251111112300, 261111114900); 河南省科学院培育助推项目(20253811001, 20253811002); 河南省科技研发联合基金项目(235200810019, 245200810024); 河南省科技攻关项目(262102110078)
第一作者: 罗蓓蓓(1990—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品工艺、标准制订相关研究。E-mail: 578187660@qq.com
***通信作者**: 张立攀(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为天然产物提取、食品化学。E-mail: lipanzhang@163.com

ABSTRACT: Objective To optimize the processing technology of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves, improve and enhance its flavor quality, and clarify the composition of its characteristic aroma substances. **Methods** Taking the comprehensive sensory evaluation score as the evaluation index, the effects of fermentation temperature, fermentation humidity and fermentation time on the flavor quality of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves were explored through single-factor experiments, and the Box-Behnken response surface method was used to optimize the optimal fermentation process conditions. The headspace solid phase microextraction (HS-SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) technology was applied to analyze the volatile flavor components of samples, and the key aroma-active substances were screened based on odor activity value (OAV). **Results** The optimal fermentation process parameters for black tea made by *Forsythia suspensa* leaves were determined as fermentation temperature of 32 ℃, fermentation time of 3.8 h and fermentation humidity of 91%. The tea prepared under these conditions presented bright red liquor, elegant aroma and mellow taste, with significantly improved sensory quality. A total of 56 volatile flavor compounds were identified from the samples, belonging to 8 categories, mainly including aldehydes, alcohols, ketones, alkenes and phenols. Among them, 3-methylbutanal, 2-methylbutanal, phenylacetaldehyde, linalool, nonanal, phenethyl alcohol, *α*-terpineol, geraniol, eugenol and trans, trans-2,4-decadienal were the key aroma-active substances of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves. **Conclusion** Appropriate fermentation process can significantly improve the sensory flavor of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves. Aldehydes and alcohols are the core contributing components of its characteristic aroma. The optimized process in this study is stable and feasible, which can provide a certain reference for the large-scale production and flavor quality regulation of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves.

KEY WORDS: black tea made by *Forsythia suspensa* 1eaves; flavor quality; sensory evaluation; response surface method; aroma

0 引 言

连翘(*Forsythia suspensa*)是木犀科连翘属植物, 具有清热解毒的功效。连翘主要分布于河南、山西、陕西等省份。资料记载自汉代起连翘叶就被用来制作茶饮, 具有清热、清心明目、延年益寿、美容驻颜等功效[1]。在种植当地, 人们有制作并饮用连翘叶茶的习惯。

传统连翘多以果实入药, 而连翘叶多被丢弃, 造成了资源的浪费。现代研究发现, 连翘叶具有抗菌、抗病毒的功效[2–3], 在抗氧化、保肝、抗炎、降血糖和降血脂等方面也有显著效果[4–6]。新鲜连翘叶经传统的红茶制作工艺(萎凋、揉捻、发酵、烘焙等)可以得到连翘叶红茶, 含有丰富的蛋白质、氨基酸、微量元素、黄酮等成分, 是一种低脂营养的健康饮品[7–9], 符合大健康背景下人们对功能性保健食品的需求。但目前的连翘叶红茶存在风味寡淡的问题, 导致消费者接受度不高, 限制了其市场发展, 提升连翘叶红茶的风味品质, 是目前研究的热点。

茶叶的风味是评价其品质好坏的重要指标。在连翘叶红茶的制作过程中, 发酵是其风味产生的关键环节, 对茶叶最终品质起着决定性作用[10–11]。研究表明, 在发酵的过程中, 连翘叶含有的糖苷类、游离氨基酸、脂肪酸等风味前体物质, 在微生物的作用下, 进一步转化生成风味物质, 形成连翘叶红茶的特征香气, 而发酵条件则影响着连翘叶红茶中香气物质种类和含量[12]。目前连翘叶红茶的研究多集中于其功效作用, 对其风味进行调控的研究还鲜见报道。

本研究通过 Box-Behnken 响应面法结合感官评价法对连翘叶红茶的发酵工艺进行优化, 以期对连翘叶红茶风味进行改善, 并采用顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)结合气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术对连翘叶红茶的香气进行分析, 从分子角度对连翘叶红茶的香气组分进行揭示, 以期为连翘叶红茶的风味品质提升及连翘叶资源的综合开发提供更多理论与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

连翘叶(萎凋、揉捻后), 河南省三门峡市卢氏县杨献民茶业有限公司提供。

正构烷烃(C_5~C_{25}, 纯度≥97%, 美国 o2si 标准品公司); 邻二氯苯[纯度≥98%, 梯希爱(上海)化成工业发展有限公司]; 甲醇(色谱纯, 西格玛奥德里奇上海贸易有限公司)。

FSJ-A03EI 粉碎机(小熊电器股份有限公司); XPR226DR 分析天平[感量 0.01 mg, 梅特勒托利多科技(中国)有限公司]; KQ-700DE 数控超声波清洗器(昆山市超声

仪器有限公司); TU-1901 双光束紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); 8890-5977B 气相色谱-质谱联用仪、HP-5MS 色谱柱(30 m×250 μm, 0.25 μm)[安捷伦科技(中国)有限公司]; 手动 SPME 进样器、萃取纤维(65 μm PDMS/DVB)(美国 Supelco 公司); WGL-45B 电热鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司); BXS-400 可扩展试验箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); DHS-20A 电子水分测定仪(宁波市州华丰电子仪器厂)。

1.2　试验方法

1.2.1　连翘叶红茶制备工艺

连翘鲜叶经萎凋、揉捻、发酵、初烘、复烘处理制备连翘叶红茶。初烘温度 100~105 ℃, 水分控制在 10%~15%, 烘烤过的茶进行摊凉至室温; 复烘温度 105~110 ℃, 水分控制在 6%~7%, 复烘结束后摊凉 30 min 以上散热至室温, 装袋后–18 ℃保存, 待感官评价。

1.2.2　连翘叶红茶发酵单因素试验

(1)发酵温度的影响

设置发酵时间为 4 h, 发酵湿度为 90%, 以发酵温度分别为 20、25、30、35、40 ℃进行发酵。

(2)发酵时间的影响

设置发酵温度为 30℃, 发酵湿度为 90%, 发酵时间分别为 2、3、4、5、6 h 进行发酵。

(3)发酵湿度的影响

设置发酵温度为 30℃、发酵时间为 4 h, 以发酵湿度分别为 60%、70%、80%、90%、95%进行发酵。

1.2.3　Box-Behnken 响应面试验

基于单因素试验结果, 根据 Box-Behnken 试验设计原理, 以发酵温度(*A*)、发酵时间(*B*)、发酵湿度(*C*)为影响因素, 进行 3 因素 3 水平试验, 因素与水平设置见表 1。

1.2.4　感官评定

依据 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》中的红茶审评方法并稍作修改。

感官评定小组由受过培训且有经验的专业人员(10 人, 5 男 5 女)组成。实验前对感官评价员开展感官一致性校准评价, 通过统一评分标准、标准样品对标、预打分偏差校验完成尺度统一, 消除个体评判差异, 保证感官评价结果稳定一致。

表 1　响应面设计因素与水平

Table 1　Factors and levels of response surface methodologies

因素	水平		
	–1	0	1
A: 发酵温度/℃	27	30	33
B: 发酵时间/h	3.5	4.0	4.5
C: 发酵湿度/%	87	90	93

对连翘叶红茶(冲泡茶水比为 1:50, g:mL)的外形、汤色、香气、滋味、叶底 5 个指标进行评分, 评价标准如表 2 所示。

感官评价综合得分(*Y*)为各指标得分与系数乘积之和, 计算见公式(1):

$$Y=X_1\times25\%+X_2\times10\%+X_3\times25\%+X_4\times30\%+X_5\times10\% \quad (1)$$

式中: X_1、X_2、X_3、X_4、X_5 分别为外形、香气、汤色、滋味和叶底各项的评审得分。

1.2.5　HS-SPME-GC-MS 测定挥发性成分

(1)样品准备

采用响应面试验所得最优条件制备连翘叶红茶, 经粉粹机粉碎后过 60 目筛, 密封后置于干燥器中备用。

(2)连翘叶红茶挥发性成分的提取

称取 2 g 连翘叶红茶粉置于 40 mL 顶空瓶中, 加入 5 mL 沸水和 1 μL 的邻二氯苯-甲醇溶液(0.607 mg/mL), 迅速密封, 将其置于 80 ℃水浴中平衡 20 min, 将老化过的固相微萃取进样针插入密闭的顶空瓶中, 萃取吸附 40 min, 取出后立即插进 GC-MS 进样口中, 解析 5 min。

(3)连翘叶红茶挥发性成分的 GC-MS 分析

GC 条件: 色谱柱为 HP-5MS (30 m×250 μm, 0.25 μm), 采用程序升温模式, 起始温度为 40 °C, 保持 2 min, 以 3 °C/min 速率升至 80°C, 保持 1 min, 再以 3 °C/min 速率升至 160 °C, 再以 20 °C/min 速率升至 230 °C, 进样口温度 250 °C; 以 He (99.999%)为载气, 流速 1.0 mL/min; 不分流模式。

表 2　感官评价评分标准表

Table 2　Scoring criteria table of sensory evaluation

指标	评分标准		
	好(4 分)	较好(3 分)	一般(1 分)
外形	形状紧卷, 条形完整, 色泽均匀	形状较紧卷, 条形较完整, 色泽较均匀	形状松散, 条形细碎, 色泽不均匀
汤色	澄净透明, 汤色稳定	较为澄净透明, 汤色较为稳定	混浊不清, 汤色变化, 不稳定
香气	茶香明显, 香气持久	茶香较为明显, 香气较为持久, 无异味	香气寡淡, 不持久, 有异味
滋味	醇厚爽口、回味清甜	较为醇厚, 回味较为清甜	入口发涩, 有黏腻感
叶底	红明亮, 展开度好	红尚亮, 展开度较好	尚红亮, 展开度较差

MS 条件: 离子源温度 230 ℃, 电离方式: 电子轰击电离(electron ionization, EI), 电离能量为 70 eV; 四极杆温度 150 ℃, 传输线温度 250 ℃, 无溶剂延迟, 质量扫描范围为 33~450 amu, 全扫描模式。

(4)保留指数的计算

正构烷烃采取分流模式进样 1 μL, 分流比 20:1。其他进样条件与连翘叶红茶样品保持一致。保留指数(retention index, RI)计算见公式(2):

$$RI = 100\times\left(n+\frac{\lg t_i - \lg t_n}{\lg t_{n+1} - \lg t_n}\right) \quad (2)$$

式中: $\lg t_n$ 和 $\lg t_{n+1}$ 分别为碳数为 n, n+1 的正构烷烃的保留时间的对数; $\lg t_i$ 是出峰在 n 和 n+1 的正构烷之间的 i 化合物的保留时间的对数。

(5)化合物定性和定量

将 GC-MS 分析后的结果与 NIST 20 谱库进行比对, 以匹配系数大于 80%作为物质的鉴定标准, 化合物含量(C)计算见公式(3):

$$C = \frac{A_{化合物}\times C_{内标}}{A_{内标}} \quad (3)$$

式中: $A_{化合物}$为未知化合物的峰面积; $A_{内标}$为内标物质峰面积; $c_{内标}$为内标物质浓度, μg/g。

(6)气味活度值的计算

气味活度值(odor activity value, OAV)的计算见公式(4):

$$OAV = c/T \quad (4)$$

式中: c 为香气成分浓度, μg/g; T 为香气阈值, mg/kg。

1.3 数据处理

所有试验均重复 3 次, 数据取平均值, 采用 Origin Pro 2021 绘图, Design-Expert 12、SPSS 22.0 进行响应面试验数据处理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 发酵温度对连翘叶红茶风味的影响

由图 1(A)可知, 随着发酵温度的升高, 连翘叶红茶的感官评价综合评分呈现先增加后降低的趋势, 在发酵温度为 30 ℃时, 评分最高。研究表明, 叶温的变化会影响氧化还原酶的活性, 温度过低会导致酶活性减弱, 达不到成分转化的要求, 造成香气物质生成量较少, 味道淡, 颜色偏暗[13–14]。温度过高时酶蛋白易与氧化的多酚类结合形成不溶性物, 不利用红茶品质的提高[15]。因而选择发酵温度 27、30、33 ℃进行后续试验。

2.1.2 发酵时间对连翘叶红茶风味的影响

由图 1(B)可知, 随着发酵时间的增加, 感官评价综合得分呈先升高后降低的趋势, 在时间为 4 h 时感官评价综合得分最高。发酵时间较短时青涩味比较重, 随着发酵时间的增加, 刺激性的气味变小, 甜香、花果香逐渐凸显, 但发酵时间过长会产生酸馊味, 影响茶汤滋味, 导致评分降低。发酵过程中黄酮类物质发生转化、多酚类物质氧化聚合生成有色物质, 是形成汤色红亮的物质基础, 但发酵时间大于 4 h 后, 褐色物质生成过量对茶叶色泽产生不利影响[16]。因而选择发酵时间为 3.5、4.0、4.5 h 进行后续试验。

2.1.3 发酵湿度对连翘叶红茶风味的影响

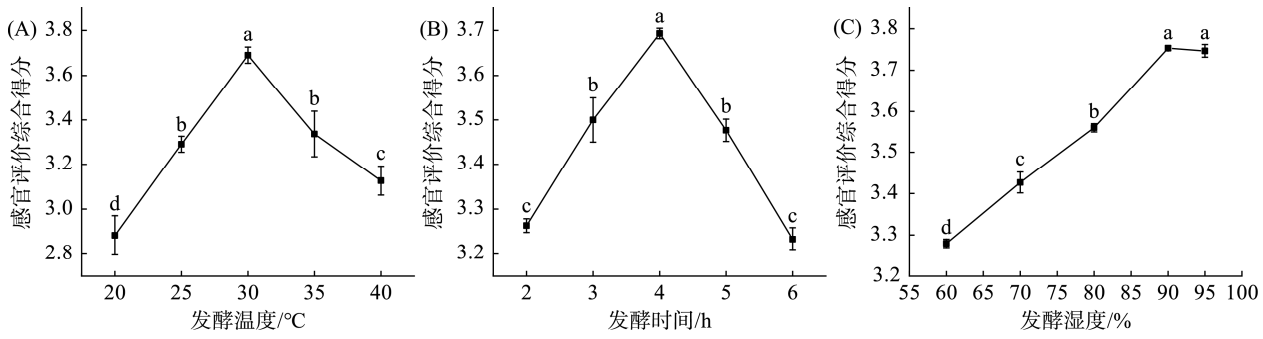
由图 1(C)可知湿度在 60%~95%之间时, 感官评价综合得分总体呈现上升趋势, 在 90%出现最高点。发酵过程中湿度过高可能会造成氧气供应不足, 干扰多酚氧化酶的活性而使得品质降低[17]。因而选择发酵湿度为 87%、90%、93%进行后续试验。

2.2 Box-Behnken 响应面试验结果

2.2.1 响应面试验设计与结果及方差分析

根据单因素的试验结果, 以感官评价综合得分为响应值, 发酵温度(A)、发酵时间(B)和发酵湿度(C)为响应因素, 通过 Design-Expert 12 软件设计连翘叶红茶发酵工艺的响应面优化试验, 结果见表 3。

采用 Design-Expert 12 软件对表 3 结果进行多元回归拟合分析, 得到模型回归方程为: Y=3.67+0.1675A–0.0337B+0.0612C–0.0475AB–0.0125AC–0.15BC–0.15A^2–0.1525B^2–0.1725C^2。对回归模型进行方差分析, 结果见表 4。



注: 不同小写字母表示具有差异性显著(P<0.05)。

图 1 不同因素对连翘叶红茶风味的影响

Fig.1 Effects of different factors on the flavor of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves

表 3　Box-Behnken 响应面试验结果

Table 3　Results of the Box-Behnken response surface test

组号	*A*: 发酵温度/℃	*B*: 发酵时间/h	*C*: 发酵湿度/%	感官评价综合得分
1	–1	–1	0	3.15
2	0	0	0	3.57
3	0	1	1	3.21
4	–1	0	–1	3.13
5	1	1	0	3.49
6	0	–1	–1	3.18
7	1	0	1	3.54
8	0	0	0	3.70
9	1	–1	0	3.63
10	0	1	–1	3.39
11	1	0	–1	3.44
12	–1	1	0	3.20
13	0	0	0	3.72
14	0	0	0	3.59
15	0	0	0	3.77
16	0	–1	1	3.60
17	–1	0	1	3.28

此模型 *P* 为 0.0005, 小于 0.05, 说明模型结果显著, 具有统计学意义; 失拟项 *P* 为 0.8450, 大于 0.05, 结果不显著, 说明该模型与试验结果拟合程度较好, 无失拟因素; R^2=0.9529, 调整决定系数 R^2_{adj}=0.8914, 大于 0.80, 进一步证明该模型与试验结果拟合程度较好, 可用来对连翘叶红茶发酵工艺进行分析和预测。根据表 4 中 *F* 可知, 影响提取率大小的因素依次为: 发酵温度(*A*)>发酵湿度(*C*)>发酵时间(*B*)。此外, 通过 *P* 可知, *A*、*BC*、A^2、B^2、C^2 对连翘叶红茶品质有极显著影响(*P*<0.01), *C* 对连翘叶红茶品质有显著影响(*P*<0.05)。

2.2.2　各因素间交互作用的响应面分析

为了考察发酵温度、发酵时间和发酵湿度交互作用对感官评价综合得分的影响, 通过 Design-Expert 12 软件绘制任意两个因素交互作用对连翘叶红茶品质的响应面图及等高线图, 如图 2 所示。模型的响应曲面与等高线的形状能够反映因素变量对响应值的影响和因素之间交互作用的显著性, 即曲面越陡, 因素的影响越显著; 等高线图为椭圆形且曲率越大代表两者交互作用强[18]。由图可知等高线沿 *A* 轴变化比 *B* 轴、*C* 轴都更加密集, 表明发酵温度比发酵时间和发酵湿度对响应值的影响均要大; 评分随发酵温度、发酵湿度、发酵时间的升高变化幅度不同, 但均呈现先增大后降低的变化趋势。发酵时间和发酵湿度交互作用等高线呈椭圆形, 表明发酵时间和发酵湿度的交互作用对连翘叶红茶品质的影响最大, 与方差分析中的结果一致。发酵温度与发酵时间的交互作用对连翘叶红茶品质的影响次之, 发酵温度与发酵湿度的等高线趋于圆形, 表明二者对连翘叶红茶品质的影响最小。发酵湿度对多酚氧化酶结构与反应环境具有重要作用, 同时发酵时长把控酶促反应进程, 二者对多酚氧化酶的活性调控具有协同作用, 影响着叶片中黄酮、酚酸及木脂素类物质的酶促转化与适度氧化, 进而影响风味物质的形成[19]。

根据响应面试验分析得到最优的连翘叶红茶发酵的工艺条件为发酵温度 31.8 ℃、发酵时间 3.82 h、发酵湿度 90.93%, 软件预测该条件下评分为 3.77。结合实际条件及

表 4　回归模型方差分析表

Table 4　Analysis table of variance of regression model

方差分析	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著情况
模型	0.7184	9	0.0798	15.6000	0.0008	**
A	0.2245	1	0.2245	43.8600	0.0003	**
B	0.0091	1	0.0091	1.7800	0.2239	
C	0.0300	1	0.0300	5.8600	0.0460	*
AB	0.0090	1	0.0090	1.7600	0.2259	
AC	0.0006	1	0.0006	0.1221	0.7370	
BC	0.0900	1	0.0900	17.5900	0.0041	**
A^2	0.0947	1	0.0947	18.5100	0.0036	**
B^2	0.0979	1	0.0979	19.1300	0.0033	**
C^2	0.1253	1	0.1253	24.4800	0.0017	**
残差	0.0358	7	0.0051			
失拟项	0.0060	3	0.0020	0.2696	0.8450	
纯误差	0.0298	4	0.0075			
总和	0.7542	16				

注: *表示具有显著差异(*P*<0.05); **表示具有极显著差异(*P*<0.01)。

实际操作的可行性将最优工艺调整为发酵温度 32 ℃、发酵时间 3.8 h、发酵湿度 91%，在上述调整后的工艺条件下进行 3 次平行试验，所得连翘叶红茶感官评价综合得分平均值为 3.75，与预测值基本接近，说明得到的回归模型与实际情况拟合较好，此工艺条件较为稳定可靠。所得连翘叶红茶颜色红亮，香气清高，滋味浓醇，感官评分较高。与市售常规制法所得连翘叶红茶进行对比，最优工艺下制得连翘叶红茶感官评价综合得分远高于市售常规制法的 3.05，表明经过工艺优化后的连翘叶红茶风味品质确实得到了较大的改善和提升。

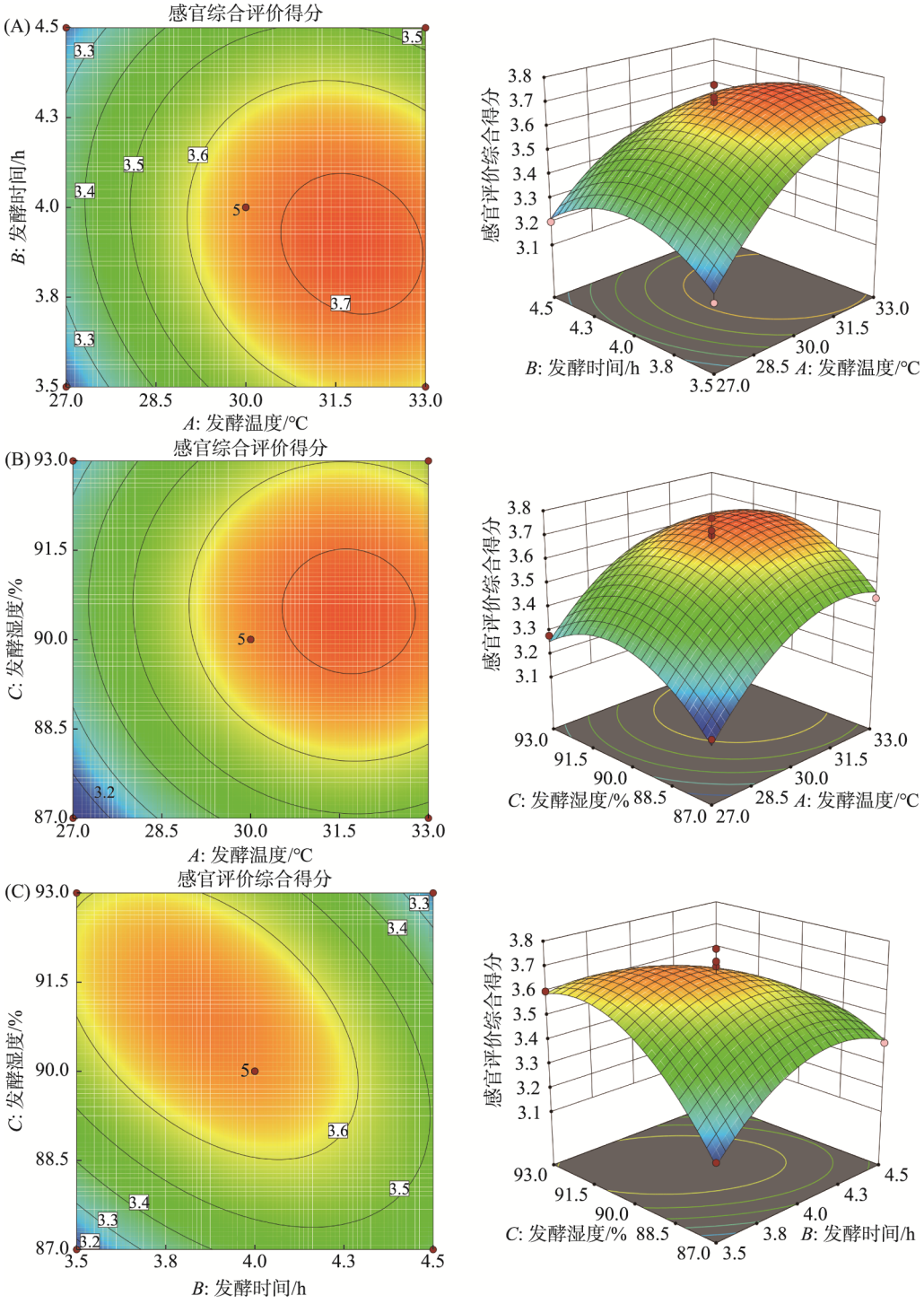


图 2 两因素交互作用对连翘叶红茶的影响

Fig.2 Effects of interaction between 2 factors on the flavor of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves

2.3　连翘叶红茶的香气分析结果

对响应面试验所得最优条件下制得的连翘叶红茶挥发性成分进行 HS-SPME-GC-MS 分析, 所得总离子流色谱图见图 3。由图可知, 连翘叶红茶挥发性成分中具有多种物质且得到了较好的分离, 为后续的化合物鉴定提供了基础。

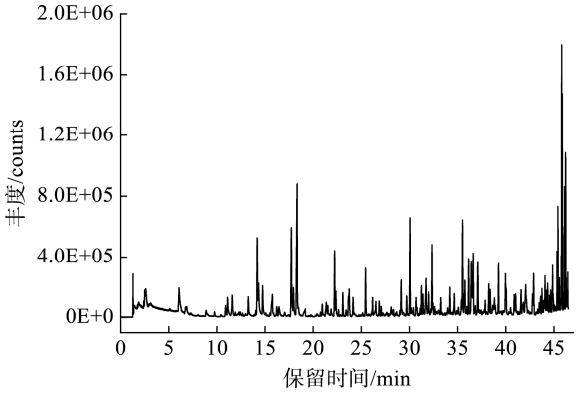


图 3　连翘叶红茶 HS-SPME-GC-MS 分析总离子流色谱图
Fig.3　Total ion chromatogram of black tea made by *Forsythia suspensa* leaves by HS-SPME-GC-MS analysis

经过 HS-SPME-GC-MS 分析, 通过 NIST 20 谱库检索, 查阅相关文献并与其核对保留指数, 从连翘叶红茶中共鉴定出 56 种化合物。这 56 种化合物包括醛类 22 种、醇类 14 种、酮类 8 种、烯类 5 种、酚类 3 种、其他类 2 种、酸类 1 种和酯类 1 种, 可知醛类、醇类、酮类和烯类是构成连翘叶红茶挥发性物质的主要组分。由图 4 可知醛类、醇类、酚类和酮类的含量占比较高, 分别为 31.36%、41.92%、12.44%和 6.15%。醛类物质中糠醛、异香草醛、苯乙醛、壬醛、反,反-2,4-庚二烯醛含量较高, 含量分别为 0.20、0.19、0.15、0.09、0.09 μg/g。叶片中的氨基酸与戊糖之间通过美拉德反应可生成糠醛[20]。苯丙氨酸经过脱氨基和脱羧基作用形成苯乙醛[21]。醇类物质中苯乙醇、芳樟醇、*α*-松油醇、香叶醇、苯甲醇含量较高, 含量分别为 0.67、0.53、0.25、0.20、0.08 μg/g。与普通红茶类似, 香叶醇、芳樟醇、*α*-松油醇的产生依赖于通过类异戊二烯生物合成途径在连翘叶片中形成的前体物质, 这些前体物质与叶片中的糖类物质结合形成糖苷, 在揉捻过程中, 细胞破碎, 糖苷酶与底物接触, 经糖苷酶水解释放香气物质, 后续发酵过程中, 糖苷酶维持较高活性, 持续水解剩余结合态的糖苷, 产生更多香气物质[22–23]。在一定条件下, 香叶醇可以转化为芳樟醇和 *α*-松油醇。在连翘叶红茶中苯乙醇也是由糖苷类前体物质水解产生, 不同在于其糖苷来源是叶片中先经苯丙烷通路合成的苯乙醇苷元[24]。酮类物质中 1-(1H-吡咯-2-基)乙酮、*β*-大马酮含量较高, 分别为 0.14 μg/g、0.09 μg/g。*β*-大马酮由叶片中重要的香气前体物质类胡萝卜素在酶、光热等条件下发生降解反应形成[25]。

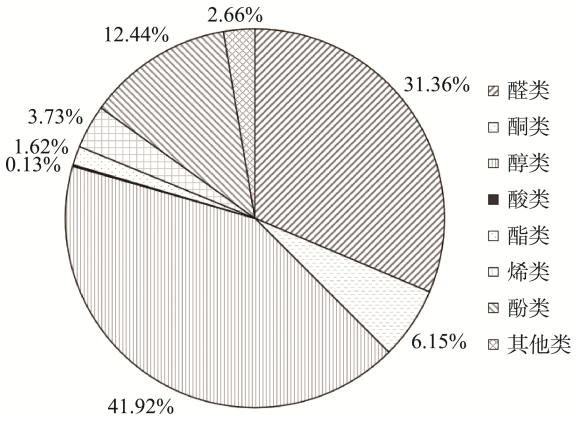


图 4　各类化合物含量占比图
Fig.4　Content proportion of different compound classes

OAV 是样品中挥发性物质浓度与该物质香气阈值的比值, 是风味评价中常用的评价指标, 能在定量检测香气成分含量的基础上进一步评价各香气成分对整体香气特征的贡献。只有当 OAV≥1 时, 挥发性成分才能被觉察。一般认为OAV≥1的化合物对整体香气有贡献。查阅香气阈值[26], 计算 OAV, 基于 OAV≥1 从连翘叶红茶的挥发性组分中共筛选出 18 种香气活性物质见表 5。这些物质的香气主要包含花香、甜香、青香、木香等香气特征。芳樟醇具有花香、木香香气, 是茶叶中的重要香气物质, 苯乙醇具有典型的玫瑰香气和蜜香, 香叶醇具有玫瑰香气、青甜香气, 也是在红茶中常检测到的关键香气物质[27–31]。3-甲基丁醛具有麦芽青香、2-甲基丁醛具有水果香气, 壬醛具有青香、柑橘香, *α*-松油醇和丁香酚具有辛香, 反,反-2,4-癸二烯醛具有清香。其中, 丁香酚在连翘叶红茶加工过程中, 以松柏醇糖苷为前体, 依托连翘叶中含有的完整苯丙烷途径酶系, 经酶解、氧化、热解等系列反应协同, 实现前体物质的逐步转化[32]。藏红花醛在连翘叶红茶中的形成源于类胡萝卜素裂解途径, 前体为苦藏花素, 在红茶加工中经糖苷水解、脱水、热降解逐步形成[33]。丁香酚和藏红花醛所具有的独特香气, 也形成了连翘叶红茶较普通红茶所特有的辛香、药香香气。OAV 较大的化合物(OAV≥40)为 3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、苯乙醛、芳樟醇、壬醛、苯乙醇、*α*-松油醇、香叶醇、反,反-2,4-癸二烯醛、丁香酚, 这些化合物是构成连翘叶红茶香气的关键香气活性物质, 其中, 苯乙醇、香叶醇、3-甲基丁醛、反,反-2,4-癸二烯醛、芳樟醇的 OAV 分别为 210、202、194、161、100, 均大于等于 100, 对连翘叶红茶的整体香气具有重要贡献。

表 5 连翘叶红茶中的香气活性物质

Table 5 Aroma-active compounds in black tea made from *Forsythia suspensa* leaves

序号	化合物	分类	香气成分含量/(μg/g)	香气描述	香气阈值/(mg/kg)	OAV
1	3-甲基丁醛	醛	0.040±0.002	麦芽香、青香	0.0002	194
2	2-甲基丁醛	醛	0.060±0.003	青香、苹果香气	0.0015	40
3	柠檬烯	烯	0.020±0.010	柠檬香	0.0100	2
4	苯乙醛	醛	0.150±0.010	玫瑰花香、青香	0.0040	37
5	芳樟醇	醇	0.530±0.080	花香、果香、木香	0.0053	100
6	壬醛	醛	0.090±0.010	青香、柑橘香	0.0011	83
7	苯乙醇	醇	0.670±0.020	玫瑰花香、蜜香	0.0032	210
8	α-松油醇	醇	0.250±0.010	辛香	0.0046	54
9	水杨酸甲酯	酯	0.070±0.010	薄荷香、清香、冬青气息	0.0349	2
10	藏红花醛	醛	0.020±0.002	辛香、药香	0.0020	11
11	α,4-二甲基-3-环己烯-1-乙醛	醛	0.030±0.003	青香、草香	0.0030	8
12	4-乙烯基苯酚	酚	0.130±0.002	药香、烟熏香气	0.0100	13
13	香叶醇	醇	0.200±0.004	玫瑰花香、青甜香气	0.0010	202
14	反-2-癸烯醛	醛	0.004±0.000	油脂香	0.0003	15
15	吲哚	其他	0.030±0.001	花香	0.0110	3
16	反, 反-2,4-癸二烯醛	醛	0.010±0.000	清香	0.0001	161
17	1,1,6-三甲基-1,2-二氢萘	其他	0.090±0.010	干草香、药香	0.0025	35
18	丁香酚	酚	0.440±0.070	辛香	0.0060	73

注: 内标邻二氯苯的保留时间为 14.19 min, 峰面积为 1954896.19。

3 结 论

通过单因素试验考察了发酵温度、发酵时间及发酵湿度对连翘叶红茶风味品质的影响, 并通过设计 Box-Behnken 响应面试验对连翘叶红茶发酵工艺进一步优化, 确定了连翘叶红茶的最优发酵工艺条件为发酵温度 32 ℃、发酵时间 3.8 h、发酵湿度 91%, 所得连翘叶红茶在颜色、香气和滋味等方面品质均得到很大提升。采用 HS-SPME-GC-MS 对最优条件下制得的连翘叶红茶挥发性成分进行分析, 共鉴定出 56 种化合物, 发现连翘叶红茶的主要香气物质为醛类、醇类、酮类、烯类物质。OAV 分析表明对香气贡献较大的化合物为 3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、苯乙醛、芳樟醇、壬醛、苯乙醇、α-松油醇、香叶醇、丁香酚等。花香构成了连翘叶红茶的主体香气, 同时还具有青香、辛香、果香香韵, 表明制备所得连翘叶红茶的香气类型丰富多元, 香型饱满协调, 层次鲜明。本研究为连翘叶红茶产品的风味提升提供了一定的数据和理论支持, 将有力促进连翘叶茶产业的发展和资源的高值化利用。

参考文献

[1] 潘雅琼. 连翘叶茶的功效及制作工艺研究进展[J]. 现代食品, 2022(8): 44–46.
Pan Yaqiong. Research progress of efficacy and processing technology of *Forsythia suspensa* leaf tea [J]. Modern Food, 2022(8): 44–46.

[2] 杨安辉, 刘宇灵, 林龙飞, 等. 清热解毒类中药抗新型冠状病毒肺炎研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2021, 39(1): 181–186.
Yang Anhui, Liu Yuling, Lin Longfei, et al. Research progress of heat-clearing and detoxifying traditional Chinese medicine in treatment of corona virus disease 2019 [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2021, 39(1): 181–186.

[3] 王进明, 范圣此, 李安平, 等. 连翘不同部位中连翘苷和连翘酯苷A的含量分析及其入药探讨[J]. 中国现代中药, 2013, 15(7): 556–559.
Wang Jinming, Fan Shengci, Li Anping, et al. Analysis of the contents of forsythin and forsythiaside a in different parts of *Forsythia suspensa* and its medicinal use discussion [J]. Modern Chinese Medicine, 2013, 15(7): 556–559.

[4] 原江锋, 胡金婉, 王大红, 等. 不同产地连翘叶花中主要活性成分的含量分析[J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(3): 389–397.
Yuan Jiangfeng, Hu Jinwan, Wang Dahong, et al. Analysis of main active components in leaves and flowers of *Forsythia suspensa* from different regions [J]. Natural Product Research and Development, 2020, 32(3): 389–397.

[5] 李敬, 尤颖, 赵庆生, 等. 连翘叶成分及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 344–352.
Li Jing, You Ying, Zhao Qingsheng, et al. Research progress on composition and biological activity of *Forsythia suspensa* leaves [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 344–352.

[6] Zuo Xuli, Pan Xiuzhen, Wang Yu, et al. Prediction of potential active ingredients and mechanism of *Forsythia suspense* leaf green tea extract in

treating COPD mice based on UPLC-MS and network pharmacology [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(8): 4191–4208.

[7] 李曦, 赵珊, 仲伶俐, 等. 连翘绿茶和连翘红茶的特征成分测定及营养成分比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(6): 312–317, 326.
Li Xi, Zhao Shan, Zhong Lingli, et al. Determination of characteristic components in green and black tea made by *Forsythia suspensa* leaves and their nutritional comparison [J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(6): 312–317, 326.

[8] 李敬, 尤颖, 赵庆生, 等. 连翘叶速溶茶制备及多种功能成分分析[J]. 林业科学, 2023, 59(8): 52–59.
Li Jing, You Ying, Zhao Qingsheng, et al. Preparation of instant tea from *Forsythia suspensa* leaves and analysis of its various functional components [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(8): 52–59.

[9] 周菲. 连翘叶减肥保健品开发可行性研究[D]. 太原: 山西大学, 2018: 6.
Zhou Fei. Feasibility study of anti-obesity products about *Forsythia suspensa* leaves [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018: 6.

[10] 汪青波, 张济世, 闫珍, 等. 利用发酵法提高连翘叶中连翘脂素含量的方法研究[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(1): 143–149.
Wang Qingbo, Zhang Jishi, Yan Zhen, et al. Research on fermentation technology for the conversion from phillyrin to phillygenin in *Forsythia* Suspense leaves [J]. Chemical Research and Application, 2020, 32(1): 143–149.

[11] 杨文娟, 李莎莎, 李楠, 等. 连翘叶黄芪发酵茶制备工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 陕西科技大学学报, 2025, 43(5): 89–96.
Yang Wenjuan, Li Shasha, Li Nan, et al. Study on optimization of preparation technology of *Forsythia suspense* leaves and *Astragalus membranaceus* fermented tea and its antioxidant activity [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2025, 43(5): 89–96.

[12] Li Lijuan, Zhao Yating, Zhang Shu, et al. Comparison of *Forsythia suspensa* leaf fermented tea in the four different regions of Shanxi province: quality, functional ingredients, and bioactivity [J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 8: 1482782.

[13] 侯思同, 李东煌, 黄衍庭, 等. 江西狗牯脑红茶加工过程中关键酶活性动态变化分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(12): 2–10.
Hou Sitong, Li Donghuang, Huang Yanting, et al. Dynamic changes of main enzyme activities during processing of Jiangxi Gougunao black tea [J]. Food and Machinery, 2025, 41(12): 2–10.

[14] Hu Jiali, Feng Xinyu, Song Haizhao, et al. Enzymatic reactions throughout cultivation, processing, storage and post-processing: progressive sculpture of tea quality [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 104294.

[15] Chen Lin, Wang Huajie, Ye Yang, et al. Structural insight into polyphenol oxidation during black tea fermentation [J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100615.

[16] 倪帆呈, 张鼎丁, 李金贵, 等. 代用红茶加工工艺研究进展[J]. 现代食品, 2022(18): 39–44.
Ni Fancheng, Zhang Dingding, Li Jingui, et al. Research progress on processing technology of substitute black tea [J]. Modern Food, 2022(18): 39–44.

[17] 杨云飞, 王玉婉, 林家正, 等. 发酵中氧对红茶品质的影响及富氧发酵工艺优化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 199–207.
Yang Yunfei, Wang Yuwan, Lin Jiazheng, et al. Effect of oxygen concentration in fermentation on black tea qualityand optimization of oxygen-enriched fermentation process [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 199–207.

[18] 范春雅, 樊雪琼, 郭教玲, 等. 响应面法优化山地五月茶黄酮提取工艺[J]. 热带农业科学, 2021, 41(1): 117–122.
Fan Chunya, Fan Xueqiong, Guo Jiaoling, et al. Optimization of extraction of flavonoids from *Antidesma montanum* by response surface methodology [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(1): 117–122.

[19] 丰金玉, 刘昆言, 秦昱, 等. 红茶加工中多酚氧化酶、过氧化物酶和 *β*-葡萄糖苷酶活性变化[J]. 农学学报, 2014, 4(11): 96–99, 113.
Feng Jinyu, Liu Kunyan, Qin Yu, et al. Activity changes of polyphenol oxidase, peroxidase and *β*-glycosidase in black tea processing [J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(11): 96–99, 113.

[20] Gao Xing, Duan Yue, Song Huanlu, et al. Unraveling the mechanism of aroma formation in the Maillard reaction of roasted Wuyi rock tea: focus on furfural, tea pyrrole, and 1-ethyl-1H-Pyrrole [J]. Food Bioscience, 2025, 71: 107137.

[21] Ma Lijuan, Gao Manman, Zhang Linqi, et al. Characterization of the key aroma-active compounds in high-grade Dianhong tea using GC-MS and GC-O combined with sensory-directed flavor analysis [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132058.

[22] 王秋霜, 秦丹丹, 方开星, 等. 基于非靶向代谢组学分析国内不同产地红茶香气代谢物[J]. 食品科学, 2025, 46(13): 232–242.
Wang Qiushuang, Qin Dandan, Fang Kaixing, et al. Non-targeted metabolomic analysis of aroma metabolites of black teas from different production regions in China [J]. Food Science, 2025, 46(13): 232–242.

[23] 方仕茂, 俞李沙, 朱旭君, 等. 茶叶中芳樟醇代谢及其调控机制研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2025, 48(3): 505–514.
Fang Shimao, Yu Lisha, Zhu Xujun, et al. Research advance of the metabolism and regulatory mechanisms of linalool in tea leaves [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(3): 505–514.

[24] 黄颖怡. 六堡茶储存过程中物质转化机制研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2024: 3-4.
Huang Yingyi. Research on the mechanism of substance transformation during the storage process of Liupao tea [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2024: 3-4.

[25] 施江, 王佳童, 彭群华, 等. 茶树鲜叶采前诱导和采后加工对类胡萝卜素及其衍生香气的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(4): 365–376.
Shi Jiang, Wang Jiatong, Peng Qunhua, et al. Effects of pre-harvest induction and post-harvest processing of tea leaves on carotenoids and their derived aromas [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 365–376.

[26] Van Gemert L J. Odour thresholds: compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. Utrecht, The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011: 207–359.

[27] Wei Fang, Luo Liyong, Sun Fanwei, et al. Flavor characteristic and characterization of key sweet aroma compounds in *Camellia* nanchuanica black tea [J]. Food Research International, 2025, 209: 116179.

[28] 徐梦婷, 邵淑贤, 陈静, 等. 不同茶树品种工夫红茶挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 281–290.
Xu Mengting, Shao Shuxian, Chen Jing, et al. Analysis of volatile and key aroma components in congou black tea varieties [J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(1): 281–290.

[29] Zhou Di, Liu Xinyu, Xie Miaoqin, et al. Characterization of aroma profiles of Tanyang Congou black tea with flowery-fruity flavor: insights from sensory evaluation and HS-SPME-GC-O-MS [J]. Food Chemistry: X, 2025, 28: 102595.

[30] 魏昊, 蓝天梦, 缪伊雯, 等. 基于感官组学分析不同足火方式对金牡丹工夫红茶香气的影响[J]. 茶叶科学, 2023, 43(1): 109–123.
Wei Hao, Lan Tianmeng, Miao Yiwen, et al. Analysis of the effect of different full firing methods on the aroma of jinmudan congou black tea based on sensomics characterization [J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(1): 109–123.

[31] Yang Qianfeng, Wei Yongning, Zuo Yifan, et al. Sensoromic-based decoding of key aroma and exploration of perceptual interactions of binary aroma in sweet floral flavored black tea [J]. Food Chemistry, 2026, 504: 147905.

[32] 张佳琪, 刘晓冉, 陈佳茜, 等. 参与连翘苯丙烷合成途径的 WRKY 转录因子的筛选与鉴定[J]. 中草药, 2023, 54(18): 6055–6064.
Zhang Jiaqi, Liu Xiaoran, Chen Jiaqian, et al. Screening and identification of transcription factors WRKY involved in phenylpropane synthesis pathway in *Forsythia suspensa* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(18): 6055–6064.

[33] 施靖, 郝子慧, 张一昕, 等. 藏花醛药理活性及作用机制的研究进展[J]. 中医药学报, 2021, 49(6): 112–118.
Shi Jing, Hao Zihui, Zhang Yixin, et al. Research progress in pharmacological action and mechanism of safranal [J]. Acta Chinese Medicine and Pharmacology, 2021, 49(6): 112–118.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)