

肖腾香, 冯花, 罗玉琴, 等. 柚香白茶关键风味物质及品质分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 47-55. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120026

XIAO Tengxiang, FENG Hua, LUO Yuqin, et al. Analysis of Key Flavor Substances and Quality of Pomelo White Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 47-55. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120026

·特邀主编专栏——咖啡、可可、茶等特色饮料作物加工（客座主编：董文江、许勇泉、付才力）·

# 柚香白茶关键风味物质及品质分析

肖腾香<sup>1,2</sup>, 冯花<sup>3</sup>, 罗玉琴<sup>2</sup>, 范春梅<sup>2</sup>, 李杨<sup>2</sup>, 胡汉亮<sup>2</sup>, 苏二正<sup>1</sup>, 曹福亮<sup>1,\*</sup>

(1.南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037;

2.漳州科技职业学院茶与食品学院, 福建漳州 363202;

3.武夷学院茶与食品学院, 福建武夷山 354300)

**摘要:**以同种茶坯、不同窈制处理获得的柚香白茶为实验原料, 采用气相色谱-质谱联用仪 (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 结合化学计量法分析柚香白茶的最佳、中间、最差样品 (W2-1、W2-2、W2-3)、茶坯 (W2CK) 及柚花 (GF) 三者之间在感官品质、主要呈味物质以及挥发性物质三方面的差异, 旨在探究柚香白茶的关键风味物质。感官结果表明: 柚花白茶 W2-1 柚花香显、鲜浓、滋味醇爽有花味, 对应工艺为窈制时间 14 h、配花量 80%、干燥温度 70 °C; 主要呈味物质分析表明: 柚香白茶及茶坯的茶多酚、咖啡碱、茶氨酸含量差异显著 ( $P<0.05$ ), 水浸出物差异较小; 挥发物结果分析表明: 从样品中共检测出 233 种挥发性化合物, 以萜类、酯类、杂环化合物为主, 其中相对含量超过 1% 的物质有 64 种, 其中芳樟醇和脱氢芳樟醇的相对含量均超过 100  $\mu\text{g/g}$ , 是柚香白茶的主要作用物质。香气活度值分析表明: 苯甲酸甲酯、四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、 $\beta$ -紫罗兰酮、芳樟醇、2,2,6-三甲基-环己酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、脱氢芳樟醇等物质是柚花茶的呈香物质, 该部分物质 OAV 值均 $>1000$ , 主要呈现花果香。感官审评结果、呈味物质及挥发性物质的检测结果基本一致。本研究有助于了解柚香白茶的香气和滋味品质化学, 为提高柚香白茶品质提供理论依据。

**关键词:**柚香白茶, 感官分析, 呈味物质, 挥发性物质, 香气活度值

中图分类号: TS272.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)18-0047-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120026



本文网刊:

## Analysis of Key Flavor Substances and Quality of Pomelo White Tea

XIAO Tengxiang<sup>1,2</sup>, FENG Hua<sup>3</sup>, LUO Yuqin<sup>2</sup>, FAN Chunmei<sup>2</sup>, LI Yang<sup>2</sup>, HU Hanliang<sup>2</sup>,  
SU Erzheng<sup>1</sup>, CAO Fuliang<sup>1,\*</sup>

(1. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University,  
Nanjing 210037, China;

2. Zhangzhou University of Science and Technology, Zhangzhou 363202, China;

3. College of Tea and Food Science, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

**Abstract:** The pomelo white tea obtained by the same tea billet and different scenting treatments was used as the experimental raw material, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) combined with stoichiometry was used to analyze the differences in sensory quality, main flavor substances and volatile substances among the best, middle and worst samples (W2-1, W2-2, W2-3), tea blank (W2CK) and grapefruit (GF) of pomelo white tea, the aim was to explore the key flavor substances of pomelo white tea. The sensory results showed that the pomelo flower white tea W2-1 had obvious fragrance, fresh and thick, mellow taste and flower flavor. The corresponding process was scenting time of 14 h, flower amount of 80%, drying temperature of 70 °C. The analysis of main flavor substances showed that the contents of tea polyphenols, caffeine and theanine in pomelo white tea and tea blank were significantly different ( $P<0.05$ ), and the difference of water extract was small. The analysis of volatiles showed that a total of 233 volatile compounds were detected from the samples, mainly including terpenoids, esters and heterocyclic compounds. Among them, 64 substances had a

收稿日期: 2024-12-04

作者简介: 肖腾香 (1992-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 茶叶加工与审评, E-mail: 1547706021@qq.com.

\* 通信作者: 曹福亮 (1957-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 森林生态及森林培育, E-mail: fuliangcaonjfu@163.com.

relative content of more than 1%. The relative contents of linalool and dehydrolinalool were more than 100  $\mu\text{g/g}$ , which were the main active substances of pomelo white tea. The analysis of aroma activity value showed that methyl benzoate, tetrahydro-4-methyl-2-(2-methyl-1-propenyl)-2H-pyran,  $\beta$ -ionone, linalool, 2,2,6-trimethyl-cyclohexanone, (E,E)-3,5-octadiene-2-one, dehydrolinalool and other substances were the aroma substances of grapefruit tea. The OAV values of these substances were more than 1000, which were mainly floral and fruity. The results of sensory evaluation, flavor substances and volatile substances were basically the same. This study is helpful to understand the aroma and taste quality chemistry of pomelo-flavored white tea, and provides a theoretical basis for improving the quality of pomelo-flavored white tea.

**Key words:** pomelo white tea; sensory analysis; flavor substances; volatile substances; aroma activity value

柚子(*Citrus maxima*)为芸香科柑橘属乔木,原产于亚洲,属亚热带常绿乔木。平和琯溪蜜柚是福建省著名的地方传统名果,至今已有500多年的栽培历史。目前,平和县已成为全国最大的柚类生产基地县和出口基地<sup>[1]</sup>。柚子花有清热解毒、美容养颜、解酒提神等功效<sup>[2]</sup>。柚子开花时花量大,约98%的花量自然脱落,造成资源浪费。近几年,柚子花得到当地政府的重视,利用率显著提高,除了制作柚子花精油,柚子花茶也逐步受到市场的青睐。柚子花丰富的芳香物质与茶叶的吸附性相结合,窈制成柚子花茶,具有良好的试制性且能提高农副产品附加值<sup>[3]</sup>。

白茶按照采摘原料老嫩程度不同分为白毫银针、白牡丹、贡眉和寿眉,白牡丹的独特风味深受消费者喜爱。白牡丹形状优美,形如牡丹,采用一芽一叶或者一芽二叶制成,叶张灰绿或暗绿,叶背白毫银亮,毫心肥壮,叶张肥嫩、波纹隆起,叶缘微向叶背垂卷,芽叶连枝,叶片抱心呈花朵形;有毫香,滋味鲜醇,汤色杏黄明亮,叶脉微红<sup>[4]</sup>。白牡丹气质清纯,滋味淡雅且价格适中,与柚子花鲜花窈制能增加自然花香,增添茶叶风味,改善茶叶品质。

相关研究表明柚子花茶香气中富含芳樟醇(百合花或白兰花香)、橙花叔醇(玫瑰和苹果香)、邻氨基苯甲酸甲酯(甜橙花香)等组分,其构成了柚子花茶馥郁甜醇、清鲜持久的香气特征<sup>[5]</sup>。目前,柚子花茶的相关研究有柚花绿茶和柚花红茶<sup>[6]</sup>、柚花单丛<sup>[7]</sup>、柚花铁观音<sup>[8]</sup>等茶的工艺及品质探究,柚花白茶未见相关研究。福建盛产白茶和柚子花,两者相结合可丰富茶产品类型,具有一定市场前景。综合柚子花利用现状及白茶品质特点,选用白牡丹作为本次试验材料,通过正交试验处理得到柚香白茶,对其最佳、中间、最差样品(W2-1、W2-2、W2-3)进行结合感官审评、理化检测及香气分析探索柚香白茶关键风味物质,为优化柚子花利用率,开发新产品,助力乡村建设做贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

茶坯 2022年福鼎二级白牡丹,福鼎市黄岗荒野茶叶专业合作社;柚花鲜花 2023年购于漳州平和县平和茗天农业开发有限公司;氯化钠(分析纯) 国药集团化学试剂有限公司;正己烷(色谱纯) 德国 Merck 公司;没食子酸酯(gallate, GA)、茶氨酸

(Theanine)、咖啡碱(caffeine, CAF) 标准品,美国 Sigma 公司。

1260型高效液相色谱仪器、8890-7000D-GC-MS/MS、DB-5MS(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ )色谱柱、120  $\mu\text{m}$  DVB/CWR/PDMS 萃取头 安捷伦科技(中国)有限公司;UV-1800PC-DS2 紫外分光光度 上海美普达仪器有限公司;WGL-125B 电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司;DK-98-II A 电热恒温水浴锅 上海恒科技术有限公司;MM400 球磨仪 弗尔德(上海)仪器设备有限公司;SPME Arrow 固相微萃取装置 瑞士思特斯分析仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

经过正交试验探究窈制时间、配花量、干燥温度对柚香白茶的品质影响<sup>[8]</sup>,筛选出不同品质样品各一份进行理化检测,待测样品置于冰箱冷藏。检测样品信息和工艺参数见表1,每个试验重复3次。

表1 样品信息和工艺参数  
Table 1 Sample information and process parameters

样品名称	样品编号	窈制时间(h)	配花量(%)	干燥温度( $^{\circ}\text{C}$ )
柚香白茶	W2-1	14	80	70
	W2-2	16	80	90
	W2-3	14	40	90
茶坯	W2CK	二级白牡丹		

1.2.1 柚花茶制作方法 柚花茶制作方法参考文献[9]进行,白牡丹的采摘原料为一芽二叶,经自然萎凋——干燥而成,将新鲜柚花与茶坯经过二窈一提的窈制工艺加工成柚香白茶。具体窈制流程如下:

a. 鲜花处理: 鲜花采摘后,挑拣花里的杂物时,尽量避免鲜花的机械损伤,接着马上薄摊于通风阴凉处散热,厚度不超过10 cm,减少堆积发热而导致变色变质。

b. 窈花拌和: 将处理好的茶坯均匀铺平,厚度25~30 cm,然后把柚子花均匀散摊在茶坯上,再充分拌和后进行窈窈,堆高30~50 cm,静置窈花。再用少量茶坯覆盖其面,以充分提高花香利用率。

c. 通花续窈: 当茶坯吸香3~5 h后,堆温上升到40  $^{\circ}\text{C}$ 时,应及时进行通花,即翻堆散热至常温,再续窈。对于多次窈花的,一窈起花后,不复火,直接开始下一窈花处理。

d. 复火: 湿茶坯须及时进行复火。复火掌握“低

温、短时”的原则,温度 70 ℃ 左右,烘干时间 30~45 min。复火后茶坯含水量控制在 6%~7%。

e.提花:复火后的柚茶干香较低,可通过提花来增进鲜灵度,按照茶量 5% 柚子花鲜花再次拌和鲜花与茶叶,窨制 3 h 左右,筛出花渣。提花过程不进行通花。

f.筛花:将花渣筛去,即为柚香白茶产品。

1.2.2 感官分析 将窨制成的柚香白茶及茶坯进行感官审评,由 5 名男性和 5 名女性均具有三级评茶证书,受过专业评茶训练的人员组成审评小组,按照 GB/T 23776-2018 花茶感官审评的方法,对柚花香白牡丹外形(20%)、汤色(5%)、香气(35%)、滋味(30%)和叶底(10%)五项因子进行品质鉴定,其中香气和滋味是品质鉴定的关键点,具体评价标准如表 2 所示。

表 2 感官品质评定标准  
Table 2 Sensory quality evaluation standard

感官品质	标准	感官评分(分)
外形	芽叶连枝、芽头肥壮显芽毫、灰绿润、匀整、净	15~20
	芽叶连枝、显芽毫、灰绿较润、较匀齐、净	10~14
	芽叶连枝、有芽毫、灰绿、匀整、尚净	1~9
汤色	杏黄清澈、明亮	4~5
	黄、明亮	3
	深黄	1~2
香气	鲜灵浓郁持久、柚花明显	30~35
	鲜灵清高持久、柚花明显	20~29
	柚花香、尚清高	1~19
滋味	醇爽回甘、柚花香显	25~30
	醇厚、有柚花香	17~24
	尚醇厚、带有柚花香	1~16
叶底	肥厚、软亮匀齐	6~10
	尚软亮匀齐	3~5
	尚软亮欠匀齐	1~2

1.2.3 理化分析 通过感官审评筛选出综合得分最高分、中间分、最低分的茶样进行理化检测分析。用差数法测定水浸出物,参照国家标准 GB/T 8305-2013《茶水浸出物测定》;用分光光度法测定茶多酚,参照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》;采用高效液相色谱法测定茶氨酸,参照 GB/T 23193-2017《茶叶中茶氨酸的测定 高效液相色谱法》;采用紫外分光光度法测定咖啡碱,参照 GB/T 8312-2013《茶 咖啡碱测定》。每个样品重复 3 次。

#### 1.2.4 香气成分分析

1.2.4.1 香气成分的萃取与 GC-MS 分析 从-80 ℃ 冰箱中取出柚香白茶、茶坯及冻干柚花进行液氮研磨,涡旋混合均匀,每个样本称取约 500 mg(液体 1 mL)于顶空瓶中;分别加入饱和 NaCl 溶液,20 μL 10 μg/mL 苯酚-D1 内标溶液;采样前萃取头在 Fiber Conditioning Station 中 250 ℃ 下老化 5 min。在 60 ℃

恒温条件下,振荡 5 min,120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶,顶空萃取 15 min,于 250 ℃ 下解析 5 min,然后进行 GC-MS 分离鉴定。

GC 条件:DB-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为高纯氦气(纯度不小于 99.999%),恒流流速 1.2 mL/min,进样口温度 250 ℃,不分流进样,溶剂延迟 3.5 min。程序升温:40 ℃ 保持 3.5 min,以 10 ℃/min 升至 100 ℃,再以 7 ℃/min 升至 180 ℃,最后以 25 ℃/min 升至 280 ℃,保持 5 min。

质谱条件:电子轰击离子源(EI),离子源温度 230 ℃,四级杆温度 150 ℃,质谱接口温度 280 ℃,电子能量 70 eV,扫描方式为选择离子检测模式(SIM),定性定量离子精准扫描,质量扫描范围:m/z 50~500 u。

1.2.4.2 香气成分的定性定量 定性:搜索 NIST14.L 数据库,使用保留时间、匹配度(≥80%)、保留指数进行香气成分的定性,结合文献 [10] 进行辅助定性。计算各挥发物的保留指数(Retention Index, RI),以正构烷烃混合物(C<sub>5</sub>~C<sub>26</sub>)为标准,在相同色谱条件下进行气相色谱-质谱联用分析并根据下式进行化合物的计算,与文献 [11]RI 值进行比对。RI 筛选标准为 RI<sub>i</sub>±20,RI<sub>i</sub> 为文献参考值。

$$RI = 100 \times \left( n + \frac{t'_r(X) - t'_r(C_n)}{t'_r(C_{n+1}) - t'_r(C_n)} \right)$$

式中:t'<sub>r</sub>(X)为待测化合物 X 的调整保留时间;t'<sub>r</sub>(C<sub>n</sub>)为碳原子数为 n 的正构烷烃调整保留时间;t'<sub>r</sub>(C<sub>n+1</sub>)为碳原子数为 n+1 的正构烷烃调整保留时间;n 为碳原子数。

定量:采用内标法按照下式对鉴定的香气成分进行相对定量。

$$A_i = \frac{0.5 \times M_i}{M_{is} \times m}$$

式中:A<sub>i</sub>为鉴定后任一香气成分的含量,μg/g;M<sub>i</sub>为任一香气成分的峰面积;M<sub>is</sub>为内标的峰面积;m 为测定茶叶样品的质量,g;0.5 为加入 10 μL 内标溶液(质量浓度为 50 μg/mL)后内标的质量,μg。

香气活性值(Odor activity value, OAV)为风味化合物的浓度与自身气味阈值的比值,通常用 OAV 表示呈香物质对整体风味的贡献值<sup>[12]</sup>。

$$OAV_i = \frac{C_i}{T_i}$$

式中:OAV<sub>i</sub>为化合物 i 的气味活度值;C<sub>i</sub>为化合物的含量(μg/g 或 μg/mL);T<sub>i</sub>为化合物的阈值(μg/g 或 μg/mL)。

### 1.3 数据处理

采用 Office Excel 2010 软件对香气数据进行整理、统计,采用 SPSS 20.0 软件对理化成分及感官审评结果进行方差分析。采用 SIMCA-14.1 软件进行层次聚类分析(HCA)、偏最小二乘判别分析(PLS-

DA)及其置换检验,并基于变量投影重要性值(Variables important in the projection, VIP)>1.0、 $P<0.05$  筛选差异香气成分,采用 TBtools 软件进行香气成分可视化聚类分析<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 柚香白茶感官审评结果

表 3 审评结果表明,柚香白茶与茶坯的感官评价差异显著( $P<0.05$ )。不同窈制处理的柚香白茶总得分  $W2-1>W2-2>W2-3$ ,各项审评因子间略有差异,外形、汤色、叶底评语及评分差异较小,香气和滋味差异较大。与 W2CK 相比,窈制处理过的茶样外形芽叶连枝、灰绿褐,干茶色泽加深;汤色由浅黄变为黄,汤色加深;有花香,无蜜香毫香。柚香白茶中 W2-1 品质优异,柚花香显、鲜浓、滋味醇爽有花味,对应工艺参数为窈制时间 14 h、配花量 80%、干燥温度 70 °C;W2-2 品质略高,有柚花香、尚醇爽、带闷感,窈制时间 16 h、配花量 80%、干燥温度 90 °C;W2-3 品质低,有花香、尚浓醇,窈制时间 14 h、配花量 40%、干燥温度 90 °C。通过柚香茶的感官评语发现窈制时间段、配花量高、低温干燥有利于柚香茶的品质;窈制时间长、配花量高容易出现闷味,不利于花茶品质;配花量少,干燥温度高花茶香气浓度低,品质欠缺。

### 2.2 柚香白茶主要呈味物质

柚香白茶及茶坯的主要呈味物质如表 4 所示,茶多酚、茶氨酸和咖啡碱含量差异显著( $P<0.05$ )。茶多酚是构成茶汤滋味的主要成分,也是影响收敛性和苦涩味的主要物质<sup>[14]</sup>。W2-1 茶多酚含量显著高于其他茶样( $P<0.05$ ), $W2-1>W2CK>W2-2>W2-3$ ;茶氨酸类似味精的鲜爽味,赋予茶汤鲜爽和香醇<sup>[14]</sup>,W2-3 茶氨酸含量显著高于 W2-2( $P<0.05$ ), $W2-3>W2CK>W2-1>W2-2$ ;咖啡碱是茶汤滋味中苦味的呈

味物质,与茶黄素发生络合反应后具有鲜爽味,是茶叶重要的滋味物质<sup>[14]</sup>,其显著性排序为  $W2-3>W2-1\approx W2CK>W2-2$ ;水浸出物是茶汤可溶性物质的总和,其显著性差异不明显。由此可见,不同窈制工艺显著影响了柚香白茶的茶多酚、茶氨酸、咖啡碱的含量( $P<0.05$ )。

### 2.3 柚香白茶香气成分分析

2.3.1 柚香白茶、柚花及茶坯主成分分析及模式识别 主成分分析(PCA)是一种无监督模式识别的多维数据统计分析方法,通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量。该方法广泛用于茶叶等级判别分析。本试验将样品进行香气检测,基于不同等级的柚香白茶香气成分含量构建 PCA 模型(参数),PC1、PC2 的方差贡献率分别为 46.97%、42.84%,累计贡献率达(89.81%),代表 PC1、PC2 分析样本具有较好的可靠性。由图 1 可知,GF、W2CK、柚香白茶集中分布在不同区域,其中,W2-1 与 W2-2 分布于第一象限、GF 分布于第二

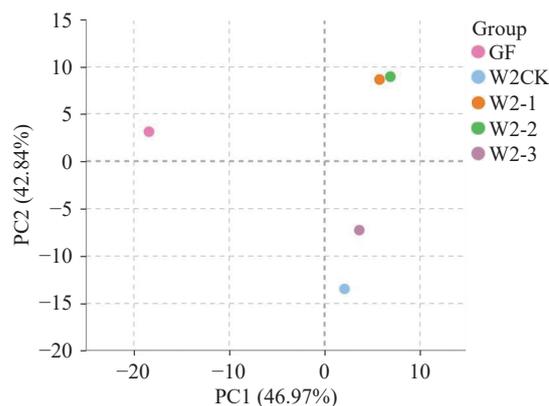


图 1 柚香白茶、柚花及茶坯主成分的 PCA

Fig.1 PCA of the principal components of pomelo white tea, pomelo flower and tea blank

表 3 柚香白茶感官审评结果

Table 3 Sensory evaluation results of pomelo white tea

茶样	外形(20%)		汤色(5%)		香气(35%)		滋味(30%)		叶底(10%)		综合评分(分)
	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	
W2-1	芽叶连枝、灰绿褐	85	黄亮	90	花香显、鲜浓	93	醇爽有花味	92	较软亮较匀齐、有芽	85	90.48±0.35 <sup>a</sup>
W2-2	芽叶连枝、灰绿褐	84	黄亮	89	有花香带闷	89	尚醇爽带闷	90	较软亮较匀齐、有芽	84	87.60±0.44 <sup>b</sup>
W2-3	芽叶连枝、灰绿褐	84	黄	84	有花香	86	尚浓醇	84	较软亮较匀齐、有芽	83	84.20±0.36 <sup>c</sup>
W2CK	芽叶连枝、灰绿带褐	86	浅黄亮	90	有花蜜香、有毫香	88	醇尚鲜	86	较软亮较匀齐、有芽	86	87.00±0.51 <sup>b</sup>

注:同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异( $P<0.05$ )。

表 4 柚香白茶主要呈味物质含量(%)

Table 4 Content of main flavor substances in pomelo white tea (%)

茶样	茶多酚	茶氨酸	咖啡碱	水浸出物
W2-1	15.90±0.04 <sup>a</sup>	1.51±0.01 <sup>c</sup>	2.85±0.02 <sup>b</sup>	41.91±0.04 <sup>a</sup>
W2-2	12.81±0.04 <sup>c</sup>	1.49±0.01 <sup>d</sup>	2.76±0.01 <sup>c</sup>	42.49±0.02 <sup>a</sup>
W2-3	12.08±0.03 <sup>d</sup>	1.73±0.00 <sup>a</sup>	2.99±0.01 <sup>a</sup>	41.91±0.01 <sup>a</sup>
W2CK	13.61±0.10 <sup>b</sup>	1.58±0.01 <sup>b</sup>	2.84±0.01 <sup>b</sup>	42.70±0.02 <sup>a</sup>

注:同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异( $P<0.05$ )。

象限、W2-3 与 W2CK 分布于第四象限,说明柚花、茶坯、柚香白香气成分的相对含量差异明显。

### 2.3.2 挥发性物质分类及主要成分分析 柚香白茶

中共检测出 13 类 233 种挥发物质。如表 5 所示,相对含量超过 1% 的物质有 64 种,其中醇类 6 种、醛类 6 种、萜类 24 种、酮类 5 种、杂环化合物 8 种、

表 5 柚香白茶及柚花挥发性物质相对含量( $\mu\text{g/g}$ )

Table 5 Relative content of volatile substances in pomelo white tea and pomelo flowers ( $\mu\text{g/g}$ )

物质分类	编号	香气成分	GF	W2CK	W2-1	W2-2	W2-3
醇类	1	脱氢芳樟醇	127.95	29.53	289.74	279.95	155.68
	2	2-苯乙醇	2.02	53.72	49.10	48.38	39.77
	3	4-甲基-苯甲醇	13.48	2.98	43.57	39.78	18.46
	4	(E,E)-2,4-庚二烯-1-醇	6.13	0.51	3.99	4.06	2.44
	5	2-壬醇	1.07	0.27	2.21	2.08	1.10
	6	2-乙基-4-(2,2,3-三甲基环戊-3-烯-1-基)丁-2-烯-1-醇	0.50	0.09	1.34	1.30	0.25
醛类	1	可可醛	36.11	8.52	67.68	63.27	37.39
	2	(Z)-癸-2-烯醛	6.56	0.49	3.42	2.83	1.29
	3	苯甲醛	1.87	3.93	2.89	2.95	3.11
	4	(Z)-1-(1-乙氧基乙氧基)己-3-烯	1.21	0.25	2.19	2.12	1.17
	5	反-2-十二烯醛	2.88	0.01	1.51	1.27	0.36
	6	三聚乙醛	1.03	1.04	1.02	1.00	0.95
萜类	1	芳樟醇	129.01	25.93	281.78	269.19	145.82
	2	紫苏烯	56.57	11.59	110.59	105.86	59.48
	3	对-薄荷-1,5,8-三烯	29.29	6.08	72.99	65.75	32.63
	4	1,3,3-三甲基-二环[2.2.1]庚-2-酮	20.41	4.35	53.52	50.45	25.83
	5	$\beta$ -罗勒烯	12.64	1.43	14.11	13.27	7.31
	6	四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃	3.30	0.81	13.80	12.74	5.27
	7	月桂烯	16.34	1.54	9.11	10.17	5.78
	8	2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇	2.27	9.41	8.89	9.18	8.74
	9	萜品油烯	4.81	6.66	8.32	8.31	6.36
	10	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	3.90	0.79	8.27	8.89	5.17
	11	$\beta$ -水芹烯	6.77	0.74	6.50	7.07	4.28
	12	(+)-柠檬烯	7.51	0.87	6.02	6.57	4.01
	13	$\beta$ -紫罗兰酮	1.08	5.46	5.49	5.09	4.15
	14	(1 $\alpha$ , 2 $\alpha$ , 5 $\alpha$ )-2-甲基-5-(1-甲基乙基)双环[3.1.0]己烷-2-醇	1.03	5.33	5.22	4.92	4.62
	15	$\alpha$ -侧柏酮	1.48	0.35	5.09	4.59	2.05
	16	$\alpha$ -石竹烯	5.92	0.02	3.35	2.79	0.72
	17	水芹烯	0.45	0.32	3.20	2.85	1.61
	18	3,7,11-三甲基-1,6,10-十二碳三烯-3-醇	0.93	0.34	2.26	2.08	0.45
	19	$\gamma$ -松油烯	0.82	0.24	1.85	1.75	1.00
	20	1-甲基-4-(1-甲基亚乙基)-环己醇	0.20	1.19	1.44	1.39	0.96
	21	邻伞花烃	1.12	0.39	1.34	1.49	1.10
	22	松油烯	0.55	0.14	1.22	1.30	0.75
	23	龙脑	3.37	0.83	1.13	1.12	0.84
	24	氧化石竹烯	0.40	0.15	1.10	1.05	0.20
酮类	1	4"-羟基苯丙酮	6.03	0.06	5.79	5.25	2.22
	2	(E)-6,10-二甲基-5,9-十一碳烯-2-酮	7.98	0.02	4.18	3.41	0.94
	3	甲基壬基甲酮	3.91	0.04	2.04	1.90	0.64
	4	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	0.58	1.80	1.65	1.59	1.57
	5	3,5-辛二烯酮	0.89	1.36	1.30	1.29	1.00
杂环化合物	1	吡啶	109.97	6.53	55.74	51.28	17.44
	2	2-噻吩甲基硫醇	4.15	1.09	12.03	11.25	5.37
	3	2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	1.74	0.31	7.74	6.99	2.79
	4	2-甲基丙基吡嗪	1.52	6.97	6.81	7.28	6.49
	5	3-丙基吡啶	4.58	0.38	3.00	3.14	1.87
	6	3-乙酰基-2,5-二甲基咪唑	0.83	0.22	2.62	2.39	1.07
	7	2-乙酰吡啶	2.69	0.27	2.27	2.36	1.44
	8	2-戊基咪唑	1.05	0.63	1.30	1.82	1.28

续表 5

物质分类	编号	香气成分	GF	W2CK	W2-1	W2-2	W2-3
酯类	1	(E)-2-甲基-2-丁酸-2-甲丙酯	23.05	5.11	59.72	56.65	28.89
	2	苯甲酸甲酯	12.27	2.65	34.95	31.76	15.26
	3	2-甲基丁酸-2-甲基丁酯	10.36	2.17	25.35	23.57	12.34
	4	水杨酸甲酯	1.73	12.74	13.76	13.40	9.82
	5	丁酸香叶酯	2.06	0.01	5.62	5.13	1.09
	6	乙酸庚酯	1.73	0.52	4.15	3.84	1.90
	7	戊酸芳樟酯	3.15	0.23	1.42	1.30	0.20
	8	(6,6-二甲基-2-双环[3.1.1]庚-2-烯基)甲基-2-甲基丙酸甲酯	2.13	0.01	1.19	0.97	0.26
	9	己酸丙酯	0.60	0.11	1.18	0.98	0.48
	10	2-甲基丙酸辛酯	1.07	0.01	1.02	0.91	0.42
烃类	1	十一烷	3.55	0.87	6.68	6.45	3.98
	2	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯	5.87	0.52	4.42	4.80	3.00
胺	1	二乙醇胺	1.19	0.01	1.12	0.98	0.46
芳烃	1	(2-硝基)苯乙烷	0.15	0.03	1.14	1.27	0.47
酸类	1	氢化肉桂酸	18.19	0.20	17.74	15.84	7.27

酯类 10 种。从化合物分类的占比结果可看出, 柚香白茶香气成分中主要以萜类、酯类和杂环类为主, 萜类、酯类物质是茶叶呈花果香的关键物质<sup>[15]</sup>。前人研究表明, 白茶的香型基础由芳樟醇及其氧化物、苯乙醇、苯甲醛等构成<sup>[16]</sup>, 而柚香白茶的香型由芳樟醇、脱氢芳樟醇、可可醛、紫苏烯、吲哚、苯甲酸甲酯等具有柑橘花香和甜香的风味物质构成, 为白茶香气增添了浓度丰富了香型。

柚花白茶 W2-1、W2-2 相比, 相对含量较高的物质有脱氢芳樟醇、芳樟醇、可可醛、紫苏烯、2-甲基丁酸-2-甲基丁酯、苯甲酸甲酯、4-甲基-苯甲醇、萜品油烯等, 这部分物质具有甜花香、柑橘花香及清凉感<sup>[17]</sup>, 这对柚香白茶香气风味具有重要贡献。对-薄荷-1,5,8-三烯、2-噻吩甲基硫醇有烘烤咖啡的风味<sup>[18]</sup>, 可能是柚花茶经窖制后干燥形成的风味。(E)-2-甲基-2-丁酸-2-甲丙酯有辛辣的草药气味<sup>[19]</sup>, 该物质可能与茶叶经过存放出现药香相关。

W2-3 与 W2CK 相对含量较为接近。W2-3 相对含量较高的物质有 2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇、2-甲基丙基吡嗪、(1 $\alpha$ , 2 $\alpha$ , 5 $\alpha$ )-2-甲基-5-(1-甲基乙基)双环 [3.1.0] 己烷-2-醇, 这部分物质有柑橘香和木质味<sup>[20]</sup>, 但香气浓度较低。W2CK 中相对含量较高的有 (1 $\alpha$ , 2 $\alpha$ , 5 $\alpha$ )-2-甲基-5-(1-甲基乙基)双环 [3.1.0] 己烷-2-醇、2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇、2-甲基丙基吡嗪、2-苯乙醇、 $\beta$ -紫罗兰酮、水杨酸甲酯等香气物质, 这部分物质含有甜花香和果香<sup>[21]</sup>, 对白茶形成“清香、花香”的香气特征具有重要贡献。其中 2-苯乙醇、 $\beta$ -紫罗兰酮、水杨酸甲酯是白茶主要芳香物质<sup>[22]</sup>, 其相对含量比 W2-3 高, 说明该茶样尚未完全吸附柚花香, 且茶叶本身的香气有所散失。

GF 与 W2CK 相比, 挥发性成分含量较高的物质有吲哚、月桂烯、 $\beta$ -水芹烯、 $\beta$ -罗勒烯、(+)-柠檬烯、氢化肉桂酸、4"-羟基苯丙酮等, 该部分物质含有木香、甜花果香与柑橘香<sup>[23]</sup>, 且在 W2-1、W2-2 中含

量均较高, 可能是柚子花赋予白茶香气的主要物质。

2.3.3 基于 OAV 对柚香白茶、茶坯及柚花主要呈香物质进行分析 气味活度值 (Odor Activity Value, OAV) 是结合化合物的感觉阈值建立的确定食品关键风味化合物的方法, 用于阐明每种香气化合物对样品整体香气特征的贡献<sup>[24]</sup>, 茶叶含量的高低无法直接说明茶叶香气特征, 通常根据 OAV 值的大小来评价香气组分对茶叶整体香气的贡献度。一般来说 OAV  $\geq 1$ , 表明该香气组分对茶叶的香气具有一定影响, OAV  $\geq 10$  时表明该香气组分对茶叶整体香气贡献极大<sup>[15]</sup>。

通过已报道的挥发性物质的阈值计算 OAV, 本研究筛选出 29 个重要挥发性成分的 OAV 值, 如表 6 所示 (以 W2-1 为参照, OAV 值均  $> 100$ ), 结果表明不同窖制工艺的柚香白茶 OAV 值存在明显差异。由表 6 可看出 W2-1、W2-2、W2-3 的 OAV 值基本呈下降趋势, 其中 OAV 大于 10000 的成分有苯甲酸甲酯、四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、 $\beta$ -紫罗兰酮、芳樟醇, 这些成分含量高对香气的贡献度大, 主要呈柑橘香和花果香<sup>[26-28]</sup>。柚花茶的 OAV 大于 1000 的成分有 2,2,6-三甲基-环己酮、(E)-2-壬烯醛、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、脱氢芳樟醇、(E,E)-2,4-壬二烯醛、十二腈, 其中脱氢芳樟醇、吲哚相对含量高, 主要呈花香和木香<sup>[29-30]</sup>, 这部分物质可能是柚花白茶柚花香浓郁的主要呈香物质。

GF 与 W2CK 相比, GF 的苯甲酸甲酯、四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、芳樟醇、吲哚、月桂烯、(E)-6,10-二甲基-5,9-十一碳烯-2-酮、甲基壬基甲酮、反-2-十二烯醛、 $\beta$ -水芹烯、(+)-柠檬烯、2-甲基丙酸辛酯等物质 OAV 值明显高于 W2CK, 且该部分物质在柚香白茶中 OAV 值也高于 W2CK, 可见该部分物质是柚花对白茶的主要赋香物质。相关研究表明,  $\alpha$ -月桂烯、水芹烯、柠檬烯<sup>[31]</sup> 等是柚子花挥发性成分的主要贡献物质, 该研究中 OAV 大于

表 6 柚香白茶及柚花的挥发性成分 OAV 和香气描述

Table 6 Volatile components OAV and aroma description in pomelo white tea and pomelo flowers

编号	物质	香型	阈值 <sup>[25]</sup>	OAV值				
				GF	W2CK	W2-1	W2-2	W2-3
1	苯甲酸甲酯	酚醛类物质的气味	0.0005	24532.51	5292.32	69892.13	63515.12	30524.08
2	四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃	花香	0.0002	16522.44	4062.47	69007.42	63680.52	26343.17
3	$\beta$ -紫罗兰酮	花香、木质香、甜果香、浆果香	0.0001	10838.72	54610.32	54852.05	50861.72	41469.24
4	芳樟醇	柑橘花香、甜玫瑰气味	0.0060	21501.20	4321.47	46963.38	44865.82	24303.70
5	2,2,6-三甲基-环己酮	辛辣侧柏气味	0.0001	1247.77	9057.32	7520.04	7567.23	7308.10
6	(E)-2-壬烯醛	脂肪、黄瓜、醛类和柑橘类气味	0.0001	216.25	3609.61	3901.57	4217.80	3269.95
7	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	果香、草香	0.0005	1163.18	3596.29	3291.12	3184.03	3133.99
8	脱氢芳樟醇	热带草木味	0.1100	1163.18	268.41	2634.02	2544.97	1415.27
9	(E,E)-2,4-壬二烯醛	强烈的脂肪味花香	0.0002	177.65	1629.43	1880.01	1651.97	1408.93
10	十二腈	橘橙皮混合金属辛辣味	0.0001	1686.61	1474.03	1473.04	1414.20	1087.72
11	吡啶	低浓度时有花香	0.0400	2749.33	163.16	1393.42	1281.88	435.94
12	2-壬烯醛	脂肪味, 紫罗兰味	0.0001	215.72	563.86	836.05	988.29	567.65
13	呋喃酮	甜甜的棉花糖、焦糖味道	0.0010	1538.57	834.69	725.46	736.05	611.84
14	月桂烯	胡椒萜烯辣香	0.0150	1089.16	102.41	607.50	678.16	385.23
15	(2-硝基)苯乙烷	花香料	0.0020	75.34	16.80	570.64	634.74	234.54
16	(E)-6,10-二甲基-5,9-十一碳烯-2-酮	果香	0.0100	798.36	2.49	418.03	341.15	94.16
17	$\beta$ -罗勒烯	甜草药味	0.0340	371.66	42.05	415.03	390.40	214.94
18	2-苯乙醇	玫瑰的花香	0.1400	14.43	383.73	350.72	345.58	284.07
19	水杨酸甲酯	冬绿薄荷味	0.0400	43.35	318.56	343.93	334.94	245.59
20	2-甲基丁酸-2-甲基丁酯	甜果味	0.0750	138.17	28.89	337.96	314.27	164.52
21	甲基壬基甲酮	果味	0.0062	630.20	5.73	329.63	306.13	102.52
22	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯	花香、草本香气	0.0340	114.61	23.11	243.30	261.48	151.96
23	3,7,11-三甲基-1,6,10-十二碳三烯-3-醇	花香、柑橘香、木质香	0.0100	92.53	33.96	225.60	208.00	44.87
24	2-戊基呋喃	果味	0.0060	175.36	105.08	216.02	303.93	213.58
25	反-2-十二烯醛	柑橘类味道	0.0073	394.73	1.51	207.24	173.90	49.82
26	$\beta$ -水芹烯	薄荷、松节油味	0.0360	187.99	20.47	180.63	196.42	118.97
27	(+)-柠檬烯	柑橘橙子甜味	0.0340	220.82	25.46	176.94	193.38	117.97
28	2-甲基丙酸辛酯	果味、奶油味	0.0060	178.00	1.41	169.57	152.31	70.25
29	邻伞花烃	橘陈皮香、辛辣味	0.0114	97.86	34.47	117.96	130.94	96.61

注: 气味属性参考: <https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx>。

100, 对柚花白茶的香气具有重要意义, 这与前人的研究结果基本一致。

W2-1 与 W2-2 相比, 除了(E)-2-壬烯醛、2-壬烯醛、呋喃酮、月桂烯、3,7,11-三甲基-1,6,10-十二碳三烯-3-醇、2-戊基呋喃、 $\beta$ -水芹烯、(+)-柠檬烯、邻伞花烃外, 其余物质 OAV 值均比 W2-2 高, 而研究表明, 2-壬烯醛在空气中的浓度大于  $0.10 \mu\text{g}/\text{cm}^3$  时, 呈现腐菜臭和油脂臭, 难以清除<sup>[32]</sup>, 这可能是 W2-2 感官评语中有闷味, 品质不如 W2-1 的主要原因之一。

### 3 结论

本研究通过以同种茶坯、不同窈制处理获得的柚香白茶为实验原料进行感官审评、主要呈味物质检测及挥发性检测, 探究柚香白茶的关键风味物质。感官审评分析表明: W2-1 品质优异, 柚花香显、鲜浓、滋味醇爽有花味; W2-2 品质略高, 有柚花香带闷感、滋味尚醇爽带闷; W2-3 品质低, 有花香、尚浓醇。从 W2-1 感官结果体现窈制时间 14 h、配花量 80%、干燥温度  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  品质最佳, 即配花量高、干燥温度低有益于形成柚香茶香气和滋味的优良品质;

W2-3 感官结果体现窈制时间 14 h、配花量 40%、干燥温度  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  品质最差, 即配花量少, 干燥温度高不利于柚花茶香气的形成。主要呈味物质分析表明: 不同窈制处理的柚花茶茶多酚、茶氨酸和咖啡碱含量差异显著( $P < 0.05$ ), 水浸出物含量差异不明显, 在几种不同化学因子含量、组成及配比的共同作用下呈现不同的茶汤品质。从样品中共检测出 233 种挥发性化合物, 以萜类、酯类、杂环化合物为主, 其中相对含量超过 1% 的物质有 64 种, 其中芳樟醇和脱氢芳樟醇的相对含量均超过  $100 \mu\text{g}/\text{g}$ , 是柚香白茶的主要作用物质。香气活度值分析表明: 苯甲酸甲酯、四氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃、 $\beta$ -紫罗兰酮、芳樟醇、2,2,6-三甲基-环己酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮、脱氢芳樟醇等物质是柚花茶的呈香物质, 该部分物质 OAV 值均  $> 1000$  主要呈花果香。柚香白茶(W2-1、W2-2、W2-3)香气成分种类相同, 但香气含量存在差异, 对-薄荷-1,5,8-三烯、2-噻吩甲基硫醇有烘烤咖啡的风味, 可能是柚花茶经窈制后干燥形成的风味, (E)-2-甲基-2-丁酸-2-甲丙酯有辛辣的草

药气味可能与茶叶经过存放出现药香相关;2-壬烯醛可能是柚花茶中有闷杂味的主要作用物质。感官审评结果、呈味物质及挥发性物质的检测结果基本一致。本研究有助于了解柚香白茶的风味化学品质,为提高柚香白茶的品质提供理论依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] 张海金. 平和省级农业科技园区: 三大主导产业带动农民增收致富[J]. 中国农村科技, 2017(6): 50-53. [ZHANG H J. Pinghe provincial agricultural science and technology park: Three leading industries drive farmers to increase their incomes[J]. China Rural Science and Technology, 2017(6): 50-53.]
- [2] 李春霞, 邓春丽, 叶彩婷, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定柚花中317种农药残留量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 22-27. [LI C X, DENG C L, YE C T, et al. Simultaneous determination of 317 pesticide residues in pomelo flowers by QuEChERS-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2025, 16(1): 22-27.]
- [3] 徐小忠, 郑浩, 郑湾湾, 等. 常山胡柚花茶窈制技术研究初探[J]. 浙江柑橘, 2020, 37(3): 22-24. [XU X Z, ZHENG H, ZENG W W, et al. Preliminary study on scenting technology of Changshan pomelo flower tea[J]. Zhejiang Citrus, 2020, 37(3): 22-24.]
- [4] 黎朝华. 建阳白茶的品质特征与加工工艺[J]. 福建农业, 2012, 34(8): 8. [LI C H. Quality characteristics and processing technology of Jianyang white tea[J]. Fujian Agriculture, 2012, 34(8): 8.]
- [5] 姚珊珊, 郭雯飞. 桂花龙井茶和柚子花茶的香气成分[J]. 茶叶, 2005, 49(4): 228-232. [YAO S S, GUO W F. Aroma components of Guihualongjing tea and pomelo flower tea[J]. Tea, 2005, 49(4): 228-232.]
- [6] 廖远东, 夏红玲, 刘容飞, 等. 不同茶坯窈制柚花中化学成分变化及感官品质差异[J]. 广东茶业, 2023(6): 9-12. [LIAO Y D, XIA H L, LIU R F, et al. Changes in chemical composition and sensory quality of pomelo tea scented with different tea billets[J]. Guangdong Tea Industry, 2023(6): 9-12.]
- [7] 赖榕辉, 刘容飞, 黄海英, 等. 梅州市柚花茶加工关键技术研究[J]. 广东茶业, 2021(5): 12-15. [LAI R H, LIU R F, HUANG H Y, et al. Research on the key processing technology of grapefruit tea in Meizhou City[J]. Guangdong Tea Industry, 2021(5): 12-15.]
- [8] 陈育财. 铁观音柚子花茶加工试验初探[J]. 中国茶叶, 2024, 46(5): 54-58. [CHEN Y C. Preliminary study on the processing of Tieguanyin pomelo flower tea[J]. Chinese Tea, 2024, 46(5): 54-58.]
- [9] 周炎花, 杨双旭, 张琳莉, 等. 桂花铁观音窈制工艺与品质研究[J]. 热带农业科学, 2022, 42(5): 75-80. [ZHOU Y H, YANG S X, ZHANG L L, et al. Study on scenting process and quality of Guihua Tieguanyin[J]. Tropical Agricultural Sciences, 2022, 42(5): 75-80.]
- [10] 尹洪旭, 杨艳芹, 姚月凤, 等. 基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同粟香特征绿茶判别分析[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 192-198. [YIN Hongxu, YANG Yanqin, YAO Yuefeng, et al. Discrimination of different characteristics of chestnut-like green tea based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical data analysis[J]. Food Science, 2019, 40(4): 192-198.]
- [11] 刘盼盼, 许勇泉, 尹军峰, 等. 主要水质因子对清香型黄山毛峰茶挥发性成分的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(1): 245-257. [LIU Panpan, XU Yongquan, YIN Junfeng, et al. Effect of main water quality factors on volatile components of Huangshan Maofeng tea with faint scent[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(1): 245-257.]
- [12] 杨静芸, 吉宏武, 张迪, 等. 常压浸渍与脉冲真空浸渍麻辣凤尾虾的风味特性及其风味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 235-245. [YANG J Y, JI H W, ZHANG D, et al. Analysis of flavor characteristics and flavor components of spicy anchovy marinated by atmospheric pressure impregnation and pulsed vacuum impregnation[J]. Food and Fermentation Industry, 2024, 50(17): 235-245.]
- [13] 冯花, 王飞权, 张渤, 等. 不同茶树品种白牡丹茶香气成分的HS-SPME-GC-MS分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 252-264, 251. [FENG H, WANG F Q, ZHANG B, et al. HS-SPME-GC-MS analysis of aroma components in white peony tea of different tea varieties[J]. Modern Food Technology, 2021, 37(12): 252-264, 251.]
- [14] 宛晚春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2022(3): 9-34. [WAN X C. Biochemistry of tea[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022(3): 9-34.]
- [15] 吴全金, 周喆, 漆思雨, 等. 炭焙和电焙白茶的关键风味物质和品质差异[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 259-267. [WU Q J, ZHOU Z, QI S Y, et al. Differences in key flavor compounds and quality between charcoal-roasted and electro-roasted white tea[J]. Food Science, 2023, 44(18): 259-267.]
- [16] 陈志达. 白茶风味品质的物质基础与量化评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. [CHEN Z D. Study on the material basis and quantitative evaluation of the flavor quality of white tea[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.]
- [17] 丁凤娇, 柳紫琼, 闫佳伟, 等. 变温烘焙技术对美人茶品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(9): 263-274.
- [18] [DING F J, LIU Z Q, YAN J W, et al. Effect of variable temperature baking technology on the quality of Meiren tea[J]. Food Science, 2025, 46(9): 263-274.]
- [19] 付存存. 基于美拉德反应中间体五香牛肉风味料制备及应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024. [FU C C. Preparation and application of spiced beef flavoring based on Maillard reaction intermediate[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.]
- [20] PAINDURE Ltd. Patent issued for solid dosage form for treating headaches[J]. Biotech Week, 2013, 36(4): 21-22.
- [21] 王贞强, 马波, 迟建, 等. 荔枝酒香气成分的GC/MS分析[J]. 中国农学通报, 2006(8): 135-138. [WANG Z Q, MA B, CHI J, et al. GC/MS analysis of aroma components in litchi wine[J]. China Agricultural Bulletin, 2006(8): 135-138.]
- [22] 玘效伟, 吴恒, 李帆, 等.  $\beta$ -紫罗兰酮生物合成及其关键限速酶CCDs的研究进展[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2024,

- 46(6): 1159–1172. [ GONG X W, WU H, LI F, et al. Advances in  $\beta$ -ionone biosynthesis and its key rate-limiting enzyme CCDs[J]. Journal of Yunnan University(Natural Science Edition), 2024, 46(6): 1159–1172. ]
- [ 23 ] GUO W, SASAKI N, FUKUDA M, et al. Isolation of an aroma precursor of Benzaldehyde from tea leaves (*Camellia sinensis* var. *sinensis* cv. Yabukita) [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1998, 62(10): 2052–2054.
- [ 24 ] LIN Y Y, ZHANG X M, SUN M, et al. Discovering potential fumigants against *Tribolium castaneum* from essential oils using GC-MS and chemometric approaches[J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 110102485–102485.
- [ 25 ] 严学芬, 许应芬, 李海燕, 等. 基于顶空固相微萃取法-气相色谱-质谱法和相对气味活度值分析 13 种凤凰单丛茶香气成分 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5459–5467. [ YAN X F, XU Y F, LI H Y, et al. The aroma components of 13 kinds of Fenghuang Dancong tea were analyzed based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and relative odor activity value[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2022, 13(17): 5459–5467. ]
- [ 26 ] JIN L, LIAN X, CHEN L, et al. Characteristic aroma analysis and interaction study of key aroma compounds of Chuanhong congou black tea[J]. European Food Research and Technology, 2024, 250(2): 441–454.
- [ 27 ] AN H, OU X, CHEN Y, et al. Scenting: An effective processing technology for enriching key flavor compounds and optimizing flavor quality of decaffeinated tea[J]. Food Chemistry, 2024, 467: 142372.
- [ 28 ] JIN G W, MING Y Z, TING G, et al. Promoter and coding sequence diversity of CsCCD1 may contribute to the differential accumulation of floral  $\beta$ -ionone in fresh tea leaves[J]. Horticultural Plant Journal, 2023, 9(4): 837–847.
- [ 29 ] 孙红玉. 原料产地对金花白茶香味品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023. [ SUN H Y. The effect of raw material origin on the aroma quality of golden white tea[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2023. ]
- [ 30 ] LUO H, WANG Y, CHANG R, et al. Chemical composition and discrimination with volatile profiles of Yongchuan Xiuya green tea with different baking treatments[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2024, 39(4): 224–235.
- [ 31 ] ZHANG EW L, JUHONG W. Identification and similarity analysis of aroma substances in main types of Fenghuang Dancong tea[J]. PLoS One, 2020, 15(12): e0244224–e0244224.
- [ 32 ] MOLLOVA S, STANEV S, BOJLOV D, et al. Chemical composition and biological activity of essential oil from anise hyssop[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2024, 38(1). <https://doi.org/10.1080/13102818.2024.2358995>.