王亚防, 李彦奇, 宋慕波, 等. 不同加工工艺初夏福鼎大白白茶感官及品质成分分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 369−377. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090009

WANG Yafang, LI Yanqi, SONG Mubo, et al. Effects of Different Processing Techniques on Sensory Profile and Quality Components of Early-summer Fuding Dabai White Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 369−377. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090009

· 分析检测 ·

不同加工工艺初夏福鼎大白白茶感官及品质成分分析

王亚防[1,2], 李彦奇[1,3], 宋慕波[1,2], 闫科良[1,2], 李忠芳[1,2,*]

（1.贺州学院食品与生物工程学院, 广西贺州 542899;
2.广西康养食品科学与技术重点实验室, 广西贺州 542899;
3.安徽农业大学茶与食品科技学院, 安徽合肥 230036）

摘　要: 为提高初夏白茶的品质，进一步优化其加工工艺，探究不同工艺白茶品质及其物质基础。本研究以福鼎大白品种初夏一芽二叶鲜叶为原料，在传统工艺室内萎凋和复式萎凋的基础上，分别增添轻揉和摇青工艺处理。通过对成品茶进行感官品质审评、主要生化成分含量测定，并结合顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析其挥发性香气成分，以探究不同工艺的影响。感官审评表明，经过轻揉和摇青的白茶香气更清高持久，滋味更甘醇爽口，综合感官品质更佳。生化成分测定表明，轻揉与摇青处理的白茶，水浸出物含量分别为 32.19% 和 34.56%，可溶性糖含量分别为 4.75% 和 4.61%，均显著高于萎凋白茶（P<0.05）。香气组分分析共检测出 1172 种成分，包含 408 种同分异构体。根据化合物主要官能团的不同，检测到的香气成分可分为 15 大类，其中萜类、酯类、酮类、醇类化合物占比最多。基于相对气味活性值分析，二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮、(E)-β-大马酮、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-己烯醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮等物质是关键香气成分。研究表明，轻揉与摇青工艺能有效改善初夏白茶的感官品质并显著提升其关键理化成分含量，为初夏白茶的品质精准调控与加工工艺创新提供理论依据和数据支撑。

关键词: 白茶, 加工工艺, 生化成分, 感官审评, 挥发性物质

中图分类号: TS272.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0369−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090009

本文网刊:

Effects of Different Processing Techniques on Sensory Profile and Quality Components of Early-summer Fuding Dabai White Tea

WANG Yafang[1,2], LI Yanqi[1,3], SONG Mubo[1,2], YAN Keliang[1,2], LI Zhongfang[1,2,*]

（1.School of Food and Biological Engineering, Hezhou University, Hezhou 542899, China;
2.Guangxi Key Laboratory of Health Care Food Science and Technology, Hezhou 542899, China;
3.College of Tea and Food Science & Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China）

Abstract: To improve the quality of early-summer white tea, further optimize its processing technology, and explore the quality and material basis of white tea processed with different techniques. This study used fresh leaves of the 'Fuding Dabai' cultivar, harvested at the stage of one bud and two leaves, as raw materials. Based on the traditional indoor withering and combined indoor-outdoor withering, light-rolling and shaking-green treatments were introduced, respectively. Through sensory evaluation, major biochemical analyses, and determination of volatile aroma components via headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), the influence of different processing techniques on the finished tea was investigated. The sensory evaluation results indicated that the white teas

收稿日期: 2025−09−02

基金项目: 2023 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2023KY0728）; 贺州茶园绿色低碳栽培与生态高值模式协同创新（XQHZ202401）。

作者简介: 王亚防（1990−）, 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 茶叶生物化学、茶与健康, E-mail: 2571076874@qq.com。

*** 通信作者:** 李忠芳（1976−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 茶园土壤, E-mail: 56791696@qq.com。

processed with light-rolling and shaking-green exhibited a more refreshing, pronounced, and lasting aroma, along with a sweeter and more pleasant taste, and consequently, a superior overall sensory quality. The analysis of biochemical components demonstrated that the water extract contents of the light-rolled and shaking-greened teas were 32.19% and 34.56%, respectively, and the soluble sugar contents were 4.75% and 4.61%, respectively, both of which were significantly higher than those of the traditionally withered tea (P<0.05). The analysis of aroma components led to the detection of 1172 compounds in total, which included 408 isomers. Based on the differences in their primary functional groups, the detected aroma components were classified into 15 major categories, with terpenoids, esters, ketones, and alcohols being the most abundant. Relative odor activity value (ROAV) analysis identified dihydro-2-methyl-3(2H)-furanone, (E)-β-damascone, (E,Z)-2,6-nonadienal, (E)-2-hexenal, and 4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone as key aroma compounds. The findings demonstrate that light-rolling and shaking-green are effective techniques for enhancing the sensory and key physicochemical properties of early-summer white tea. This study provides critical data and a theoretical foundation for innovating processing techniques and achieving precise quality management.

Key words: white tea; processing technology; biochemical constituents; sensory evaluation; volatile compounds

白茶是我国六大茶类之一，其加工工艺以萎凋为核心，主要通过萎凋、干燥工艺使茶叶发生自然转化，形成其外形芽叶自然舒展、叶色灰绿，密披银毫，汤色浅黄明亮，花果香带毫香，滋味清甜醇爽等独特的品质特征[1]。这些品质特征的形成与其加工工艺密切相关[2−3]。传统的白茶加工工艺以萎凋为主，即在通风、阴凉的环境下让茶叶自然失水，同时此过程中茶叶的内含物质发生一系列复杂的物理化学变化，这些变化决定了成茶的品质特征[4−5]。然而，随着消费者需求多元化和对高品质白茶的追求，传统加工工艺逐渐显现出一些问题，例如制成的白茶香气不高、滋味淡薄、不耐泡等[6]。为克服传统白茶因不炒不揉所导致的茶叶内含物质浸出率偏低，茶汤滋味偏淡等局限，周有良[7] 在传统萎凋-干燥工艺中引入轻揉捻工序，结果表明该处理显著提升了成茶水浸出物总量，且未明显破坏其原有的感官品质。詹冬梅等[8] 通过对比不同压饼方式对紧压型白茶寿眉品质的影响发现，压制方法即“先压后藏或先藏后压”显著影响其滋味厚度与香气类型，其中“先压后藏”工艺可显著降低茶汤涩感并赋予其梅子香型，而“先藏后压”则更利于花果香的保留。吴英华[9] 采用了轻萎凋、轻发酵和轻揉捻的方法，制成了具有外形曲卷、汤色杏黄、香味甜醇的新白茶品质特征。王飞权等[10] 以传统白茶工艺为对照引入摇青、揉捻和摇青加揉捻为处理，对比分析不同加工工艺对白茶各类生化成分及感官品质的影响，结果表明，采用摇青加工工艺制作的白茶，具有花香型白茶的品质特征，品质最为优异。现有研究多集中于春秋两季白茶在产地、年份与品种等方面的差异，而对加工工艺所引起的理化特性及挥发性成分变化规律的研究仍较薄弱，尤其在初夏白茶方面尚显不足。福鼎大白茶作为国家审定的优良树种和白茶核心产区的主要栽培品种，因其品质特征显著且研究基础广泛，常被视为白茶类研究的代表性材料[11]。而茶叶挥发性成分是评价其风味品质的关键指标。因此，本研究以同一茶园、同一品种、同一采摘期的福鼎白茶鲜叶为原料，通过不同加工工艺制成茶样，在测定主要化学成分并进行感官审评的基础上，重点分析挥发性物质的组成差异，旨在系统分析不同加工工艺对初夏白茶生化成分及感官品质的影响，揭示其内含成分与香气物质的变化规律。本研究期望在传承白茶传统工艺的同时，通过工艺创新改善茶叶外形与风味品质，丰富白茶产品类型，提升市场适应性，为初夏白茶的精准加工提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验所用茶鲜叶　福鼎大白品种，嫩度标准为一芽二叶，于 2025 年 5 月 22 日（初夏）采摘于广西贺州市；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。

8890-7000D 型气相色谱-质谱联用仪、120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头　美国 Agilent 公司；固相微萃取装置　瑞士 CTC Analytics AG 公司；MS105DU 型电子天平　瑞士 METTLER TOLEDO 公司；MB90 卤素水分测定仪　OHAUS。

1.2 实验方法

1.2.1 供试样加工工艺流程　将采下的福鼎大白茶鲜叶均分为四份，分别采用不同的加工工艺进行制作干燥处理后分别取样[9−10,12]。

室内萎凋白茶（C1）：将晾青叶薄摊于水筛中，室内温度约 25 ℃，萎凋至六成干时进行第一次并筛，萎凋至八成干时进行第二次并筛，萎凋至九成干时，下筛拣剔。然后进行烘干，用毛火 100 ℃ 初烘 15 min，摊凉 1 h，再用 70 ℃ 复烘 10 min，烘至茶叶含水量低于 5%。

复式萎凋白茶（C2）：即日光萎凋与室内萎凋相结合的萎凋方法。将晾青叶薄摊于水筛中，在第一次并筛后于傍晚室外温度在 25 ℃ 左右时，分三次晾晒于日光下进行萎凋，每次 15 min，共计 45 min，其余时间移至室内进行萎凋至九成干，烘干至茶叶含水量低于 5%。

轻揉白茶（C3）：供试样采用复式萎凋的方法，处理方法与 C2 萎凋工序一致，不同的是，第三次日光

萎凋完成后，于室内进行 5 min 轻揉捻处理，室内温度约 25 ℃。揉捻时轻压、短时，将萎凋叶揉至叶片稍微皱缩，稍成条索为适度，继续进行室内萎凋至九成干，烘干至茶叶含水量低于 5%。

摇青白茶（C4）：供试样采用复式萎凋的方法，处理方法与 C2 萎凋工序一致，不同的是，在第三次日光萎凋完成后将萎凋叶采用水筛摇青，来回摇为一下，一次摇 50 下，摇青力度要轻，摇至芽叶柔软垂卷，摇完一次后，静置摊放 15 min，使得芽叶重新恢复到紧张的状态，再次继续摇青、晾青，交替进行，共计摇青 4 次，200 下，该处理完成后继续进行室内萎凋至九成干，烘干至茶叶含水量低于 5%。

1.2.2　感官审评　参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》[13]，由 7 名高级评茶员（4 名女性，3 名男性）组成审评小组对四种不同加工工艺白茶进行感官审评。其中外形占 25%，汤色占 10%，香气占 25%，滋味占 30%，叶底占 10%。

1.2.3　主要品质成分测定　茶叶含水量采用卤素水分测定仪测定；水浸出物含量采用 GB/T 8305-2013（全量法）测定[14]；游离氨基酸总量采用茚三酮显色法[15]（GB/T 8314-2013）分析，以茶氨酸为标准品建立标准曲线（y=0.0023x−0.3624，R^2=0.998）。咖啡碱含量依据紫外分光光度法[16]（GB/T 8312-2013）测定，标准曲线为 y=0.0855x+0.0056，R^2=0.998；茶多酚的测定用福林酚法[17]（GB/T 8313-2018），标准曲线为 y=0.0133x+0.0078，R^2=0.997。总黄酮含量用 $AlCl_3$ 比色法测定[18]，即精确称取 2.00 g 磨碎茶样，用 80 mL 沸蒸馏水于沸水浴中浸提 30 min，过滤定容至 100 mL 作为供试液。吸取 0.5 mL 供试液，加入 10 mL 1% 三氯化铝溶液，显色 10 min 后于 420 nm 波长下测定吸光度（A）。可溶性糖含量用蒽酮-硫酸比色法[19]进行测定，以葡萄糖为标准品测定标准曲线为 y=0.0032x+0.0106，R^2=0.998，其含量公式为：

$$可溶性糖含量(\%) = \frac{C \times V \times D}{m \times 10^6} \times 100$$

式中，C 为测试液糖浓度（μg/mL），V 为样品液体积（mL），D 为稀释倍数，m 为样品质量（g）。

1.2.4　香气组分提取检测及香气相对气味活度值评价方法　样品制备：−80 ℃ 冷冻样本经液氮冷却后研磨，称取 500 mg 置于 20 mL 顶空瓶；加入 2 mL 饱和 NaCl 溶液及 20 μL 内标（10 μg/mL），60 ℃ 恒温条件下，振荡 5 min，混匀备用。

120 μm DVB/CWR/PDMS 的 SPME Arrow 萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取 15 min，于进样口 250 ℃ 下解析 5 min，然后进行 GC-MS 分离鉴定。采样前萃取头在 Fiber Conditioning Station 中 250 ℃ 下老化 5 min。

GC-MS 条件：采用 DB-5MS 色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）。载气：高纯 He（≥99.999%），1.2 mL/min。升温程序：40 ℃（3.5 min）→10 ℃/min→100 ℃→7 ℃/min→180 ℃→25 ℃/min→280 ℃（5 min）。进样口：250 ℃，不分流，溶剂延迟 3.5 min。质谱：EI 源 70 eV；离子源 230 ℃，四极杆 150 ℃，接口 280 ℃；SIM 模式，定性定量离子按 GB 23200.8-2016 执行。

定性分析：代谢物定性及定量分析基于自建 MWGC 数据库完成。各试样经气相色谱质谱分析后，所得总离子色谱图用 MassHunter 定量软件进行分析[20−21]，并采用内标半定量法计算样品中挥发性有机化合物（volatile organic compounds，VOCs）的相对含量，内标为 [3,4,5-$^2H_3$]（10 μg/mL），计算公式如下。

$$X_i = \frac{V_s \times C_s \times I_i \times 10^{-3}}{M \times I_s}$$

式中，X_i 为待测样品中化合物 i 的含量（μg/g）；V_s 为加入内标物的体积（μL）；C_s 为内标物的浓度（μg/mL）；M 为待测样品的量（g）；I_s 为内标物的峰面积；I_i 为待测样品中化合物 i 的峰面积。

代谢物 ROAV 分析[22−24]：相对气味活度值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，其计算公式如下：

$$ROAV_i = C_i/T_i$$

式中，$ROAV_i$ 为化合物 i 的相对气味活度值，C_i 为化合物的相对含量（μg/g）；T_i 为化合物的阈值（μg/g）。

1.3　数据处理

所有实验测定均独立重复三次，结果以“平均值±标准差”表示。采用 GraphPad Prism 9.5 软件，通过单因素方差分析（ANOVA）及 Duncan's 多重比较检验进行显著性分析，显著性水平设为 P<0.05。此外，采用主成分分析（PCA）和正交偏最小二乘法判别分析（OPLS-DA）对香气组分数据进行多变量统计分析。

2　结果与分析

2.1　不同加工工艺白茶含水量的变化过程

茶叶含水量是调控白茶品质形成的关键参数。如图 1 所示，四种白茶在萎凋过程中各节点的含水率均存在显著性差异（P<0.05）。萎凋初期，叶片自由水含量高，蒸腾作用旺盛，因此失水较快；至萎凋后期，细胞结构改变、间隙减小，水分迁移受阻，导致失水速率减缓。对比不同工艺发现，C3 与 C4 在各萎凋节点的含水率低于 C1 与 C2。这可能源于轻揉捻与摇青处理使叶片细胞壁产生了一定程度的破损，从而为水分扩散提供了更多通道，加速了水分的散失[25−26]。

2.2　不同加工工艺对白茶感官品质的影响

由表 1 可知，对不同加工工艺的白茶进行感官审评综合得分 C4、C3 均显著高于 C2、C1（P<

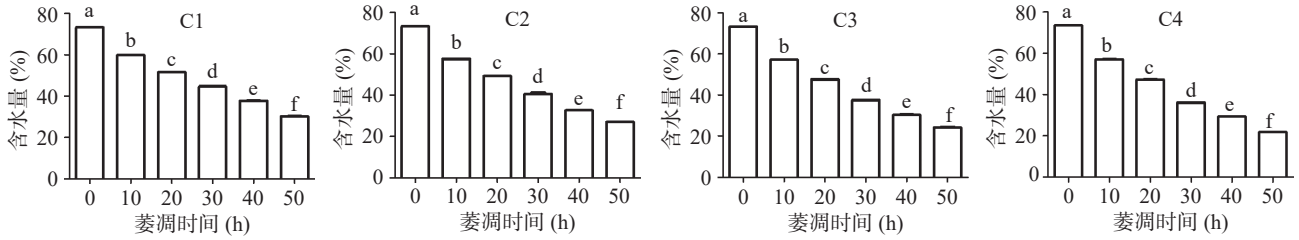


图 1 不同加工工艺白茶萎凋过程含水量变化

Fig.1 Changes in moisture content during withering of white tea processed by different methods

注: 图中对相同工艺不同萎凋时间之间进行比较, 不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$。

表 1 不同加工工艺的白茶感官审评结果

Table 1 Sensory evaluation results of white tea processed by different methods

茶样	外形		汤色		香气		滋味		叶底		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
C1	色泽灰绿自然舒展匀净	92.00±0.58^{ab}	浅黄明亮	92.00±0.58^{b}	清香带毫香	87.00±0.58^{d}	鲜甜清爽	86.29±0.49^{c}	绿黄软匀整	89.14±0.69^{ab}	88.75±0.30^{d}
C2	灰绿舒展匀净	92.14±0.69^{a}	浅黄明亮	93.14±0.69^{a}	清香毫香略带花香	88.57±0.53^{c}	清甜鲜爽	87.00±0.82^{c}	绿黄软匀净	89.86±0.38^{a}	89.58±0.26^{c}
C3	毫心较显叶色灰绿条索微弯匀净	90.14±0.69^{c}	杏黄明亮	92.57±0.53^{ab}	清甜香带花香	91.29±0.49^{b}	甘醇鲜爽	92.14±0.69^{a}	叶黄皱缩筋微红匀整	86.14±0.69^{c}	90.87±0.17^{ab}
C4	毫尖较显色泽灰绿叶缘略卷较舒展匀净	91.00±0.58^{bc}	杏黄明亮	92.86±0.38^{ab}	花果香清高持久略带毫香	93.00±0.82^{a}	浓醇甘爽	91.00±0.58^{b}	绿黄略带红边匀净	87.00±0.82^{c}	91.29±0.27^{a}

注: 表中同一列不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$; 表2同。

0.05)。其中 C2 显著高于 C1($P<0.05$), 其主要原因可能是复式萎凋能够更好地调控温度、湿度、光照和通风条件, 促进茶叶内含物的转化和香气成分的形成。C3 显著高于 C2($P<0.05$)可能是通过轻揉促进茶叶内含物的转化和释放, 增加香气成分的生成, 改善滋味的鲜爽度和甜醇感。C4 显著高于 C2 可能是由于摇青过程中, 茶叶细胞的损伤可能促进类胡萝卜素和萜类化合物的降解, 生成具有花香、果香和甜香的挥发性化合物, 所以 C4 的香气具有清花果香略带毫香持久的特点, 香气得分最高[27]。

2.3 不同加工工艺对白茶滋味品质成分分析

水浸出物、茶多酚、黄酮、咖啡碱、可溶性糖、游离氨基酸是茶叶内含成分丰富与否的重要指标, 不仅仅影响茶汤滋味口感也体现茶叶的营养与健康属性。由表 2 可知, 水浸出物含量范围为 28.40%~34.56%, 其中 C3、C4 显著高于 C1、C2($P<0.05$), C3 和 C4 组分别经轻揉和摇青处理, 茶叶在机械外力作用下发生一定程度的细胞破碎, 导致部分胞内物质的溶出, 从而提升了水浸出物的整体含量。茶多酚含量范围为 22.17%~28.28%, 其中 C1、C2 显著高于 C3、C4($P<0.05$), 可能是由于茶多酚极易被氧化, 在白茶加工过程中, 由于轻揉和摇青一定程度上破坏了茶叶细胞壁的完整结构进入细胞的氧气含量增加, 从而加速茶多酚的氧化反应, 因此 C3、C4 茶多酚含量降低, 有助于减轻茶汤中的苦涩味, 因此感官审评时 C3、C4 茶汤滋味更佳[28]。总黄酮含量范围为 1.76%~1.95%, 各处理组之间无显著性差异($P>0.05$)。咖啡碱含量为 3.44%~3.73%, 摇青白茶 C4 含量最高, 复式萎凋 C2 含量最低, 二者存在显著性差异($P<0.05$)。这可能与多次摇青, 使咖啡碱从与多酚类物质、氨基酸等缔合的络合物中释放有关[29]。可溶性糖含量为 4.48%~4.75%, C3、C4 显著高于 C1、C2($P<0.05$), 可能原因是 C3 和 C4 别分在揉捻和摇青工序时, 细胞中酶活性增加, 加速淀粉和纤维素等分解形成可溶性糖[30]。游离氨基酸含量 2.28%~2.56%, C3、C4 显著低于 C1、C2($P<0.05$), 这可能是因为在萎凋过程中蛋白质和多肽的持续水解而使得氨基酸持续积累, 所以随着萎凋时间延长, 氨基酸含量有所升高, 但揉捻和摇青可能促进了氨基酸作为香气前体物质的挥发或转化, 而本实验中, C1 萎凋最长为氨基酸的积累提供了最充足的时间, 因此其含量最高[30−31]。

表 2 不同加工工艺白茶生化成分含量(%)

Table 2 Biochemical component contents of white tea processed by different methods (%)

编号	水浸出物	茶多酚	总黄酮	咖啡碱	可溶性糖	游离氨基酸
C1	28.40±0.89^{c}	28.28±0.18^{a}	1.95±0.04^{a}	3.68±0.11^{a}	4.48±0.02^{c}	2.56±0.03^{a}
C2	29.28±0.09^{c}	27.44±0.11^{b}	1.83±0.04^{a}	3.44±0.09^{b}	4.53±0.05^{c}	2.45±0.05^{a}
C3	32.19±0.15^{b}	22.17±0.11^{d}	1.76±0.04^{a}	3.50±0.03^{b}	4.75±0.02^{a}	2.28±0.02^{c}
C4	34.56±0.37^{a}	23.56±0.03^{c}	1.79±0.08^{a}	3.73±0.08^{a}	4.61±0.04^{b}	2.40±0.03^{b}

2.4　不同加工工艺白茶香气成分分析

4 份白茶供试样中共分析检测出 1172 种香气成分，其中有 408 种具有同分异构体。根据化合物主要官能团的不同将检测到的香气成分分为醛类、萜类、酯类等 15 个大类。为明确不同加工工艺对香气物质组成的整体影响，进一步分析了各类香气成分的相对含量占比。如图 2 所示，尽管具体比例存在差异，但四种工艺制成的白茶其香气物质的主体构成特征基本一致：萜类、酯类、酮类和醇类化合物是相对含量最高的四个类别，共同构成了白茶香气的主体，

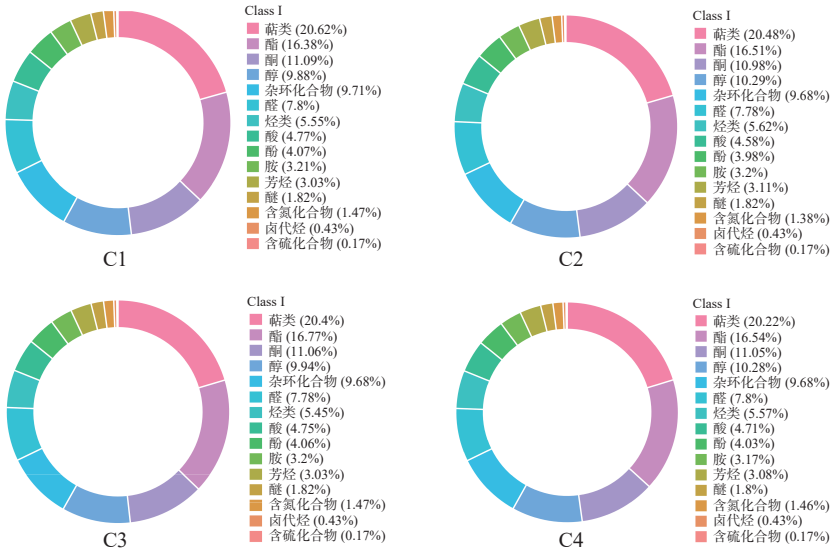


图 2　代谢物类别组成环形图

Fig.2　Circular diagram of metabolite category composition

注：每个颜色代表一种代谢物类别，色块面积表示该类别所占比例的高低。

表 3　不同加工工艺白茶挥发性物质相对含量

Table 3　Relative contents of volatile components in white tea processed by different processing techniques

香气成分	相对含量(μg/g)(n=3)			
	C1	C2	C3	C4
(E)-2-己烯醛	15.27±0.99^{a}	12.65±1.05^{bc}	14.3±0.52^{ab}	12.39±0.61^{c}
苯乙醛	5.35±0.43^{a}	2.64±0.05^{bc}	2.91±0.01^{b}	2.14±0.07^{c}
3-甲基-2-环己烯-1-酮	8.76±0.54^{a}	7.95±0.93^{a}	8.17±0.25^{a}	7.69±0.23^{a}
1-乙基-2,5-吡咯烷二酮	7.38±0.65^{b}	7.83±0.15^{b}	8.96±0.03^{a}	7.16±0.33^{b}
2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮	5.36±0.12^{b}	6.12±0.39^{a}	5.19±0.11^{c}	5.96±0.15^{a}
4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	3.5±0.04^{ab}	3.74±0.15^{ab}	3.3±0.03^{b}	3.83±0.04^{a}
二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮	2.39±0.02^{b}	2.93±0.17^{a}	2.42±0.04^{ab}	2.28±0.05^{b}
2,4-二羟基苯乙酮	2.74±0.11^{a}	2.56±0.02^{a}	2.78±0.04^{a}	2.43±0.06^{a}
异佛尔酮	0.76±0.01^{c}	2.4±0.05^{a}	0.82±0.04^{c}	1.43±0.05^{b}
5-乙酰二氢-2(3H)-呋喃酮	1.12±0.02^{b}	1.47±0.07^{a}	1.37±0.02^{a}	1.35±0.01^{a}
(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二醛	7.33±0.15^{b}	6.87±0.52^{b}	6.85±0.26^{b}	7.70±0.20^{a}
异龙脑	3.6±0.05^{ab}	4.12±0.19^{a}	3.48±0.05^{b}	4.06±0.08^{ab}
L-薄荷酮	1.53±0.01^{b}	1.82±0.04^{a}	1.52±0.01^{b}	1.77±0.01^{ab}
柠檬烯	0.45±0.06^{c}	1.57±0.02^{a}	1.05±0.04^{b}	1.19±0.01^{b}
β-水芹烯	0.36±0.05^{d}	1.25±0.01^{a}	0.81±0.03^{c}	0.95±0.01^{b}
甲基丙基三硫化物	3.41±0.05^{b}	4.46±0.22^{a}	3.32±0.05^{b}	4.37±0.07^{a}
咖啡因	4.8±0.21^{a}	4.08±0.85^{a}	5.7±2.25^{a}	5.73±0.16^{a}
乙烯基吡嗪	6.31±0.65^{a}	3.6±0.11^{bc}	4.35±0.03^{b}	3.47±0.02^{c}
2-己酰呋喃	3.07±0.04^{a}	3.08±0.09^{a}	2.86±0.05^{a}	2.99±0.04^{a}
2-甲基-1,3-二硫戊环	0.3±0.03^{c}	2.46±0.04^{a}	0.29±0.01^{c}	2.02±0.22^{b}
环己烷甲酸	3.7±0.16^{b}	3.57±0.03^{b}	4.56±0.07^{a}	3.25±0.07^{b}
2-甲氧基苯甲酸	2.1±0.07^{a}	1.51±0.01^{b}	1.79±0.02^{b}	1.62±0.06^{b}
2-甲基丁酸-4-甲基戊酯	3.82±0.19^{ab}	2.56±0.05^{c}	4.03±0.04^{a}	3.44±0.05^{b}
2-甲基-3-戊醇	2.3±0.02^{a}	1.89±0.02^{a}	2.17±0.01^{a}	1.76±0.01^{b}
5,7-二甲基十一烷	2.42±0.08^{a}	1.77±0.02^{b}	2.53±0.02^{a}	2.34±0.02^{a}

注：表中物质展示4组不同加工工艺白茶样本前25种挥发性代谢物，同行不同小写字母表示差异显著，P<0.05。

该结果与李永华等[28]、冯花等[32]的研究结果相似。但不同工艺处理下，关键香气成分的相对含量存在显著差异(表 3)。例如，具有青草气的(E)-2-己烯醛俗称青叶醛，其含量表现为 C1 组显著高于 C2 和 C4 组(P<0.05)。这可能是因为室内萎凋(C1)的氧化转化作用较弱，保留了更多的鲜叶青气相关物质[12]。含量次之的 3-甲基-2-环己烯-1-酮具有木质香或焦糖香。其形成途径多样，可能源于脂质氧化、类胡萝卜素降解等。本研究中其含量的差异，或许反映了不同萎凋工艺对脂质氧化路径的影响程度不同[31]。呈现花果香的关键成分(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二醛又称橙花醛，在 C4 摇青白茶中的含量显著最高(P<0.05)，说明摇青工艺能有效促进白茶中花果香物质的生成，与感官审评 C4 香气评分最高相吻合。此外，2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮也称茶香酮具有木质香、清香和果香，其含量 C2、C4>C1>C3(P<0.05)，有助于各供试白茶呈花果香交融的特点[31]。

2.5 不同加工工艺白茶差异挥发性代谢物筛选

采用 PCA 对不同加工工艺白茶挥发性物质进行观察。结果表明，4 组处理样本之间的总体差异明显，样本的 3 次重复被聚类在一起，前 2 个主成分累积贡献度 89.15%(PC1=76.30%，PC2=12.85%)(图 3a)。进一步采用 OPLS-DA 分别对 4 组不同样本的差异成分进行有监督的判别分析。结果表明，C1-C2 传统处理组 OPLS-DA 模型 Q^2 值达 0.998，R^2Y=1(图 3b、3c)；C2-C3 组 OPLS-DA 模型 Q^2 值达 0.997，R^2Y=1(图 3d、3e)；C2-C4 组 OPLS-DA 模型 Q^2 值达 0.981，R^2Y =1(图 3f、3g)；C3-C4 组 OPLS-DA 模型 Q^2 值达 0.993，R^2Y=1(图 3h、3i)说明预测模型稳定可靠，可用此模型筛选差异代谢物。同时以显著差异标准 VIP>1，FC≥2 或 FC≤1/2 筛选差异代谢物，C1vsC2 组筛选出 529 种差异代谢物，C2vsC3 组筛选出 547 种差异代谢物，C2vsC4 组筛选出 116 种差异代谢物，C3vsC4 组筛选出 194 种差异代谢物。各组共有的差异代谢物有 2 种，其一是 4-异丙基环六-1,3-二烯醛，这是一种具有特定化学结构的萜类醛，可能源于茶叶内源性单萜类化合物的氧化降解；其二是丁酸异丙酯，它的产生可能与茶叶的脂质分解密切相关[33](图 3j)。这与吴晴阳等[34]的研究乌龙茶的萎凋和摇青工艺会改变茶叶的香气组成，

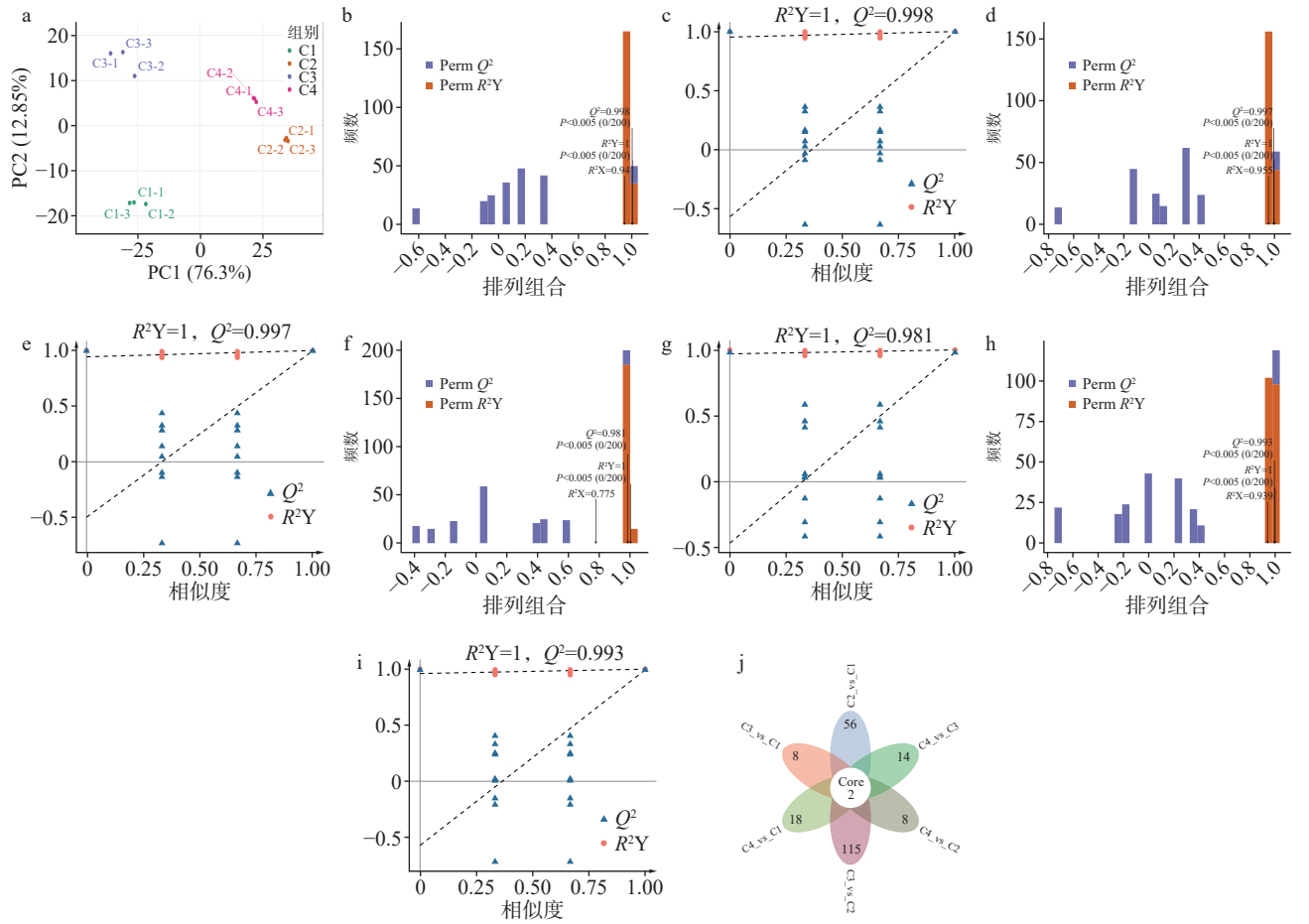


图 3 不同加工工艺白茶差异挥发性代谢物筛选

Fig.3 Screening of differential volatile metabolites in white tea processed by different methods

注：a：各组样品与质控样品质谱数据 PCA 得分图；b、c 分别是 C2 vs C1 挥发性代谢物 OPLS-DA 预测模型验证图和置换检验图；d、e 分别是 C2 vs C3 挥发性代谢物 OPLS-DA 预测模型验证图和置换检验图；f、g 分别是 C2 vs C4 挥发性代谢物 OPLS-DA 预测模型验证图和置换检验图；h、i 分别是 C3 vs C4 挥发性代谢物 OPLS-DA 预测模型验证图和置换检验图；j：差异代谢物维恩图。

特别是促进萜烯类物质的转化和醛类物质的生成相似。

2.6　不同加工工艺白茶差异挥发性代谢物 ROAV 分析

为评估差异代谢物对白茶整体香气的实际贡献，对其进行 ROAV 分析。其中 ROAV>1 的关键香气活性物质 C1 有 242 种，C2 有 221 种，C3 有 240 种，C4 有 228 种，从图 4 可知，四种白茶具有高 ROAV 的化合物相似，相关研究[35] 表明，在一定范围内，OAV 越大说明该香气成分对总体风味贡献越大。四组处理中对香气贡献最大的物质均为二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮，其具有焦糖香和甜香的特征，对茶叶的香气品质有重要贡献[36]。其次为(E)-β-大马酮具有浓郁的花果香和甜香，是 β-胡萝卜素的降解产物[37]，其 ROAV C3>C4>C1>C2，表明轻揉和摇青工艺有利于提升其对白茶花果香风格的贡献。具有花香的反式玫瑰氧化物[38] 在 C4 摇青处理的白茶中含量最高，与感官审评结果摇青白茶的香气清香带花香相吻合(表 4)。

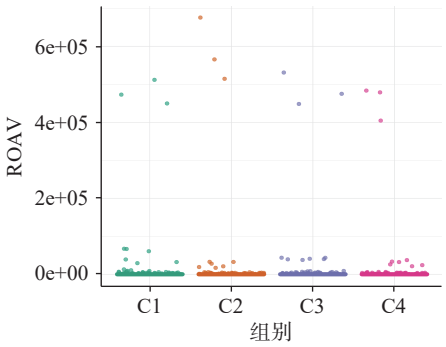


图 4　差异挥发性代谢物 ROAV 散点图

Fig.4　Scatter plot of relative odor activity values (ROAV) of differential volatile metabolites

表 4　不同加工工艺白茶差异挥发性代谢物 ROAV 分析

Table 4　Analysis of relative odor activity values (ROAV) of differential volatile metabolites in white tea processed by different methods

化合物名称	物质一级分类	香气类型描述	阈值[39−41] (μg/g)	C1	C2	C3	C4
二氢-2-甲基-3(2H)-呋喃酮	酮	焦糖香、甜香、坚果香	5.00×10^{-6}	4.78×10^{5}	5.85×10^{5}	4.85×10^{5}	4.56×10^{5}
4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	酮	甜香、草莓香	1.00×10^{-3}	3.50×10^{3}	3.74×10^{3}	3.30×10^{3}	3.83×10^{3}
3-辛烯-2-酮	酮	草本香	3.00×10^{-5}	6.08×10^{3}	3.13×10^{3}	6.26×10^{3}	3.85×1^{3}
2,6,6-三甲基-2-环己烯-1,4-二酮	酮	甜香、茶香	2.50×10^{-2}	2.15×10^{2}	2.45×10^{2}	2.07×10^{2}	2.38×10^{2}
异佛尔酮	酮	木质香、果香	1.10×10^{-2}	6.87×10^{1}	2.18×10^{2}	7.41×10^{1}	1.30×10^{2}
(E)-β-大马酮	萜类	花香、果香	2.00×10^{-6}	3.35×10^{4}	3.11×10^{4}	4.02×10^{4}	3.43×10^{4}
异龙脑	萜类	草本香、木质香	8.50×10^{-3}	4.24×10^{2}	4.85×10^{2}	4.10×10^{2}	4.77×10^{2}
(2S-顺式)-四氢化-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃	萜类	花香	2.00×10^{-4}	1.05×10^{2}	3.64×10^{2}	1.11×10^{2}	2.22×10^{2}
2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-甲醛	萜类	甜香、花香、果香	3.00×10^{-3}	4.83×10^{2}	3.17×10^{2}	3.90×10^{2}	3.43×10^{2}
柠檬烯	萜类	柑橘香、草本香	1.00×10^{-2}	4.50×10^{1}	1.57×10^{2}	1.05×10^{2}	1.19×10^{2}
反式玫瑰氧化物	萜类	花香	5.00×10^{-4}	4.20×10^{1}	1.46×10^{2}	4.43×10^{2}	8.87×10^{2}
大根香叶烯D	萜类	辛香、木质香	1.20×10^{-3}	1.70×10^{2}	1.25×10^{2}	1.48×10^{2}	1.33×10^{2}
(E,Z)-2,6-壬二烯醛	醛	黄瓜、清香	1.00×10^{-5}	1.08×10^{4}	5.43×10^{3}	8.25×10^{3}	6.05×10^{3}
(E)-2-己烯醛	醛	青草气	3.10×10^{-3}	4.93×10^{3}	4.08×10^{3}	4.61×10^{3}	4.00×10^{3}
8-壬烯醛	醛	青草香	2.00×10^{-4}	5.06×10^{3}	3.65×10^{3}	4.12×10^{3}	3.65×10^{3}
(Z)-4-庚烯醛	醛	清香、奶香	2.50×10^{-5}	7.11×10^{3}	2.81×10^{3}	5.26×10^{3}	3.21×10^{3}
(E)-2-壬烯醛	醛	黄瓜、柑橘香	8.00×10^{-5}	3.05×10^{3}	1.87×10^{3}	3.68×10^{3}	2.33×10^{3}
2-壬烯醛	醛	清香、柠檬香	1.00×10^{-4}	1.16×10^{3}	1.08×10^{3}	1.08×10^{3}	1.08×10^{3}
2-己烯醛	醛	甜香、果香	1.70×10^{-2}	8.96×10^{2}	7.41×10^{2}	8.39×10^{2}	7.27×10^{2}
苯乙醛	醛	花香	6.30×10^{-3}	8.48×10^{2}	4.19×10^{2}	4.62×10^{2}	3.40×10^{2}
4-甲氧基苯甲醛	醛	甜香、花香	2.00×10^{-4}	2.65×10^{2}	2.35×10^{2}	2.40×10^{2}	2.16×10^{2}
3-甲氧基-2,5-二甲基吡嗪	杂环化合物	坚果香、烘烤香	1.00×10^{-4}	1.87×10^{3}	1.22×10^{3}	1.38×10^{3}	1.17×10^{3}
(R)-5,6,7,7a-四氢-4,4,7a-三甲基-2(4H)苯并呋喃酮	酯	麝香、木质香	2.10×10^{-3}	3.97×10^{2}	3.74×10^{2}	3.94×10^{2}	3.48×10^{2}
3-甲基丁酸乙酯	酯	果香	1.00×10^{-4}	2.79×10^{2}	2.44×10^{2}	2.83×10^{2}	2.48×10^{2}
对甲酚	酚	水仙香	2.40×10^{-4}	2.90×10^{2}	1.59×10^{2}	2.56×10^{2}	2.14×10^{2}

注：表中物质ROAV展示4组不同加工工艺白茶样本前25种挥发性代谢物。

3　结论

本研究系统分析了轻揉与摇青两种创新工艺对初夏福鼎大白茶品质的影响。结果表明，与传统工艺相比，创新工艺能显著改善白茶的感官品质并优化其风味物质基础。感官审评表明，轻揉工艺使茶叶形成条索微弯、芽叶微卷的独特外形，区别于传统工艺的自然舒展形态。在香气方面，C3 与 C4 样品均表现出花香清高、持久的特征。在滋味上，二者也更为甘醇爽口。这些感官品质的提升，源于轻揉与摇青工艺对茶叶细胞结构的适度破坏。这些感官上的变化与

茶叶中的内含物质含量变化紧密相关，生化成分测定结果表明 C3 和 C4 的水浸出物与可溶性糖含量显著提升，而茶多酚和游离氨基酸含量则因氧化转化等作用显著降低。这些变化，共同推动了白茶滋味从传统风格的鲜爽向创新风格的甘醇转变。挥发性成分分析表明，不同工艺白茶的香气物质种类相似，但关键香气活性成分的相对含量（ROAV）差异显著。摇青工艺（C4）能有效降低具有青草气的（E）-2-己烯醛的贡献度，同时大幅提升多种花果香成分如（E）-β-大马酮、反式玫瑰氧化物的贡献度，从而使摇青白茶呈现出花香清高持久的特征。综上所述，在传统白茶加工中引入轻揉或摇青工艺，能有效制作出花香清高、滋味甘醇的新工艺白茶。本研究为通过工艺创新调整白茶风味，特别是为进一步开发利用初夏福鼎白茶茶青资源，提供了可靠的理论依据与实践技术参考。

© The Author(s) 2026. 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］ 危赛明. 白茶的产品特征与新的工艺创始[J]. 中国茶叶加工, 2019(4): 85−86. ［WEI S M. Product characteristics of white tea and the founding of new technology[J]. China Tea Processing, 2019(4): 85−86.］

［2］ 林宏政, 李鑫磊, 周泳锋, 等. 白茶散茶与茶饼在色泽、滋味及香气组分上的差异研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(15): 207−214. ［LIN Hongzheng, LI Xinlei, ZHOU Yongfeng, et al. Study on the differences of color, taste and aroma constituents in white loose tea and white tea pine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(15): 207−214.］

［3］ 武珊珊, 尤名南, 潘朦, 等. 白茶香气成分及影响因素研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 1−14. ［WU Shanshan, YOU Mingnan, PAN Meng, et al. Advance in aroma components and influencing factors of white tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 1−14.］

［4］ MA C Q, MA B S, WANG J C, et al. Geographical origin identification of Chinese white teas, and their differences in tastes, chemical compositions and antioxidant activities among three production regions[J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100504.

［5］ CHEN Qincao, ZHU Yin, DAI Weidong, et al. Aroma formation and dynamic changes during white tea processing[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 915−924.

［6］ 陈林, 吉克温. 茶叶造型与品质关系研究进展[J]. 福建茶叶, 2000, 22(1): 2−4. ［CHEN L, JI K W. Research progress on the relationship between tea shaping and quality[J]. Fujian Tea, 2000, 22(1): 2−4.］

［7］ 周有良. 萎凋、造型工艺对白茶化学成分含量及品质的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2010. ［ZHOU Y L. The influence of withering and shaping processes on the chemical composition and quality of white tea[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.］

［8］ 詹冬梅, 傅海峰, 周承哲, 等. 贮藏年份及压饼方式对寿眉风味品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 81−89. ［ZHAN Dongmei, FU Haifeng, ZHOU Chengzhe, et al. Effect of storage years and pressing methods on the flavor quality of Shoumei[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(5): 81−89.］

［9］ 吴英华. 采用新工艺生产白茶的初制特点[J]. 福建茶叶, 1989, 11(1): 35−36. ［WU Y H. Characteristics of initial processing of white tea produced by new technology[J]. Fujian Tea, 1989, 11(1): 35−36.］

［10］ 王飞权, 冯花, 朱晓燕, 等. 摇青和揉捻工艺对白茶生化成分和感官品质的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2236−2245. ［WANG Feiquan, FENG Hua, ZHU Xiaoyan, et al. Effects of rolling and rocking green on the sensory quality and biochemical components of white tea[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(11): 2236−2245.］

［11］ GUO A, FENG H, JING P, et al. White tea: A review on composition characteristics, extraction techniques, and application potentials[J]. Journal of Tea Science Research, 2024, 14(1): 19−43.

［12］ 陈作毅, 黄景芳, 黄彩妙. 新工艺白茶的分类、制作工艺与感官指标研究[J]. 中国食品工业, 2025(8): 117−119. ［CHEN Z Y, HUANG J F, HUANG C M. Research on the classification, production process, and sensory indicators of new craft white tea[J]. China Food Industry, 2025(8): 117−119.］

［13］ 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 茶叶感官审评方法: GB/T 23776-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. ［Standardization Administration of the People's Republic of China. Method for sensory evaluation of tea: GB/T 23776-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.］

［14］ 苏冰霞. 一种茶叶水浸出物测定仪器及其检测方法. CN201711193093.4[P]. 2020-06-23. ［SU B X. Device and detection method for determining water-soluble extractives in tea. CN201711193093.4[P]. 2020-06-23.］

［15］ 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 茶 游离氨基酸总量的测定: GB/T 8314-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. ［Standardization Administration of the People's Republic of China. Tea—Determination of free amino acids content: GB/T 8314-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.］

［16］ 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 茶 咖啡碱测定: GB/T 8312-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. ［Standardization Administration of the People's Republic of China. Tea—Determination of caffeine content: GB/T 8312-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.］

［17］ 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法: GB/T 8313-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. ［Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of total polyphenols and catechins content in tea: GB/T 8313-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.］

［18］ 李楠, 杨欣, 孙元琳, 等. 20 种花茶黄酮、总酚及抗氧化活性分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(18): 34−39. ［LI Nan, YANG Xin, SUN Yuanlin, et al. Flavones, total polyphenols and *in vitro* antioxidant activity in twenty kinds of herbal teas[J]. Food Research and Development, 2021, 42(18): 34−39.］

［19］ 苏云婷, 潘世会. 无花果可溶性糖含量测定[J]. 食品安全导刊, 2024(13): 104−107. ［SU Yunting, PAN Shihui. Method for determination of soluble sugar content in fig[J]. China Food Safety Magazine, 2024(13): 104−107.］

［20］ YUAN Honglun, CAO Guangping, HOU Xiaodong, et al. Development of a widely targeted volatilomics method for profiling volatilomes in plants[J]. Molecular Plant, 2022, 15(1): 189−202.
［21］ YUAN Honglun, JIANGFANG Y, LIU Zhenhuan, et al. $WTV_{2.0}$: A high-coverage plant volatilomics method with a comprehensive selective ion monitoring acquisition mode[J]. Molecular Plant, 2024, 17(6): 972−985.
［22］ FANG Xin, XU Wencan, JIANG Guangxian, et al. Monitoring the dynamic changes in aroma during the whole processing of Qingzhuan tea at an industrial scale: From fresh leaves to finished tea[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 137810.
［23］ HUANG Wenjing, FANG Shimao, WANG Jing, et al. Sensomics analysis of the effect of the withering method on the aroma components of Keemun black tea[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133549.
［24］ XUE Jinjin, LIU Panpan, YIN Junfeng, et al. Dynamic changes in volatile compounds of Shaken black tea during its manufacture by GC×GC–TOFMS and multivariate data analysis[J]. Foods, 2022, 11(9): 1228.
［25］ 孔亚帅, 陈凌芝, 王晶晶, 等. 揉捻工艺在白茶加工过程中的应用初探[J]. 农业与技术, 2024, 44(1): 15−18. ［KONG Y S, CHEN L Z, WANG J J, et al. Preliminary study on the application of rolling technology in the white tea processing[J]. Agriculture and Technology, 2024, 44(1): 15−18.］
［26］ 陈艺婷. 安溪铁观音传统制作工艺技术探索[J]. 福建茶叶, 2023, 45(4): 27−28. ［CHEN Y T. Exploration of traditional production techniques for Anxi Tieguanyin[J]. Tea in Fujian, 2023, 45(4): 27−28.］
［27］ 占鑫怡, 杨云, 陈彬, 等. 不同摇青程度春闺闽北乌龙茶品质差异分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 271−279. ［ZHAN Xinyi, YANG Yun, CHEN Bin, et al. Difference analysis of major quality components in different turning over intensities of Chungui oolong tea in northern Fujian[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 271−279.］
［28］ 李永华, 吴鹏, 徐建寒, 等. 真空与摇青对陇南白茶风味物质基础的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 189−197. ［LI Yonghua, WU Peng, XU Jianhan, et al. Effects of vacuum and shaking on flavor substances of Longnan white tea[J]. Food Science, 2025, 46(8): 189−197.］
［29］ 莫晓丽, 成晨, 曾雯, 等. 连续慢速做青过程中乌龙茶主要化学成分的变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 67−77. ［MO Xiaoli, CHENG Chen, ZENG Wen, et al. Changes in the major chemical constituents of oolong tea under continuous low-speed green-making process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 67−77.］
［30］ 陈仕斌. 不同萎凋工艺对政和白茶的生化成分及品质影响[J]. 广东茶业, 2024(3): 12−16. ［CHEN S B. Effects of different withering processes on the biochemical components and quality of Zhenghe white tea[J]. Guangdong Tea Industry, 2024(3): 12−16.］
［31］ 刘菲, 孙威江. 白茶品质研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(10): 365−368. ［LIU Fei, SUN Weijiang. Research progress in quality of the white tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(10): 365−368.］
［32］ 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 Hua, WANG Feiquan, ZHANG Bo, et al. Analysis of aroma components of baimudan tea from different tea plant varieties using HS-SPME-GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 252−264,251.］
［33］ YANG Ziyin, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 585−599.
［34］ 吴晴阳, 周子维, 杨云, 等. 乌龙茶加工过程中(Z)-3-己烯醛与(E)-2-己烯醛转化关键调控基因的筛选与表达分析[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 205−212. ［WU Qingyang, ZHOU Ziwei, YANG Yun, et al. Screening and expression analysis of key regulator genes associated with(Z)-3-hexenal and(E)-2-hexenal transformation during manufacturing process of oolong tea[J]. Food Science, 2023, 44(16): 205−212.］
［35］ 陈芝飞, 蔡莉莉, 郝辉, 等. 香气活力值在食品关键香气成分表征中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 329−335. ［CHEN Zhifei, CAI Lili, HAO Hui, et al. Progress in the application of odor activity values in the characterization of key aroma components in foods[J]. Food Science, 2018, 39(19): 329−335.］
［36］ CHEN Yongxian, GUO Xiangyang, GAO Ting, et al. UGT74AF3 enzymes specifically catalyze the glucosylation of 4-hydroxy-2, 5-dimethylfuran-3(2H)-one, an important volatile compound in *Camellia sinensis*[J]. Horticulture Research, 2020, 7: 25.
［37］ 陈丽, 叶玉龙, 王春燕, 等. 茶叶中类胡萝卜素香气前体研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 266−273. ［CHEN Li, YE Yulong, WANG Chunyan, et al. Research progress on carotenoid aroma precursors in tea[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 266−273.］
［38］ 舒心, 高彦祥. 茶叶挥发性成分提取及其香气特征分析研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 469−480. ［SHU Xin, GAO Yanxiang. Research progress on extraction of volatile compounds and analysis of aroma characteristics in tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(15): 469−480.］
［39］ ZHU Jiancai, NIU Yunwei, XIAO Zuobing. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS)[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128136.
［40］ YANG Yijin, AI Lianzhong, MU Zhiyong, et al. Flavor compounds with high odor activity values (OAV>1) dominate the aroma of aged Chinese rice wine (Huangjiu) by molecular association[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132370.
［41］ 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.］