刘盼盼, 林馥茗, 张倩, 等. 不同干燥方式对坦洋工夫红茶风味品质形成的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 235−244. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050247

LIU Panpan, LIN Fuming, ZHANG Qian, et al. Effects of Different Drying Methods on the Flavor Quality Formation of Tanyang Congou Black Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 235−244. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050247

· 工艺技术 ·

不同干燥方式对坦洋工夫红茶风味品质形成的影响

刘盼盼[1], 林馥茗[2,*], 张　倩[1], 张　帆[3], 吴彩焱[4], 孙威江[1,*]

（1.福建农林大学园艺学院, 福建福州 350002;
2.福建农林大学安溪茶学院（数字经济学院）, 福建泉州 362400;
3.福建新坦洋茶业集团股份有限公司, 福建福安 355000;
4.福建基茶生物科技有限公司, 福建厦门 361000）

摘　要: 为探究不同干燥方式对坦洋工夫红茶品质的影响，本研究采用真空冷冻干燥（FD）、热风干燥（HD）、热风-真空冷冻联合干燥（HFD）、真空冷冻-热风联合干燥（FHD）及微波干燥五种干燥（MD）工艺进行加工，并通过感官审评、理化成分测定和香气物质检测结合化学计量学方法分析对五个干燥茶样进行比较。结果表明，坦洋工夫红茶整体上以甜花香为主，滋味以甜醇为主，其中真空冷冻-热风联合干燥茶样滋味醇正甜爽，甜花香显，感官总分（90.90 分）最高。不同干燥茶样的品质成分有较大差异，真空冷冻干燥处理有利于提高茶样的茶红素含量（3.08%）；真空冷冻-热风联合干燥处理茶样的游离氨基酸（6.69%）和茶多酚（12.28%）含量显著高于其他组（P<0.05）；热风-真空冷冻联合干燥处理茶样的水浸出物（38.23%）含量最高；热风干燥处理茶样的可溶性糖（44.34 mg/g）为其甜醇的滋味特征形成做出贡献；微波干燥处理最大程度保留了茶样的黄酮物质（24.61 mg/g）。5 个茶样共检测出 99 种香气物质，主要包括醛类、酯类和醇类。FD 茶样具有独特的青草香和花香特征，主要贡献物质是正己醛（OAV=33.51）、芳樟醇（OAV=75.45）和香叶醇（OAV=239.77）；HD 处理茶样的甜香和蜜香特征与异戊醛（OAV=254.73）和苯乙醛（OAV=41.44）的富集相关；香叶醇（OAV=210.22）是 FHD 处理的特征性香气物质；香叶醇（OAV=130.04）和异戊醛（OAV=122.23）是 HFD 的主要赋香成分；壬醛（OAV=71.89）是 MD 处理的关键香气成分。本研究系统阐明了不同干燥工艺对坦洋工夫红茶品质的影响，为优化红茶加工工艺提供了理论依据。

关键词: 红茶, 干燥工艺, 感官品质, 挥发性成分, 香气活度值

中图分类号: TS272.5　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0235−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050247　　本文网刊:

Effects of Different Drying Methods on the Flavor Quality Formation of Tanyang Congou Black Tea

LIU Panpan[1], LIN Fuming[2,*], ZHANG Qian[1], ZHANG Fan[3], WU Caiyan[4], SUN Weijiang[1,*]

（1.College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
2.Anxi College of Tea Science (College of Digital Economy), Fujian Agriculture and Forestry University, Quanzhou 362400, China;
3.Fujian Xintanyang Tea Group Co., Ltd., Fu'an 355000, China;

收稿日期: 2025−05−26

基金项目: 红茶不同烘干技术与配套工艺研究与应用（福建省红茶企业工程技术研究中心）（2022L302）; 植物保护一流培优学科群经费（725025010B）。

作者简介: 刘盼盼（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶加工与品质化学, E-mail: lpp0591@163.com。

*** 通信作者:** 林馥茗（1984−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 茶叶审评与品质调控, E-mail: linfm529@126.com。
孙威江（1964−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 茶树种质资源、茶叶品质化学与标准化, E-mail: swj8103@126.com。

4.Fujian Jicha Biotechnology Co., Ltd., Xiamen 361000, China）

Abstract: To investigate the effects of different drying methods on the quality of Tanyang Gongfu black tea, five drying processes were employed in this study: Vacuum-freeze drying (FD), hot-air drying (HD), hot-air-vacuum-freeze combined drying (HFD), vacuum-freeze-hot-air combined drying (FHD), and microwave drying (MD). The five dried tea samples were compared by combining sensory evaluation, physicochemical component determination, aroma compound detection, and chemometric analysis. The results indicated that the Tanyang Gongfu black tea was characterized mainly by sweet floral aroma and sweet mellow taste. Among them, the FHD sample was characterized by a pure, sweet, refreshing taste and a pronounced sweet floral aroma, achieving the highest sensory score (90.90 points). Significant differences were observed in the quality components of the tea samples subjected to different drying methods. FD treatment was found to be conducive to increasing the thearubigins content (3.08%). The free amino acid (6.69%) and tea polyphenol (12.28%) contents in the FHD sample were significantly higher than those in the other groups (P<0.05). The highest water extract content (38.23%) was found in the HFD sample. Soluble sugars (44.34 mg/g) in the HD sample were found to contribute to its sweet mellow taste characteristic. Flavonoids were maximally retained (24.61 mg/g) in the MD sample. A total of 99 aroma compounds were detected in the five tea samples, mainly including aldehydes, esters, and alcohols. The FD sample possessed unique grassy and floral characteristics, mainly contributed by hexanal (OAV=33.51), linalool (OAV=75.45), and geraniol (OAV=239.77). The sweet and honey-like aroma characteristics of the HD sample were associated with the enrichment of isovaleraldehyde (OAV=254.73) and phenylacetaldehyde (OAV=41.44). Geraniol (OAV=210.22) was identified as the characteristic aroma compound for the FHD treatment. Geraniol (OAV=130.04) and isovaleraldehyde (OAV=122.23) were determined to be the main aroma-contributing components for HFD. Nonanal (OAV=71.89) was identified as the key aroma component for MD treatment. This study systematically elucidated the influence of different drying processes on the quality of Tanyang Gongfu black tea, providing a theoretical basis for optimizing black tea processing technology.

Key words: black tea; drying techniques; sensory quality; volatile compounds; odor activity value (OAV)

红茶属于全发酵茶[1]，按照制作方法可分为小种红茶、工夫红茶和红碎茶三类[2]。红茶销量占全球茶叶销量的 80% 左右，在各茶类中处于领先地位，主要销往部分亚洲国家及西方国家，而在我国红茶是第二大销量的茶叶品类[3−4]。花果香型红茶具有“紧结壮实”“橙红明亮”“花香果味”的卓越品质[5]，广受消费者好评。干燥是茶叶形成良好品质的重要加工环节之一，其核心作用在于快速降低茶叶含水率，同时钝化酶活性，制止酶促氧化过程，促进茶叶内含物质的转化与稳定。这一过程不仅显著提升了茶叶的贮藏稳定性，更重要的是通过调控干燥工艺参数，能够定向优化茶叶的感官品质和功能成分[6]。

现有研究表明，不同干燥方式对茶叶理化成分和香气特征具有显著调控作用。Jin 等[7] 比较喷雾干燥与冷冻干燥对速溶茶香气的影响，发现冷冻干燥能有效保留花果香类化合物；Qu 等[8] 的研究则表明微波干燥工艺可显著提高红茶中茶多酚、儿茶素及茶黄素含量。苏丹等[9] 系统综述了联合干燥技术在农产品加工中的应用，指出其在品质保持和能效提升方面的优势。魏昊等[10] 通过分析 4 种干燥方式对金牡丹工夫红茶香气的影响，证实不同干燥工艺会导致香气成分组成及含量的显著差异。王婷婷等[11] 的研究进一步揭示，热风干燥和冷冻干燥等工艺更有利于芳樟醇及其氧化物、香叶醇等关键香气物质的保留，从而促进红茶特征性花果香和甜香风味的形成。这些研究为红茶干燥工艺的优化提供了重要理论依据。

现有研究虽已探讨不同干燥工艺对红茶品质的影响，但未对坦洋工夫红茶干燥方式与品质进行系统研究，本研究针对红茶干燥工艺优化问题，在现有研究基础上进行系统性拓展，采用五种干燥工艺：真空冷冻干燥（FD）、热风干燥（HD）、热风-真空冷冻联合干燥（HFD）、真空冷冻-热风联合干燥（FHD）以及微波干燥（MD），通过多维度评价体系，系统探究不同干燥方式对坦洋工夫红茶感官品质（包括滋味与香气特征）的综合影响，以期为提高红茶干燥效率和品质提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红茶　选取福建省宁德市福安市坦洋村‘金牡丹’为原料，采摘一芽二三叶，于 2024 年 5 月在新坦洋集团的茶叶加工厂按照花果香红茶的工艺制成；儿茶素标准品、生物碱标准品　购自美国 Sigma-AlFHDich 公司；福林酚、茚三酮、碳酸钠、无水乙醇、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、氯化亚锡、浓硫酸、盐酸、乙酸乙酯、正丁醇、无水草酸、碳酸氢钠　分析纯 购自国药集团化学试剂有限公司；植物可溶性糖试剂盒　购自南京建成科技有限公司；甲醇、乙腈、冰乙酸　色谱纯，购自德国默克公司；芦丁（色谱纯）　购自源叶生物技术有限公司。

MA150 电子天平、MA150 水分测定仪　购自德国 Sartorius 公司；HWS24 型电热恒温水浴锅　购自上海一恒科学仪器有限公司；Infinite M200 PRO 多功能酶标仪　购自奥地利 Tecan 集团公司；Waters 2695 高效液相色谱、2998 PDA 检测器、X-select-T3 色谱柱（4.6 mm×250 mm×5 μm）　购自美

国 Waters 公司；SHB-II 循环水式多用真空泵　郑州长城科工贸有限公司；ZF-1㎡真空冷冻干燥机　购自诸城市盛世众发智能装备有限公司；定制款茶叶烘干机　购自厦门市同安裕能铁器加工厂；GFL-230 烤箱　购自天津市莱玻瑞仪器有限公司；TDZ5B-WS 台式多管架离心机　购自上海卢湘仪仪器有限公司；G70F20CN1L-FD（W0）微波炉　购自广州格兰仕集团有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　加工流程：鲜叶→萎凋（10~14 h）→摇青（40 min）→揉捻（1 h）→发酵（3~5 h，温度 30~35 ℃，相对湿度在 80%~95%）→干燥（茶样含水率降至 5% 左右）。具体干燥参数如表 1 所示。在真空冷冻干燥过程中，解析干燥阶段的温度（隔板温度）设定为 90 ℃，该条件有助于降低干燥能耗[12]，红茶香气与滋味物质的充分激发。若温度偏低，则茶叶青味较重，影响其整体风味品质。

表 1　不同干燥工艺具体参数

Table 1　Specific parameters of different drying techniques

干燥方式	干燥条件
真空冷冻干燥（FD）	真空压范围70~110 Pa、解析干燥温度90 ℃
真空冷冻-热风联合干燥（FHD）	真空冷冻解析干燥30 min，热风70 ℃至足干
热风-真空冷冻联合干燥（HFD）	热风70 ℃、30 min-真空冷冻干燥（FD）至足干
微波干燥（MD）	功率P80、投叶量220 g、加热间隔2 min
热风干燥（HD）	80 ℃足干

1.2.2　感官审评　本次红茶感官审评严格依据国家标准 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》，由 3 位国家级评茶师在标准环境下对茶样进行专业评定。采用 3.0 g 茶样沸水冲泡 5 min 的标准化流程，综合得分=外形×25%+汤色×10%+香气×25%+滋味×30%+叶底×10%，最后计算均分作为品质总分。审评过程规范、数据可靠，结果具有权威性和可重复性。

1.2.3　生化成分测定　茶叶水浸出物含量测定按照 GB/T 8305-2013《茶水浸出物测定》进行；游离氨基酸含量测定采用 GB/T 8314-2013《茶游离氨基酸总量测定》；茶多酚和儿茶素含量测定按照 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》相应方法进行；可溶性糖含量测定采用可溶性糖试剂盒进行；茶红素、茶褐素含量的测定参照 NY/T 3675-2020《红茶中茶红素和茶褐素含量的测定 分光光度法》；茶黄素含量测定参照 GB/T 30483-2015《茶叶中茶黄素的测定 高效液相色谱法》；黄酮采用三氯化铝比色法测定；咖啡碱检测参照 GB/T 8312-2013《茶咖啡碱测定》。

1.2.4　挥发性香气成分检测

1.2.4.1　样品处理　精确称取 0.5 g 茶粉于 20 mL 进样瓶中，分别加入 3 mL 60 ℃ 的水和 20 μL 的内标癸酸乙酯（质量浓度为 8.63 μg/mL），振荡 15 s 后，先 60 ℃ 平衡 15 min，再推出已老化的萃取头吸附 45 min，吸附结束后，将萃取头插入气相色谱仪的进样口，在 250 ℃ 下热解析 5 min。每个样品进行 3 次重复实验。

1.2.4.2　气相色谱（GC）条件　载气为高纯氦气（纯度≥99.999%），采用恒流模式，流速 1.0 mL·min^{-1}，不分流进样，进样口温度 250 ℃。色谱柱升温程序设置为：初始温度 35 ℃ 保持 2 min，以 5 ℃·min^{-1} 升至 210 ℃ 保持 3 min，再以 10 ℃·min^{-1} 升至 250 ℃ 保持 1 min。

1.2.4.3　质谱（MS）条件：　电离模式为电子轰击离子源（EI），电离能量 70 eV，离子源、质谱接口温度分别为 230、250 ℃，扫描范围 40~500 m/z。

1.2.4.4　挥发性物质定性定量分析　对气相色谱/质谱联用测得红茶样本挥发性有机物的总离子色谱图，经标准谱图（NIST08 和 NIST08 s）检索匹配，同时根据正构烷烃出峰时间来计算各挥发物保留指数并通过查阅文献，对挥发物的化学结构、名称等进行进一步的定性。用内标癸酸乙酯定量各挥发性组分，定量计算公式如下：

$$X_i = \frac{I_i C_s}{I_s}$$

式中：X_i 为待测样品中化合物 i 的质量分数（μg/kg）；I_i 为待测样品中化合物 i 的峰面积；C_s 为内标物（癸酸乙酯）质量浓度（μg/kg）；I_s 为内标物（癸酸乙酯）的峰面积。

1.2.4.5　气味活度值（OAV）计算　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，近几年 OAV 被越来越多的学者应用于确定各类食品中的关键风味化合物。一般来说 OAV≥1，表明该化合物对样品风味有直接的贡献。其计算公式如下：

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

式中：OAV_i 为化合物 i 的气味活度值；C_i 为化合物的质量分数（μg/kg）；T_i 为化合物的阈值（Threshold，μg/kg）。

1.3　数据处理

采用 Microsoft Excel 2022 进行基础数据统计，SPSS 25 进行单因素方差分析，SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares-discrimination analysis，OPLS DA），GraphPad Prism8.0 绘制柱形图。

2　结果与分析

2.1　不同干燥方式的红茶感官审评分析

通过对五种不同干燥工艺（FD、FHD、HFD、MD、HD）红茶样品的感官品质分析，各工艺在外形、

表 2 不同干燥茶样感官审评结果

Table 2 Sensory evaluation results of tea samples processed with different drying methods

工艺	外形(25%)		汤色(10%)		香气(25%)		滋味(30%)		叶底(10%)		总分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
FD	棕黄较紧结尚显金毫	87.00	橙红较亮	90.00	甜花香较显	92.50	甜醇带水中香	93.00	黄褐较亮舒展	89.00	90.68
FHD	乌润细紧, 较显金毫	89.00	橙黄较亮	92.50	甜花香较显	92.00	醇正甜爽	92.50	软亮较匀齐	86.50	90.90
HFD	条索紧结, 色泽乌润	87.00	橙黄亮	92.00	甜花香显	93.00	甜醇鲜爽	92.50	较软亮匀齐	86.00	90.55
MD	紧结乌润	88.00	黄稍深	89.00	甜花香显	92.50	甜醇鲜爽	92.50	较匀齐软亮	88.00	90.58
HD	色泽乌润, 条索紧结, 匀亮较匀整	86.00	橙黄亮	90.00	甜香较显	90.00	醇和	91.00	较软亮	86.50	88.95

汤色、香气、滋味和叶底方面均呈现显著差异, 审评结果见表 2。综合评分显示, FHD 工艺茶样感官得分以 90.90 分位列第一, 其外形乌润细紧、汤色橙黄明亮、滋味甜醇滑爽的表现最为均衡; FD 工艺茶样虽在滋味浓郁度(93 分)和叶底品质(89 分)上表现突出, 但外形、色泽稍逊; MD 工艺茶样香气表现优异但汤色偏深; HFD 工艺茶样香气强度最佳; 而 HD 工艺茶样因香气和滋味相对淡薄, 总分最低(88.95 分)。综合结果表明, 联合干燥工艺(FHD/HFD)能更好地兼顾茶叶的外形与内质, 其中 FHD 工艺茶样的感官综合品质最优。

2.2 不同干燥茶样理化成分分析

2.2.1 不同干燥茶样主要生化成分分析 水浸出物含量是评价茶叶品质的重要指标之一, 通常与茶叶品质呈正相关[13], 如图 1A 所示, 不同干燥工艺处理茶样的水浸出物含量存在显著差异。其中, HFD 茶样的水浸出物含量最高, 达到 38.23%, 表明该工艺能较好地保留茶叶中的可溶性成分; HD 茶样次之, 含量为 37.76%; 而 MD 茶样的水浸出物含量最低, 仅为 34.12%, 这可能与微波加热过程中部分热敏性物质的损失有关[14]。这一结果与感官审评中 HFD 茶样滋味得分较高的表现相一致, 进一步验证了水浸出物含量与茶叶品质的正相关性[13]。

游离氨基酸作为茶叶重要呈味物质, 其含量变化直接影响茶叶的鲜爽品质特征。如图 1B 所示, 五种干燥工艺处理的茶样在游离氨基酸含量上呈现显著差异(P<0.05)。FHD 茶样表现最为突出, 其游离氨基酸总量达 6.69%, 显著高于其他处理组(P<0.05)。这一结果与感官审评中 FHD 茶样“醇正甜爽”的品质特征相吻合, 表明较高的游离氨基酸含量有效提升了茶汤的鲜爽滋味。Yu 等[15] 认为低温有利于氨基酸的保留, FHD 处理前期低温冷冻干燥, 后续温和热风干燥避免了高温对氨基酸的破坏。相比之下, MD 处理茶样的游离氨基酸含量最低(3.80%), 可能是因为微波功率过高使茶叶中蛋白酶等失去活性[1], 或少部分氨基酸与还原糖发生美拉德反应[16]。

茶多酚作为红茶最主要的滋味物质, 其含量

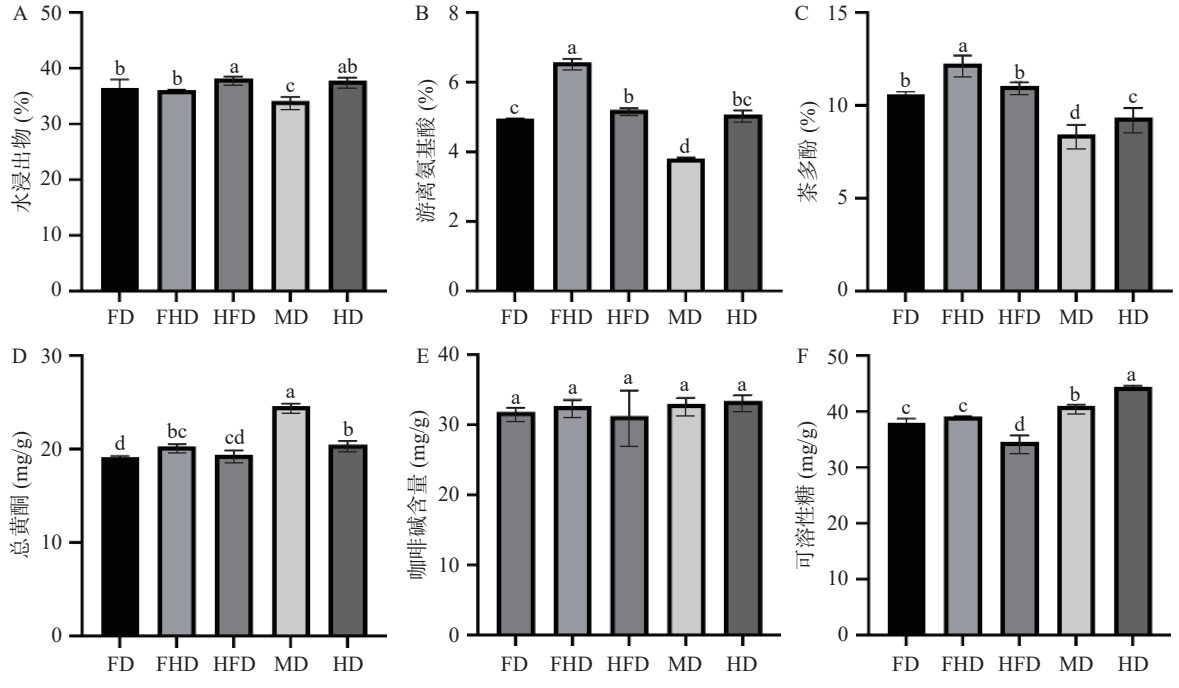


图 1 不同干燥茶样生化成分含量对比

Fig.1 Comparative analysis of biochemical components in differently dried tea samples

注: A: 水浸出物; B: 游离氨基酸; C: 茶多酚; D: 总黄酮; E: 咖啡碱; F: 可溶性糖。不同小写字母代表在 P<0.05 水平差异显著; 图 2、图 3 同。

直接影响茶汤的醇厚度和收敛性特征[17]。不同干燥工艺对茶多酚的保留效果存在显著差异（P<0.05）。如图 1C 所示，FHD 茶样的茶多酚含量最高（12.28%），显著优于其他处理组，HFD（11.04%）茶样和 FD（10.62%）茶样分列二、三位，表明冷冻处理对多酚保护具有积极作用[18]。值得注意的是，MD 茶样的茶多酚含量最低（8.43%），这一结果与 Dong 等[19]关于微波干燥有利于多酚保留的结论相左，可能与金牡丹叶片较厚，微波热传导效率差异有关[20]。

黄酮类化合物作为红茶重要的风味物质，主要由黄酮醇及其糖苷组成，通过与儿茶素、咖啡碱的协同作用影响茶汤的苦涩特征[17]。图 1D 显示不同干燥工艺对黄酮含量的影响呈现显著差异（P<0.05）。MD茶样表现出最高的黄酮含量（24.61 mg/g），HD 茶样次之（20.43 mg/g），FD 茶样黄酮含量最低（19.12 mg/g），黄酮是热敏性物质[21]，干燥温度和时长对其含量产生影响，MD 处理破坏细胞结构，使酶与底物接触更多，加快化学反应速率[22]，刘春菊等[23]在研究干燥方式对黄秋葵花茶品质及体外抗氧化能力的影响时也得到了类似的结果；相比之下 FD 处理在前期通过低温冷冻和真空升华有效避免了热敏性物质的热降解，然而在后期解析干燥阶段，由于需要维持较高温度（90 ℃），反而导致黄酮类物质的整体降解程度较为显著。咖啡碱含量（图 1E）无显著差异，FD、FHD 等工艺因黄酮含量相对较低，减轻了黄酮-咖啡碱复合作用形成的苦涩感，使茶汤滋味更显甜醇，与马敬宜等[24]研究相吻合，即适度降低红茶中黄酮类物质含量有助于减轻茶汤的苦涩味。

茶汤的甜醇滋味特征主要来源于可溶性糖类物质（图 1F），这类成分不仅赋予茶汤甘甜的味感，还能提升汤感的黏稠度，并作为香气前体物质参与茶叶香气的形成[25]。5 个干燥茶样中，HD 茶样（44.34 mg/g）的可溶性糖含量最高，其次是 MD 茶样（40.99 mg/g），HFD 茶样含量最低，与前人研究不同[26]，可能是因为分段干燥影响了水解酶活性，多糖被分解的可能性降低[27–28]。

2.2.2　不同干燥茶样茶色素与儿茶素组分含量分析

茶色素（茶红素、茶黄素和茶褐素）是决定红茶感官品质的关键呈色物质。不同干燥工艺对茶色素组成的影响存在显著差异（P<0.05），如图 2 所示，在茶红素含量方面，FD 茶样表现最为突出（3.08%），显著高于其他处理组（P<0.05），这与其茶汤“橙红较亮”的感官特征相吻合，证实了茶红素对汤色红度和滋味浓度的正向贡献[25]。值得注意的是，其余四种干燥工艺茶样的茶红素含量无统计学差异。茶黄素作为决定汤色亮度和鲜爽度的核心成分，其含量在不同工艺间差异显著：FD 茶样含量最高（2.85%），其次是 HFD 茶样（2.54%），而 MD 茶样最低（0.91%）。与侯炳豪等[29]研究结果相似，即经过冷冻处理的萎凋叶在制作工夫红茶中可以显著提高红茶中茶黄素含量。5 个茶样的茶褐素含量均保持相对稳定。FD 茶样表现出最优的色素配比：较高的茶红素（3.08%）和茶黄素（2.85%）含量与稳定的茶褐素水平共同作用，不仅赋予茶汤明亮的橙红色泽，还提升了滋味的鲜爽度和浓度。这一结果与感官审评中 FD 茶样在汤色（90 分）和滋味（93 分）项的高分表现高度一致。

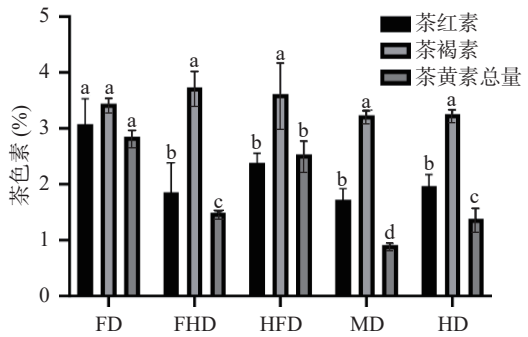


图 2　不同干燥茶样茶色素含量对比

Fig.2　Comparison of tea pigments in different dried teas

儿茶素类化合物作为茶叶关键品质成分，其组成特征直接影响茶汤的滋味属性（表 1）[30]。如表 3 所示，在非酯型儿茶素方面，FD 茶样的儿茶素（C）含量最高，MD茶样最低；EGC 含量则以 MD 茶样（3.82 mg/g）显著高于其他组别（P<0.05），HD 茶样次之（2.11 mg/g）；EC 含量则以 HFD 茶样（5.1 mg/g）居首。酯型儿茶素的分析结果显示，MD 茶样的 EGCG 含量（1.79 mg/g）显著高于其他处理组（P<0.05），而 ECG 含量最低（0.08 mg/g）；HD 茶样（1.6 mg/g）与 FD 茶样（1.57 mg/g）的 ECG 含量与其他处理组有显著差异（P<0.05）。特别值得注意的是，所有工艺处理的茶样均表现出非酯型儿茶素含量显著高于酯型儿茶素的特点，其中 FHD 茶样的非酯型/酯型儿茶素比值最大（13.61:1），这一组成特征与其感官评定的“醇正甜爽、苦涩感低”的品质表现高度吻合[31]。与前人研究较低比值的酯型/非酯型儿茶素构成了红茶滋味醇和、苦涩味较低的品质特点的结论相一致[32]。

表 3　不同干燥茶样儿茶素含量（mg/g）

Table 3　Catechin contents in tea samples processed with different drying methods (mg/g)

干燥工艺	C	EGC	EC	EGCG	ECG
FD	3.28±0.11^{a}	0.91±0.37^{c}	4.5±0.23^{ab}	1.32±0.03^{b}	1.57±0.05^{a}
FHD	2.57±0.09^{b}	1.18±0.46^{c}	3.6±1.07^{b}	0.42±0.06^{d}	0.12±0.03^{c}
HFD	2.39±0.46^{bc}	0.89±0.19^{c}	5.1±0^{a}	1.02±0.27^{c}	1.13±0.2^{b}
MD	0.92±0.04^{d}	3.82±0.21^{a}	4.34±0.4^{ab}	1.79±0.15^{a}	0.08±0^{c}
HD	2.03±0.18^{c}	2.11±0.13^{b}	3.96±0.35^{ab}	1.07±0.06^{bc}	1.6±0.05^{a}

注：表中数值为平均值±标准差，同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

2.3　不同干燥方式加工红茶挥发性物质分析

2.3.1　挥发性物质组分及总量分析　通过对 5 种干燥工艺红茶样品的香气物质分析，如图 3 所示，本研究揭示了不同干燥方式对香气组成特征的显著影响。韦恩图（图 3A）分析表明，各组茶样共检测出

99 种挥发性成分，其中 70 种为共有物质，香气物质分类占比结果（图 3B）显示，99 种挥发性成分可归类为醛类（26 种）、酯类（25 种）、醇类（19 种）、杂环类（2 种）、酮类（12 种）、碳氢类（13 种）和其他类（2 种）。其中醛类（26.26%）占比最高，其次是酯类（25.25%）和醇类（19.19%）。

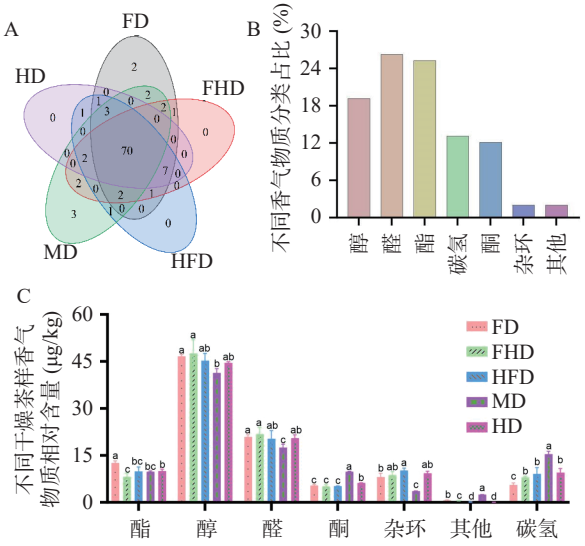


图 3　不同干燥茶样挥发性物质种类、数量及占比

Fig.3　Volatile compound composition in differently dried tea samples

注：A.韦恩图；B.不同干燥茶样挥发性物质种类及占比；C.不同干燥茶样香气物质质量分数占比。

从物质含量分析，醇类物质在各类干燥茶样中均占据主导地位（41.35%~47.58%），其次是醛类（17.55%~21.83%）和酯类（8.24%~12.6%），这三类物质共同构成了花果香型红茶的特征香气基础。FHD 茶样表现出最高的醇类（47.58%）和醛类（21.83%）占比，这与该工艺“甜花香显”的感官评价结果相印证；图 3C 显示 FD 茶样的酯类物质含量（12.6%）显著高于其他组别（P<0.05），可能解释了其“甜花香较显”的香气特征；MD 茶样则在酮类（9.8%）和碳氢类（15.38%）物质上具有相对优势，但香气总质量分数最低（2374.84 ug/kg）。香气总质量分数分析显示，FD 茶样以 6507.42 ug/kg的总质量分数居首，FHD 茶样次之（5350.46 ug/kg），而 MD 茶样最低（2374.84 ug/kg）。这种差异可能源于真空冷冻干燥通过低温升华作用最大程度保留了挥发性成分，而微波干燥的快速加热特性可能抑制了美拉德反应等香气形成途径[33]，导致其香气总量最低。

为进一步了解不同干燥方式间香气物质差异情况，对 5 个茶样进行最小偏二乘（OPLS-DA）分析，如图 4A 所示，自变量拟合指数（R^2X）为 0.99，因变量拟合指数（R^2Y=0.976），模型预测指数（Q^2=0.765），模型拟合效果好[34]。经 200 次置换检验，结果如图 4B 所示，Q^2 回归线和纵轴相交点小于零，模型不存在过拟合情况，验证有效，该结果可用于这 5 种不同干燥方式所制红茶香气的差异分析。不同茶样分离清楚，重

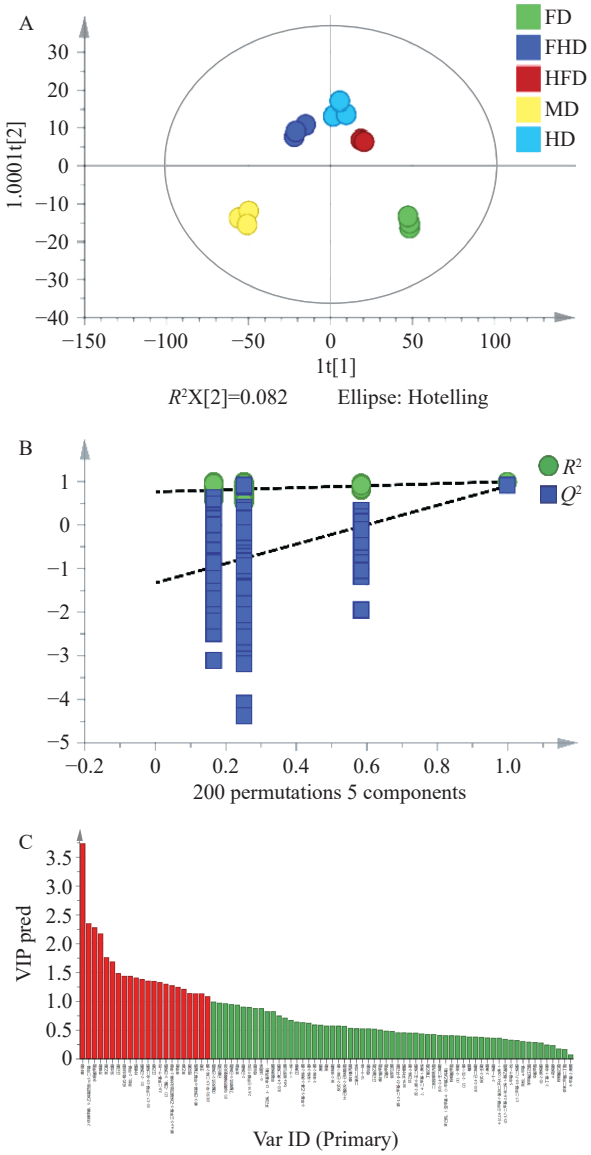


图 4　不同干燥茶样挥发性物质最小偏二乘分析

Fig.4　Partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) of volatile compounds in differently dried tea samples

注：A.OPLS-DA 得分散点图；B.OPLS-DA 交叉验证结果；C.挥发性物质 VIP 值。

复性较好，其中真空冷冻-热风联合干燥、热风-真空冷冻联合干燥和热风干燥的香气物质具有相似性。

如图 4C 所示，根据 VIP>1，共筛选出 22 种差异物质，对不同干燥方式所制红茶香气的区分起关键作用，分别是香叶醇、2-呋喃甲醇，5-乙烯基四氢-α,5-二甲基、水杨酸甲酯、芳樟醇、苯乙醛、异戊醛、正己醛、反式-橙花叔醇、2-甲基-癸烷、柠檬醛、(E)-2-己烯醛、(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛、正己醇、3,8-二甲基-十一烷、(Z)-己酸，3-己烯酯、顺-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇、苯甲醛、苯乙醇、橙花醛、顺-3-己烯基-α-甲基丁酸酯、壬醛、(3E,5E)-辛-3,5-二烯-2-酮。

2.3.2　不同干燥茶样挥发性成分差异分析　对筛选出的关键差异挥发性物质进行聚类分析，如图 5 所示，5 个干燥茶样的挥发性成分的质量分数具有显著

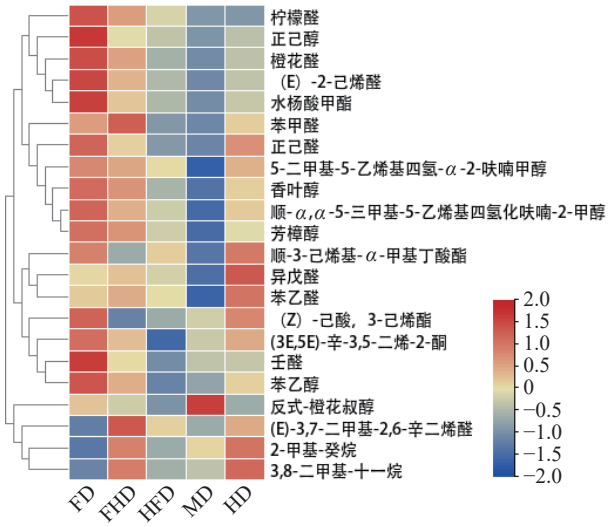


图 5　不同干燥茶样挥发性化合物聚类热图

Fig.5　Volatile compound clustering heatmap of differently dried tea samples

差异。FD 茶样的柠檬醛、正己醇和橙花醛等物质质量分数较高；FHD 茶样的苯甲醛和(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛质量分数较高；MD 茶样特异性积累较高质量分数的反式-橙花叔醇；HD 茶样的 3,8-二甲基十一烷和异戊醛等物质质量分数较高。

醛类物质作为红茶特征香气的重要组分，主要通过脂肪酸[35] 和氨基酸代谢途径形成，其含量与组成显著影响茶叶的花果香特征。FD 和 FHD 茶样表现出更高的醛类物质总量，证实真空冷冻工艺能有效保留挥发性成分[36]。具体而言，FD 茶样中柠檬醛、正己醛[37](青草、甜味)和(E)-2-己烯醛[37](草本、果味)等物质的富集，赋予其突出的青香和果香特征；而 FHD 茶样则因(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛(果香)、苯甲醛[38](果香、甜香)和壬醛(果香)等物质的显著积累，形成了层次更丰富、强度更高的复合果香。

醇类物质作为红茶特征香气的重要载体[39]，主要通过呈现花香、甜香和果香等风味特征影响茶叶的感官品质。本研究检测到多种关键芳香醇，包括香叶醇[40]、芳樟醇、苯乙醇和橙花醇等，这些物质不仅是构成茶叶基础香气的重要成分，更是典型花香物质的代表[41]。其中，香叶醇作为花香的关键呈香化合物[42]，其质量分数分布呈现显著的工艺依赖性：FD>FHD>HD>HFD>MD。这一结果表明真空冷冻干燥技术对保留关键花香物质具有独特优势，可能与 FD 工艺通过维持-20 ℃ 的升华温度和持续真空环境，实现了双重保护机制：一方面通过低温升华高效去除水分，另一方面抑制了香叶醇等低沸点物质的热降解反应。

酯类物质作为红茶果香特征的关键贡献者[43]，其质量分数分布显著影响茶叶的感官品质。不同干燥工艺对酯类物质的保留效果存在明显差异：FD 茶样酯类总量最高，显著优于其他处理组，而 FHD 茶样最低。特别值得注意的是，水杨酸甲酯作为重要的果香物质，在 FD 茶样中质量分数最高(406.3 μg/kg)，是 MD 茶样(41.13 μg/kg)的 9.9 倍，可能与 MD 处理的高功率微波加速其转化有关[44]。从香气协同效应看，水杨酸甲酯与橙花醇、苯甲醇等物质的相互作用对构建红茶复合果香具有重要作用[45]，FD 茶样中较高的水杨酸甲酯相对含量(406.3 μg/kg)与其“甜花香较显”的感官评价相符，证实了该物质对品质的正向贡献。

酮类与碳氢类物质的分布特征呈现出显著的干燥工艺特异性。本文结果显示，MD 茶样中这两类物质的质量分数显著高于其他处理组，而 FD 茶样则表现出最低的积累水平。在具体物质组成上，(3E,5E)-辛-3,5-二烯-2-酮(酮类)和 3,8-二甲基-十一烷(碳氢类)被鉴定为各自类别中丰度最高的特征性代谢物[46]。这一分布模式可能与微波干燥过程中的特异性保留机制相关[47]。

2.3.3　不同干燥茶样特征挥发性物质及 OAV 比较

研究表明，OAV≥1 的化合物可被认为具有关键的风味特征[48]。如表 4 所示，共有 15 种挥发性成分可计算 OAV，除反式-橙花叔醇，其余 14 个香气物质的 OAV 均大于 1，其中 FD 茶样有 13 个、FHD 茶样有 14 个、HFD 茶样有 12 个、MD 茶样有 9 个，

表 4　不同干燥茶样挥发性物质 OAV 值

Table 4　Relative odor activity value (OAV) of volatile compounds in differently dried tea samples

序号	物质	CAS	阈值(μg/kg)	FD	FHD	HFD	MD	HD	香气描述
1	异戊醛	590-86-3	0.5	140.67	157.42	122.23	9.21	254.73	花香、水果香[50]
2	正己醛	66-25-1	5	33.51	24.72	16.86	14.89	29.72	青草味[51]
3	(E)-2-己烯醛	6728-26-3	88.7	1.86	1.17	0.67	0.31	0.75	青味、果香[37]
4	正己醇	111-27-3	5.6	19.63	8	6.13	2.01	5.75	果香[52]
5	苯乙醛	122-78-1	4	30	33.69	27.84	5.98	41.44	花果香、甜香、蜜香、青草味[53]
6	顺-α,α-5-三甲基-5-乙烯基四氢化呋喃-2-甲醇	5989-33-3	100	1.82	1.41	1.08	0.39	1.28	花香、木香气味[53]
7	芳樟醇	78-70-6	6	75.45	66.61	45.85	16.02	49.28	铃兰花香[53]
8	壬醛	124-19-6	1	122.11	81.08	53.89	71.89	73.06	果香[54]
9	苯乙醇	60-12-8	56.4	2.94	2.33	1.32	1.59	2.13	玫瑰的花香[55]
10	水杨酸甲酯	119-36-8	40	10.16	5.32	2.99	1.03	3.69	冬绿薄荷味、脂味[56]

续表 4

序号	物质	CAS	阈值（μg/kg）	FD	FHD	HFD	MD	HD	香气描述
11	橙花醛	106-26-3	53	1.86	1.27	0.53	0.22	0.68	甜味、柠檬味[57]
12	香叶醇	106-24-1	7.5	239.77	210.22	130.04	73.89	173.09	花香[53]
13	柠檬醛	5392-40-5	40	4.6	3	1.55	–	–	甜味、柠檬味[58]
14	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	141-27-5	32	–	3.76	1.94	0.84	2.46	柠檬[58]
15	反式-橙花叔醇	40716-66-3	250	0.15	0.11	0.04	0.27	0.07	清香、果香、花香[53]

注: 表中阈值均查自《化合物嗅觉阈值汇编》第二版。

HD 茶样有 11 个。研究表明, OAV 值与物质贡献度成正相关[49], 一般来说, OAV 值越大, 贡献度越大。在 14 个物质中, 8 种高贡献物质(OAV>10)包括异戊醛(巧克力、桃子香)、正己醛(青草香)、芳樟醇(铃兰花香)等, 与其他香气物质共同构成了红茶典型的花香、果香与青草香复合特征, 与感官审评中 5 个茶样整体上呈现甜花香特征相吻合。其中, FD 处理的茶样中, 香叶醇、壬醛等关键香气物质的 OAV 值在 5 个供试茶样中均显著高于其他干燥方式, 其对茶样整体香气特征的贡献率尤为突出, 能够有效保留茶叶的甜花香特征, 赋予茶样突出的甜花香特征, 但同时保留了较高含量的正己醛, 可能影响香气协调性, 这可能在一定程度上影响了茶叶香气的协调性。(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛作为关键香气物质, 在 FHD 茶样中的香气贡献度显著高于其他干燥方式, 其较高的 OAV 值表明该物质是构成 FHD 茶样果香特征的重要挥发性成分。HD 茶样的特征香气主要表现为甜香与蜜香, 其中异戊醛(OAV=254.73)和苯乙醛(OAV=41.44)的香气活性值显著高于其他组分, 表明二者是该干燥方式下茶样香气特征的主要贡献物质。HFD 茶样的特征香气主要由香叶醇和异戊醛共同贡献; MD 处理则通过香叶醇(OAV=73.89)和壬醛(OAV=71.89)的协同作用形成典型花果香型。

3 结论

本研究通过系统分析五种干燥工艺(FD、HD、HFD、FHD、MD)对坦洋工夫红茶品质的影响。结果表明, FHD 茶样的综合感官评分最高(90.9 分), 不同干燥工艺对坦洋工夫红茶品质成分具有差异化影响, FHD 在保留游离氨基酸(6.69%)、茶多酚(12.28%)方面表现最优; FD 工艺显著提高了茶红素(3.08%)和茶黄素(2.85%)含量, 且香气物质总量最高(6507.42), 酯类、醛类和醇类是坦洋工夫红茶主要的香气物质, 通过 OAV 分析发现, FD 以香叶醇(OAV=239.77)为主, HD 以异戊醛(OAV=254.73)为主, FHD 特异性积累(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛(OAV=3.76)。与已有研究相比, 本研究验证了冷冻干燥对茶多酚、茶色素等物质以及香气成分的保留优势, 值得注意的是, MD 茶样表现出独特的成分特征, 其茶多酚含量(8.43%)显著低于其他处理组, MD 和 HD 茶样的可溶性糖含量(40.99、44.34 mg/g)显著高于 FD 处理组, 与前人研究结果存在差异。这些发现为红茶干燥工艺优化提供了新的理论依据和实践指导, 特别是 FHD 工艺因其相对均衡的品质表现具有重要应用价值。然而, 干燥过程中酶活性动态变化及其对品质形成的影响机制仍需深入研究, 未来可结合多组学技术和分子感官科学, 进一步解析关键成分转化规律。

© 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] POLAT A, KALCıOĞLU Z, MÜEZZINOĞLU N. Effect of infusion time on black tea quality, mineral content and sensory properties prepared using traditional Turkish infusion method[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2022, 29: 100559.
[2] ZHANG S, JIANG X, LI C, et al. Effect of fermentation humidity on quality of congou black tea[J]. Foods, 2023, 12(8): 1726.
[3] B. V. U, MULTIVARIATE. Differentiation of black tea[J]. Variation of Polyphenols and Carbohydrates Content in Camellia sinensis Tea Products, 2019, 109: 58.
[4] IMRAN A, BUTT M S, ARSHAD M S, et al. Exploring the potential of black tea based flavonoids against hyperlipidemia related disorders[J]. Lipids in Health and Disease, 2018, 17(1): 57.
[5] ZHOU Ziwei, WU Qingyang, CHEN Liqin, et al. Comparison of different grades of innovative tanyang congou black tea (minkehong) based on metabolomics and sensory evaluation[J]. Horticulturae, 2024, 10(4): 374.
[6] 王文富. 不同加工工艺对云南红茶品质形成的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024. [WANG Wenfu. Study on the influence of different processing techniques on the quality formation of Yunnan black tea[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024.]
[7] JIN Jianchang, LIANG Shuang, QI Shangxiong, et al. Widely targeted metabolomics reveals the effect of different raw materials and drying methods on the quality of instant tea[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1236216.
[8] QU Fengfeng, ZHU Xiaojing, AI Zeyi, et al. Effect of different drying methods on the sensory quality and chemical components of black tea[J]. Lwt, 2019, 99: 112−118.
[9] 苏丹, 李树君, 赵凤敏, 等. 农产品联合干燥技术的研究进展[J]. 农机化研究, 2014, 36(11): 236−240. [SU D, LI S J, ZHAO F M, et al. Research progress on combined drying technologies for agricultural products[J]. Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(11): 236−240.]
[10] 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 Jinguanyan Congou black tea based on sensomics[J]. Journal of Tea

Science, 2023, 43(1): 109−123.］
［11］ 王婷婷, 罗学平, 李丽霞, 等. 不同干燥工艺对红茶滋味和香气的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(22): 121−128.［WANG Tingting, LUO Xueping, LI Lixia, et al. Effects of different drying processes on the taste and aroma of black tea[J]. Food Research and Development, 2022, 43(22): 121−128.］
［12］ 郭玉明, 姚智华, 崔清亮, 等. 真空冷冻干燥过程参数对升华干燥能耗影响的组合试验研究[J]. 农业工程学报, 2004(4): 180−184.［GUO Yuming, YAO Zhihua, CUI Qingliang, et al. Combined experimental study on the influence of process parameters on sublimation drying energy consumption during vacuum freeze-drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004(4): 180−184.］
［13］ 夏涛. 茶叶加工[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2016.［XIA Tao. Tea processing[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2016.］
［14］ 黄业伟, 王素敏, 徐欢欢, 等. 不同氧化程度茶多酚与咖啡因及糖的相互作用[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(3): 413−417.［HUANG Yewei, WANG Sumin, XU Huanhuan, et al. Interaction between tea polyphenols with different oxidation degrees and caffeine/sugars[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2015, 30(3): 413−417.］
［15］ YU Penghui, HUANG Hao, ZHAO Xi, et al. Dynamic variation of amino acid content during black tea processing: A review[J]. Food Reviews International, 2023, 39(7): 3970−3983.
［16］ 肖新生, 周文君, 奉美桃, 等. 基于主成分分析的不同干燥方式对江永香姜营养品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 310−321.［XIAO Xinsheng, ZHOU Wenjun, FENG Meitao, et al. Effects of different drying methods on nutritional quality and antioxidant activity of Jiangyong Xiangjiang ginger based on principal component analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 310−321.］
［17］ WANG Xuan, LI Na, CHEN Shengshuang, et al. MS-FINDER assisted in understanding the profile of flavonoids in temporal dimension during the fermentation of Pu-erh tea[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(23): 7085−7094.
［18］ ROSLAN A S, ISMAIL A, ANDO Y, et al. Effect of drying methods and parameters on the antioxidant properties of tea (*Camellia sinensis*) leaves[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2020, 2(1): 8.
［19］ DONG Juane, MA Xihan, FU Zhuorui, et al. Effects of microwave drying on the contents of functional constituents of *Eucommia ulmoides* flower tea[J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34(1): 1102−1110.
［20］ 戴浩民. 29 份茶树种质制白茶品质分析及适制性评价体系构建[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.［DAI Haomin. Quality analysis of white tea made from 29 tea germplasms and construction of suitability evaluation system[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.］
［21］ 邓宇杰, 罗理勇, 田小军, 等. 干燥方式对不同品种茶树花主要生化成分的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7): 356−360,364.［DENG Yujie, LUO Liyong, TIAN Xiaojun, et al. Effects of drying methods on main biochemical components of camellia flowers from different tea varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7): 356−360,364.］
［22］ 宋加艳, 何加兴, 欧伊伶, 等. 碧香早夏季鲜叶加工乌龙茶过程中品质成分动态变化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 238−248, 163.［SONG Jiayan, HE Jiaxing, OU Yiling, et al. Dynamic changes of quality components during oolong tea processing using summer fresh leaves of 'Bixiangzao' cultivar[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(2): 238−248,163.］
［23］ 刘春菊, 王海鸥, 李大婧, 等. 干燥方式对黄秋葵花茶品质及体外抗氧化能力的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 913−920.［LIU Chunju, WANG Haiou, LI Dajing, et al. Effects of drying methods on quality and *in vitro* antioxidant capacity of okra flower tea[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(4): 913−920.］
［24］ 马敬宜, 姚衡斌, 周琼琼, 等. 信阳红茶发酵过程中非挥发性和挥发性代谢物的动态变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(5): 242−251.［MA Jingyi, YAO Hengbin, ZHOU Qiongqiong, et al. Dynamic changes of non-volatile and volatile metabolites during Xinyang black tea fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 242−251.］
［25］ 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 第三版: 北京: 中国农业出版社, 2003: 9−11.［WAN Xiaochun. Tea biochemistry[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 9−11.］
［26］ 唐莹, 贾仕杰, 蒋莹, 等. 红树莓叶茶的制备及与红树莓叶片、绿茶品质的比较[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 34−42.［TANG Ying, JIA Shijie, JIANG Ying, et al. Preparation of red raspberry leaf tea and comparison of its quality with red raspberry leaves and green tea[J]. Food Science, 2021, 42(17): 34−42.］
［27］ 杨波, 刘宝林, 张淑平, 等. 褐藻糖胶不同干燥方法的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 92−94,97.［YANG Bo, LIU Baolin, ZHANG Shuping, et al. Study on different drying methods of fucoidan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(2): 92−94,97.］
［28］ 张娇, 梁壮仙, 张拓, 等. 黄茶加工中主要品质成分的动态变化[J]. 食品科学, 2019, 40(16): 200−205.［ZHANG Jiao, LIANG Zhuangxian, ZHANG Tuo, et al. Dynamic changes of main quality components during yellow tea processing[J]. Food Science, 2019, 40(16): 200−205.］
［29］ 侯炳豪, 陈佳豪, 黄浩, 等. 冷冻处理对茶鲜叶与萎凋叶细胞破损率及红茶茶黄素含量影响研究[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(3): 421−426.［HOU Binghao, CHEN Jiahao, HUANG Hao, et al. Effects of freezing treatment on cell breakage rate of fresh and withered tea leaves and theaflavins content in black tea[J]. Journal of Tea Communication, 2020, 47(3): 421−426.］
［30］ 侯丹, 邵胜荣, 陈小强, 等. 儿茶素稳态化及其应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(22): 325−330.［HOU Dan, SHAO Shengrong, CHEN Xiaoqiang, et al. Research progress on stabilization and application of catechins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(22): 325−330.］
［31］ 张凌云. 不同茶树品种绿茶饮料适制性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.［ZHANG Lingyun. Study on the suitability of different tea cultivars for green tea beverage processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.］
［32］ 范捷, 王秋霜, 秦丹丹, 等. 红茶品质及其相关生化因子研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 246−253.［FAN Jie, WANG Qiushuang, QIN Dandan, et al. Research progress on black tea quality and related biochemical factors[J]. Food Science, 2020, 41(3): 246−253.］
［33］ 叶秋萍, 余雯, 谢基雄, 等. 不同干燥方式对茉莉花茶挥发性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 210−218.［YE Qiuping, YU Wen, XIE Jixiong, et al. Effects of different drying methods on volatile components of jasmine tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 210−218.］
［34］ YUN Jing, CUI Chuanjian, ZHANG Shihua, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea[J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
［35］ 徐亚文, 牛森, 刘娜, 等. 传统滇红工夫红茶与野生滇红工夫红茶的品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 335−344.［XU Yawen, NIU Miao, LIU Na, et al. Quality analysis of traditional Dianhong Congou black tea and wild Dianhong Congou black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(6): 335−344.］
［36］ 王晓艳, 韩延超, 吴伟杰, 等. 不同干燥方式对菠萝品质和挥发性风味的影响[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(5): 1168−1177.［WANG Xiaoyan, HAN Yanchao, WU Weijie, et al. Effects of dif-

ferent drying methods on quality and volatile flavor compounds of pineapple[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(5): 1168−1177.]
[37] 胡蒙蒙, 赵蓉, 洪玉冰, 等. 不同产地草果气味特征成分的快速分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 246−256. [HU Mengmeng, ZHAO Rong, HONG Yubing, et al. Rapid analysis of characteristic odor components in Amomum tsao-ko from different producing areas[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 246−256.]
[38] 李婷婷, 黄名正, 唐维媛, 等. 刺梨汁中挥发性成分测定及其呈香贡献分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 237−246. [LI Tingting, HUANG Mingzheng, TANG Weiyuan, et al. Determination of volatile components and analysis of their aroma contribution in *Rosa roxburghii* juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(4): 237−246.]
[39] 郑鹏程, 刘盼盼, 龚自明, 等. 湖北红茶特征性香气成分分析[J]. 茶叶科学, 2017, 37(5): 465−475. [ZHENG Pengcheng, LIU Panpan, GONG Ziming, et al. Analysis of characteristic aroma components in Hubei black tea[J]. Journal of Tea Science, 2017, 37(5): 465−475.]
[40] 徐元骏, 何靓, 贾玲燕, 等. 不同地区及特殊品种红茶香气的差异性[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, 41(3): 323−330. [XU Yuanjun, HE Liang, JIA Lingyan, et al. Differences in aroma characteristics of black teas from different regions and special varieties[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2015, 41(3): 323−330.]
[41] HOU Z, CHEN Z, LI L, et al. Comparison of volatile compounds in jingshan green tea scented with different flowers using GC-IMS and GC-MS analyses[J]. Foods, 2024, 13(17): 2653−2653.
[42] 王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. 茶叶挥发性成分中关键呈香成分研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 341−349. [WANG Mengqi, ZHU Yin, ZHANG Yue, et al. Research progress on key aroma-active compounds in tea volatile components[J]. Food Science, 2019, 40(23): 341−349.]
[43] 王金源, 张佳慧, 庄莉萍, 等. HS-SPME-GC-TOF-MS 结合 ROAV 分析花果香型红茶特征香气成分[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(12): 2015−2026. [WANG Jinyuan, ZHANG Jiahui, ZHUANG Liping, et al. HS-SPME-GC-TOF-MS combined with ROAV to analyze characteristic aroma components of floral-fruity black tea[J]. Natural Product Research and Development, 2023, 35(12): 2015−2026.]
[44] 杨沅思, 坤吉瑞, 代洪苇, 等. 晒青绿茶加工过程香气物质及其部分前体变化分析[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 133−142. [YANG Yuansi, KUN Jirui, DAI Hongwei, et al. Analysis of aroma compounds and their precursors during the processing of sun-dried green tea[J]. Food Science, 2024, 45(1): 133−142.]
[45] 牛云蔚, 马一玮, 肖作兵, 等. 红茶特征香气成分的鉴定及感知交互作用[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 292−300. [NIU Yunwei, MA Yiwei, XIAO Zuobing, et al. Identification of characteristic aroma compounds in black tea and their perceptual interactions[J]. Food Science, 2023, 44(6): 292−300.]
[46] 张丽, 薛妍君, 邓金花, 等. 微波干燥对野生荠菜品质和挥发性物质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(8): 226−236. [ZHANG Li, XUE Yanjun, DENG Jinhua, et al. Effects of microwave drying on quality and volatile compounds of wild shepherd's purse[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(8): 226−236.]
[47] YAN Xinhuan, PAN Shaoxiang, LIU Xuemei, et al. Profiling the major aroma-active compounds of microwave-dried jujube slices through molecular sensory science approaches[J]. Foods, 2023, 12(16): 3012.
[48] 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.
[49] DENG Xiujuan, HUANG Ganghua, TU Qing, et al. Evolution analysis of flavor-active compounds during artificial fermentation of Pu-erh tea[J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129783.
[50] 李华. 陶融香型白酒风味物质特征及其与品质关联性探[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2025. [LI Hua. Investigation on the characteristics of flavor substances and their correlation with quality in Taorongxiang-style Baijiu[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2025.]
[51] 翁梦婷, 张迪, 罗贝贝, 等. 广叶绣球菌保鲜及干制后挥发性风味成分差异分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 289−299. [WENG Mengting, ZHANG Di, LUO Beibei, et al. Analysis of volatile flavor components differences in broadleaf between fresh-keeping and drying processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 289−299.]
[52] 陈艾琳, 杨清华, 赖谦, 等. 冠突散囊菌发酵赶黄草叶茶工艺优化及风味品质分析[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 251−261. [CHEN Ailin, YANG Qinghua, LAI Qian, et al. Optimization of fermentation process and flavor quality analysis of Guhuangcao leaf tea by *Eurotium cristatum*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 251−261.]
[53] 黄维. 陈年政和白茶风味品质研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2024. [HUANG Wei. Study on the flavor quality of aged Zhenghe white tea[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2024.]
[54] 李晶. 福建红茶品质特征研究与综合评价[D]. 福州: 福建农林大学 2023. [LI Jing. Study on quality characteristics and comprehensive evaluation of Fujian black tea[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.]
[55] 陈静, 阙玉林, 林馨颖, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术分析不同年份福鼎栀子花白茶挥发性香气组分差异[J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 274−283. [CHEN Jing, QUE Yulin, LIN Xinying, et al. Analysis of volatile aroma components differences in different aging years of Fuding Gardenia white tea based on HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 274−283.]
[56] 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. [XIAO Tengxiang, FENG Hua, LUO Yuqin, et al. Analysis of key flavor compounds and quality of pomelo-scented white tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 47−55.]
[57] KITTLER J, KRÜGER H, ULRICH D, et al. Content and composition of essential oil and content of rosmarinic acid in lemon balm and balm genotypes (*Melissa officinalis*)[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2018, 65(5): 1517−1527.
[58] 李蕾, 张秀琼, 赵蕾, 等. 广南底圩红茶加工过程中香气成分的变化[J/OL]. 食品工业科技, 1−15[2025-09-16]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040108. [LI Lei, ZHANG Xiuqiong, ZHAO Lei, et al. Changes of aroma components during processing of Guangnan Dixiu black tea[J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 1−15[2025-09-16]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040108.]