谢妙琴, 周娣, 徐好杰, 等. 不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶的适制性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 294−303. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040027

XIE Miaoqin, ZHOU Di, XU Haojie, et al. Adaptability of Different Tea Cultivar for Producing Flower-Fruit-scented TanYang Congou Black Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 294−303. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040027

· 分析检测 ·

不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶的适制性

谢妙琴[1,2], 周　娣[2,+], 徐好杰[2], 谢妙珠[3], 孔凡鲁[3], 李海波[1], 蔡荟梅[2], 李大祥[2], 宛晓春[2], 彭传燚[2,*]

（1.武夷山职业学院, 福建武夷山 354300;
2.安徽农业大学茶业学院/茶树种质创新与资源利用全国重点实验室, 安徽合肥 230036;
3.武夷山易知足茶业有限公司, 福建武夷山 354300）

摘　要: 为探究福建福安地区主要栽培茶树品种对花果香型坦洋工夫红茶的适制性。本研究选取了‘金牡丹’、‘梅占’、‘黄观音’、‘福云六号’、‘福云七号’、‘福安菜茶’、‘金观音’和‘福鼎大毫’8 个当地主栽茶树品种，根据感官审评和代谢物质分析，并综合层次分析赋权、灰色关联度法、隶属函数法及熵权 TOPSIS 法，对其适制花果香型坦洋工夫红茶的潜力进行了评估。结果表明：感官审评中，以‘金牡丹’茶树品种鲜叶制备的红茶得分最高（92.45 分），其茶氨酸含量为 26.44 g/kg，咖啡碱 42.64 g/kg，EGCG 10.21 g/kg，EGC 8.66 g/kg，EC 2.21 g/kg，并检测出 70 种挥发性化合物，其中醇类物质占比 57.36%，香叶醇与芳樟醇相对含量尤为丰富。灰色关联度法和隶属函数法的分析表明，‘金牡丹’与福鼎大毫、‘福安菜茶’的分布位置相近却不完全重叠，凸显了其独特性，而‘梅占’与‘福云六号’、‘福云七号’的分布存在一定的重叠现象。‘金牡丹’凭借其丰富的内含物质和优异的感官品质，在适制花果香型坦洋工夫红茶方面展现出显著的品种优势，为优化品种选择与品质调控提供了重要的科学依据。

关键词: 花果香型, 坦洋工夫红茶, 茶树品种, 加工适制性, 综合评价

中图分类号: TS251.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0294−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040027　　本文网刊:

Adaptability of Different Tea Cultivar for Producing Flower-Fruit-scented TanYang Congou Black Tea

XIE Miaoqin[1,2], ZHOU Di[2,+], XU Haojie[2], XIE Miaozhu[3], KONG Fanlu[3], LI Haibo[1], CAI Huimei[2], LI Daxiang[2], WAN Xiaochun[2], PENG Chuanyi[2,*]

（1.Wuyishan Vocational College, Wuyishan 354300, China;
2.State Key Laboratory of Tea Plant Germplasm Innovation and Resource Utilization, School of Tea Science, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China;
3.Wuyi Mountain Yizhi Zu Tea Co., Ltd., Wuyishan 354300, China）

Abstract: To investigate the processing adaptability of the main tea varieties cultivated in the Fuan region of Fujian for producing flower-fruit-scented TanYang congou black tea, 'Jin Mudan', 'Meizhan', 'Huang Guanyin', 'Fuyun 6', ' Fuyun 7', 'Fuan Caicha', 'Jin Guanyin' and 'Fuding Dahao' eight local tea varieties were selected in this study. Based on sensory evaluation and metabolite analysis, the potential for producing flower-fruit-scented TanYang congou black tea was assessed using a combination of hierarchical analysis based on gray relational analysis, membership function method and entropy-

收稿日期: 2025−04−03　　+并列第一作者

基金项目: 国家自然科学基金（32172636）; 安徽省优秀科研创新团队（2022AH010055）; 国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目（CARS-19）; 福建省中青年教师教育科研项目（科技类, JAT231302）。

作者简介: 谢妙琴（1995−）, 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品加工与品质控制, E-mail: 756059593@qq.com。
周娣（1999−）, 女, 硕士, 研究方向: 食品加工与品质控制, E-mail: 2632946878@qq.com。

*** 通信作者:** 彭传燚（1988−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 茶叶质量安全与加工利用, E-mail: pcy0917@ahau.edu.cn。

weighted TOPSIS method. The results showed that the black tea prepared from the fresh leaves of 'Jin Mudan' variety demonstrated the highest (92.45 scores) in the sensory evaluations, and the content of theanine, caffeine, EGCG, EGC and EC was 26.44, 42.64, 10.21, 8.66 and 2.21 g/kg, respectively. Furthermore, 70 volatile compounds were detected, and alcohols accounted for 57.36% with geraniol and linalool being particularly abundant. The analysis using the gray relational method and membership function method indicated that 'Jin Mudan' was located close to but not completely overlapping with Fuding Daba and 'Fuan Caicha', that highlighting its uniqueness, while 'Meizhan' showed some overlap with 'Fuyun 6' and 'Fuyun 7'. 'Jin Mudan', with its rich internal compounds and excellent sensory quality, demonstrates significant varietal advantages in the processing of flower-fruit-scented TanYang congou black tea, providing important scientific evidence for optimizing variety selection and quality control.

Key words: flower-fruit-scented; TanYang congou black tea; tea cultivars; processing adaptability; comprehensive evaluation

红茶因其健康功效备受欢迎，占全球茶叶消费量的 70% 以上[1]。据中国茶叶流通协会统计，2023 年中国红茶产量 49.12 万吨（同比增长率为 1.9%），毛茶产值达 519.74 亿元（同比增长率为 2%）[2]。福建省福安市是重点产茶区，其坦洋工夫红茶在加工工艺上不断创新，引进摇青工艺成功开发出花果香型坦洋工夫红茶，具有条索肥壮紧结，色泽乌褐油润，香气浓郁持久，花果香显，滋味甜醇鲜爽的品质特征[3]，赢得了市场和消费者的认可。研究表明，采用抖青或荡青等创新工艺可有效促进香气化合物生物合成，特别是花香和果香类物质[4−7]。

茶树品种是茶叶生产的基础，充分发掘和利用品种的适制性，将其加工成符合消费者感官偏好的优质产品，是实现茶叶品质最优化的关键[8−10]。江新凤等[11] 评价了江西丘陵红壤地区 8 个主栽茶树品种适制性，发现‘黄观音’和‘金观音’的茶树品种更适制作花香型工夫红茶，福鼎大毫、楮叶齐、赣茶 14 号及群体种适制具有“滋味醇厚，红亮汤色”的工夫红茶。杨娟等[12] 研究表明蜀永 2 号和巴渝特早夏季鲜叶更易加工出品质优良的工夫红茶。传统的适制性评价主要依赖感官审评、内含物质测定及香气分析等手段。近年来，多元统计综合评价方法因其能够整合多项指标信息，更全面、客观地反映被评价对象的整体状况[13]，在多种作物品种评价中得到有效运用[14−15]。李华鑫[16] 运用层次分析法建立了茶树综合评价体系，成功评价了豫南引进品种的适应性。王治会等[17] 用综合评价法筛选出了适宜在江西种植的茶树新品种。

福安市拥有茶园面积约 165 万亩，茶树种质资源丰富[18]，为更好地了解花果香型红茶的适制品种，科学筛选适宜加工花果香型坦洋工夫红茶的优良品种，本研究选取福安市主栽的 8 个茶树品种：‘金牡丹’、‘金观音’、‘黄观音’、‘梅占’、‘福鼎大毫’、‘福安菜茶’、‘福云六号’和‘福云七号’，按照标准工艺将其加工成花果香型坦洋工夫红茶。通过感官审评结合多元统计综合评价方法，系统评价各品种的适制性，为花果香型坦洋工夫红茶的品质调控提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

红茶　本实验于福安市晓阳镇南方佳木茶业有限公司茶厂进行，原料采自福安市晓阳镇，采摘时间为 4 月中旬，采摘标准为一芽三、四叶或小开面二、三叶，分别为‘金牡丹’（JMD）、‘金观音’（JGY）、‘黄观音’（HGY）、‘梅占’（MZ）、‘福鼎大毫’（FDDH）、‘福云六号’（FYL）、‘福云七号’（FYQ）、‘福安菜茶’（CC）共计 8 个茶树品种。参照 DB 35/T 632-2022《坦洋工夫红茶加工技术规范》加工成花果香型坦洋工夫红茶，后用研钵和研杵研磨成粉末，过 40 目筛后保存于−20 ℃ 冰箱待用；碳酸钠（Na_2CO_3）、氯化亚锡（$SnCl_2{\cdot}2H_2O$）　购自上海麦克林生化科技有限公司；福林酚（C_6H_6O）　购自北京索莱宝科技有限公司；没食子酸（$C_7H_6O_5$）、儿茶素单体标准品（色谱级）、茶氨酸标准品（色谱级）、咖啡碱标准品（色谱级）　购自上海源叶生物科技有限公司；乙腈（C_2H_3N）、甲醇（CH_3OH）、乙酸（CH_3COOH）、碳酸钠（Na_2CO_3）、磷酸氢二钠（Na_2HPO_4）、磷酸二氢钾（H_2KO_4P）、水合茚三酮（$C_9H_6O_4$）、癸酸乙酯（色谱级）　购自上海阿拉丁生化科技有限公司。

7890-5977B 气相色谱-质谱联用仪　美国安捷伦科技有限公司；e2695 高效液相色谱仪　美国沃特世科技公司；Milli-Q 纯水机　美国默克公司；DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器　巩义市予华仪器有限责任公司；TGL-16M 高速冷冻离心机　上海卢湘仪离心机仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　感官审评方法　感官审评参照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》[19]，由 6 位国家高级评茶技师组成审评小组进行。审评时，将茶叶样品置于标准审评室中，控制室温为 25±2 ℃，湿度保持在 60%±5%，以保证审评条件的一致性。每份茶样称取 3.0 g，置于 150 mL 的审评杯中，用沸水冲泡，浸泡 5 min 后倒出茶汤，进行外形、色泽、香气、滋味和汤色等项目的审评，每个项目按百分制进行评分，最后计算综合得分。

1.2.2 茶叶非挥发成分检测方法

1.2.2.1 儿茶素含量测定 参照 GB/T 8313-2018《茶叶中儿茶素类含量的检测方法》。准确称取茶叶样品 2.0 g, 置于 50 mL 离心管中, 加入 40 mL 70% 乙醇溶液, 超声提取 30 min, 然后在 4000 r/min 下离心 10 min, 取上清液用去离子水稀释至刻度, 再用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤, 最后采用高效液相色谱仪进行检测[20]。

1.2.2.2 茶氨酸含量测定 按照 GB/T 23193-2017《茶叶中茶氨酸的测定》标准执行。称取茶叶样品 0.5 g, 置于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 的 1 mol/L 的盐酸溶液, 于 80 ℃ 水浴中加热 30 min, 冷却至室温后用去离子水定容至刻度, 再用 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 最后用高效液相色谱仪进行检测[21]。

1.2.2.3 咖啡碱含量测定 咖啡碱含量检测方法依据 GB/T 8312-2013《茶咖啡碱测定》。称取茶叶样品 1.0 g, 置于 50 mL 离心管中, 加入 25 mL 乙醇-氯仿混合溶液(体积比为 1∶1), 超声提取 15 min 后, 以 4000 r/min 离心 10 min, 取上清液用氮气吹干, 用适量的流动相溶解残留物并过滤, 用高效液相色谱仪进行检测[22]。

1.2.3 抗氧化能力测定

1.2.3.1 DPPH 自由基清除率测定 按照 1∶50(g/mL)制备茶汤试液, 进行 DPPH 自由基清除率测定。用乙醇配制 0.2 mmol/L DPPH 溶液, 称取 3.0 mL 提取液与 3.0 mL DPPH 溶液摇匀, 低温避光保存。于波长 517 nm 处测定吸光度 A_1; 将 3.0 mL 乙醇于 3.0 mL DPPH 溶液混合后, 避光放置 30 min, 于波长 517 nm 处测定吸光度 A_0; 以乙醇作为空白。平行三次, 按照公式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = (1 - A_1/A_0) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中, A_0: 空白对照组吸光度(只加 DPPH+溶剂, 不加样品); A_1: 样品组吸光度(DPPH+样品)。

1.2.3.2 $ABTS^+$自由基清除率测定 参照袁冬演等[23]的方法, 将 7.0 mmol/L ABTS 溶液与 2.45 mmol/L过硫酸钾溶液按体积比 1∶1 混匀后避光放置 12 h 后得到 ABTS 储备液。使用前用甲醇稀释成 734 nm 处吸光值为 0.70±0.02 的工作液。分别取 0.30 mL 样品和 4.0 mL ABTS 工作液混匀, 振荡 30 s 后常温下避光反应 6 min, 于 734 nm 测定吸光值 A_1。0.30 mL 样品溶液于 4.0 mL 甲醇混合测定的吸光值为 A_2, 0.30 mL 蒸馏水与 4.0 mL ABTS 工作液混合测定的吸光值为 A_0。平行三次, 按照公式(2)计算 ABTS 阳离子自由基清除率。

$$\text{ABTS阳离子自由基清除率}(\%) = [1 - (A_1 - A_2)/A_0] \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中, A_0: 空白对照组的吸光度; A_1: 样品反应组的吸光度; A_2: 样品本底对照组的吸光度。

1.2.4 挥发性成分检测

1.2.4.1 样品预处理 将冷冻干燥后的坦洋工夫红茶茶叶样品, 研磨后, 称取 0.1 g 茶粉和 0.2 g 氯化钠固体至 20 mL 的顶空瓶中, 加入 5 mL 的沸腾超纯水, 随后加入磁力转子和 10 μL、10 mg/L 癸酸乙酯内标。使用带 ptfe 硅胶隔垫的压盖小瓶密封, 置于磁力搅拌器加热台上, 在 60 ℃ 下平衡 15 min 后, 将已老化的 50/30 μm CAR/PDMS/DVB 萃取纤维插入样品瓶的顶空部分, 推出纤维头离液 1 cm 处, 萃取纤维在顶空瓶中吸附 30 min, 使样品瓶中的挥发性成分达到平衡的状态。最后将萃取纤维插入气相色谱进样口, 在 250 ℃ 解吸附 5 min。

色谱条件: 采用 DB-5 MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。进样口温度设定为 250 ℃。升温程序如下: 初始柱温为 40 ℃, 保持 5 min; 随后以 6 ℃/min 的速率升温至 130 ℃, 保持 5 min; 再以 6 ℃/min 的速率升温至 250 ℃。载气为氦气, 纯度不低于 99.999%, 流速为 1 mL/min, 采用不分流进样模式, 解吸时间为 5 min[24]。

质谱条件: 采用电子电离源, 电离能量为 70 eV。离子源温度为 230 ℃, 四极杆温度为 150 ℃, 质谱接口温度为 250 ℃, 扫描范围为 35~450 amu。

1.2.4.2 定性定量方法 根据 GC-MS 的目标峰质谱信息进行美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NTST)标准谱库的检索比对; 计算保留指数(Retention Index, RI: 由正构烷烃 C7~C40 测定), 结合文献以及数据库的保留指数进行比对鉴定。

$$RI = 100n + 100[(RT_x - RT_n)/(RT_{n+1} - RT_n)] \quad \text{式(3)}$$

式中: RI 为挥发性的保留指数; n 为该化合物前一碳标的原子数; RT_x 为该化合物的保留时间; RT_n 为该化合物前一碳标的保留时间; RT_{n+1} 为该化合物后一碳标的保留时间。按照公式(4)使用内标法进行定量分析:

$$C_i = C_{is}A_i/A_{is} \quad \text{式(4)}$$

式中: C_i 为挥发性化合物的质量浓度($\mu g \cdot L^{-1}$); C_{is} 为内标的质量浓度($\mu g \cdot L^{-1}$); A_i 为挥发性化合物的色谱峰面积; A_i 为挥发性化合物在水中的香气阈值($\mu g \cdot L^{-1}$)。

1.3 数据处理

1.3.1 数据统计 使用 SPSS 21 软件采用 LSD 多重比较方法在 0.05 水平上进行单因素方差分析; 挥发性代谢物的主成分分析和正交偏最小二乘判别分析运用 SIMCA 14.1 构建相关模型, 实现对样品类别的预测。使用 SPSSPRO(https://www.spsspro.com)进行灰色关联度法、隶属函数法和熵权 TOPSIS 法

分析，用 Excel 2021 加权关联度进行计算，TBtools 1.1043 软件进行热图绘制，采用 Origin 2021 绘图。

1.3.2　层次分析　层次分析法借鉴前人的研究方法[25]赋予权重，构建包含三个层次的综合评价模型。该模型的目标层为适制花果香型坦洋工夫红茶的种质资源，准则层涵盖三个指标，分别是感官指标、挥发性物质指标以及儿茶素、茶氨酸等非挥发性物质指标。通过邀请 6 位行业专家对各指标的重要性进行评分，确定各指标的评分结果并计算出准则层及指标层的权重值并进行验证。

1.3.3　灰度计算　通过处理各指标测试结果的平均值，将数据转化为无量纲化处理。根据灰色系统理论，计算灰度关联系数，公式(5)如下[26]：

$$\zeta_i(k)=x=\frac{\min_i\min_k\Delta_i(k)+\rho\max_i\max_k\Delta_i(k)}{\Delta_i(k)+\rho\max_i\max_k\Delta_i(k)} \quad 式（5）$$

其中，$\zeta_i(k)$为关联系数；$\Delta_i(k)$为第 i 个品种第 k 个指标无量纲化处理后测量值与理想值的绝对插值；ρ为分辨系数，常取 0.5。

计算加权灰色关联度。层次分析法所定各指标权重值代入公式(6)中，求得各品种加权关联度。

$$r^*=\sum_1^N\omega\times\zeta_i(k) \quad 式（6）$$

其中，r^*为第 i 个品种的灰色关联度；$\zeta_i(k)$为关联系数；ω为此指标权重值。

1.3.4　隶属函数法　该部分采用隶属函数法对各茶树种质的感官品质指标、成茶生化成分指标、挥发性物质指标共 16 个指标进行综合评定。采用公式(7)和公式(8)对各指标变量测定值进行标准化处理：

$$X_{(u)正}=(x-x_{min})/(x_{max}-x_{min}) \quad 式（7）$$

$$X_{(u)反}=(x_{max}-x)/(x_{max}-x_{min}) \quad 式（8）$$

式中，X为各个种质的某个测定指标定值；x_{max}为该指标在所有参试种质中的最大值；x_{min}为该指标在所有参试种质中的最小值。指标与感官审评得分正相关，则用正隶属函数(7)进行计算，反之则用反隶属函数(8)进行计算。各种质所有适制性评价指标的隶属值累加后求平均数，数值越大表明该种质花果香型坦洋工夫红茶适制性越强[27]。

1.3.5　熵权 TOPSIS 法　参冯晓莉等[28]的研究方法。按照公式(9)计算各供试种质的指标占全部品种指标值之和的比重P_{ij}。

$$P_{ij}=\frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \quad 式（9）$$

参考公式(10)计算各项指标的信息熵E_j；其中，m 代表检测指标数量。

$$E_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{j=1}^m P_{ij}\ln P_{ij} \quad 式（10）$$

根据公式(11)计算各项指标的熵权W_j：

$$W_j=\frac{1-E_j}{\sum_{j=1}^m(1-E_j)} \quad 式（11）$$

2　结果与分析

2.1　不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶感官品质分析

图 1 显示，8 个品种花果香型坦洋工夫红茶的感官评审综合得分范围为 84.15~92.45，‘金牡丹’以 92.45 分排名第一，其后依次为‘黄观音’(HGY)、‘梅占’(MZ)、‘福云七号’(FYQ)、‘金观音’(JGY)、‘福鼎大毫’(FDDH)、‘福云六号’(FYL)，‘福安菜茶’(CC)排名最末(图 1)。以‘金牡丹’品种鲜叶制备的花果香型坦洋工夫红茶在香气、滋味等关键指标上均表现突出，这与陈林海[29]基于香气组分分析提出的‘金牡丹’最适制坦洋工夫红茶结论一致。

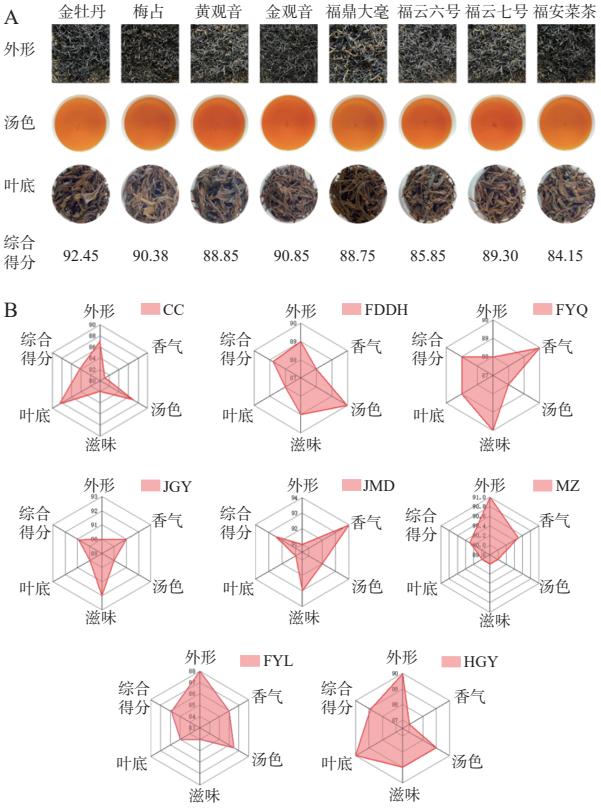


图 1　不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶感官评审(A)和雷达图(B)

Fig.1　Sensory evaluation (A) and radar charts (B) of flower-fruit-scented TanYang congou black tea of different tea cultivar

注：‘金牡丹’(JMD)、‘金观音’(JGY)、‘黄观音’(HGY)、‘梅占’(MZ)、‘福鼎大毫’(FDDH)、‘福云六号’(FYL)、‘福云七号’(FYQ)、‘福安菜茶’(CC)。

2.2　不同茶树品种非挥发性物质含量差异分析

分析了 8 个不同茶树品种所制花果香型坦洋工夫红茶的非挥发性物质(茶氨酸、咖啡碱和儿茶素)的含量，如图 2、图 3 所示。茶氨酸作为茶叶鲜爽味和香气前体的关键物质[30]，其含量的高低不仅与品质呈正相关，也是加工中通过美拉德反应生成丰富香气化合物的重要基础[31]。‘福鼎大毫’(FDDH)鲜叶加工的红茶含量最高，‘金牡丹’(JMD)次之，‘黄观音’(HGY)

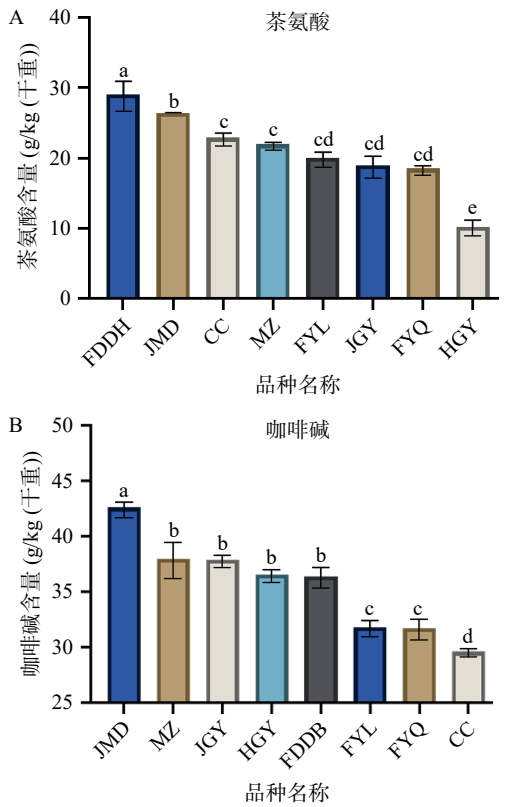


图 2 不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶茶氨酸(A)、咖啡碱(B)含量

Fig.2 Contents of theanine (A), caffeine (B) in flower-fruit-scented TanYang congou black tea from different tea cultivars

注：‘金牡丹’(JMD)、‘金观音’(JGY)、‘黄观音’(HGY)、‘梅占’(MZ)、‘福鼎大毫’(FDDH)、‘福云六号’(FYL)、‘福云七号’(FYQ)、‘福安菜茶’(CC)；不同字母表明不同品种间存在显著性差异(P<0.05)，图 3、图 4 和图 6 同。

的含量最低(图 2A)。咖啡碱通过与茶黄素络合增强茶汤鲜爽度[32]，在‘金牡丹’(JMD)鲜叶加工的红茶中最高(P<0.05)，其后依次为‘梅占’、‘金观音’、‘黄观音’，‘福鼎大毫’，‘福云六号’、‘福云七号’，‘福安菜茶’含量最低(图 2B)。‘金牡丹’所制红茶具体理化指标为：茶氨酸 26.44 g/kg，咖啡碱 42.64 g/kg，EGCG 10.21 g/kg，EGC 8.66 g/kg，EC 2.21 g/kg。儿茶素组分的组成直接影响滋味特性(酯型儿茶素苦涩收敛性强，非酯型儿茶素涩弱回甘)[33]，不同茶树品种加工的红茶中，儿茶素各组分的含量呈现明显的品种特异性(图 3A~图 3E)，其中‘福云六号’(FYL)鲜叶制成的红茶中儿茶素 C 含量最高；‘福云七号’(FYQ)中 EC 和 EGC 含量最高；‘梅占’(MZ)中 ECG 含量最高。值得注意的是，‘金牡丹’鲜叶加工的红茶中，EGCG 含量为所有品种中最高，而 C、EC、EGC 的含量均位居第二(仅次于各自对应的最高品种)，ECG 含量则为最低。从儿茶素类型分析，酯型儿茶素(EGCG、ECG)的苦涩味及收敛性强度显著高于非酯型儿茶素(C、EC、EGC)。‘金牡丹’虽 EGCG 含量最高，但其 ECG 含量最低，一定程度上削弱了酯型儿茶素的总体强度；同时，其非酯型儿茶素均处于次高水平，有助于提供茶汤的厚度与鲜爽感。该组成特征表明，‘金牡丹’的儿茶素构成呈现“高 EGCG、低 ECG、非酯型次优”的独特模式，其感官品质并非单一成分主导，而是酯型与非酯型儿茶素协同作用的结果。综上，‘金牡丹’在咖啡碱、儿茶素和茶氨酸等多个品质指标上均名列前茅，为其优良的感官品质奠定了坚实的物质基础。

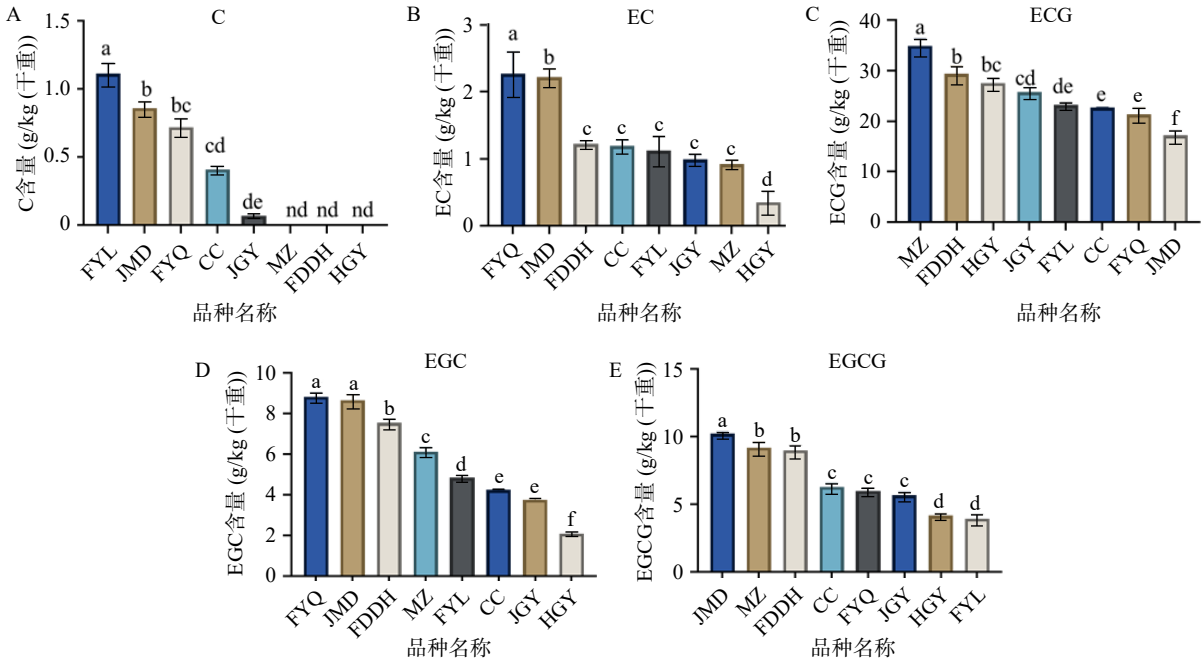


图 3 不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶儿茶素含量

Fig.3 Contents of catechin fractions in flower-fruit-scented TanYang congou black tea from different tea cultivars

注：‘金牡丹’(JMD)、‘金观音’(JGY)、‘黄观音’(HGY)、‘梅占’(MZ)、‘福鼎大毫’(FDDH)、‘福云六号’(FYL)、‘福云七号’(FYQ)、‘福安菜茶’(CC)。

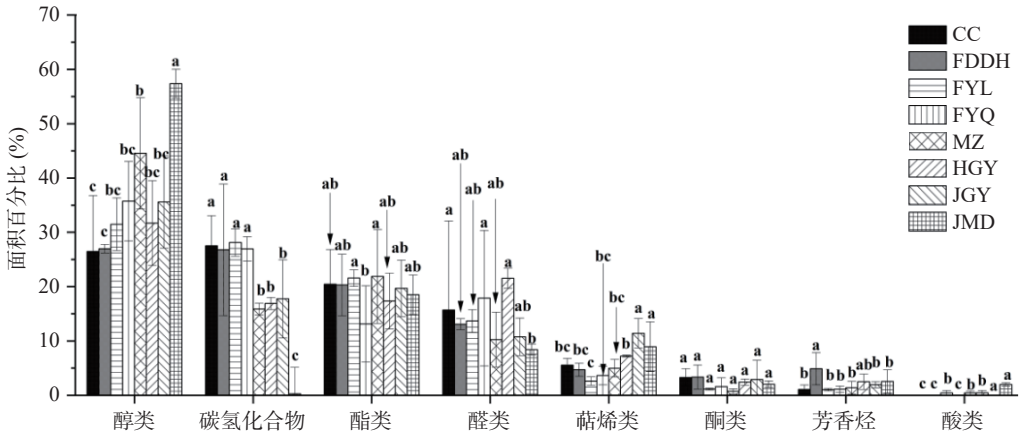


图 4　不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶挥发性化合物类型百分比

Fig.4　Percentage of volatile compound types in flower-fruit-scented tanyang congou black tea from different tea cultivars

2.3　不同茶树品种的挥发性物质差异分析

茶叶的整体香气特征源于多种挥发性成分在相对含量、比例、香型及强度等因素协同作用的结果[34]。本研究系统分析了 8 个供试茶树品种所制花果香型坦洋工夫红茶的挥发性成分(表 1)，不同树种鲜叶制成的干茶样品中，醇类物质相对含量最高，依次为碳氢化合物、酯类、醛类、萜烯类、酮类、芳香烃，酸类物质相对含量最低。在挥发性物质种类数量上，‘金牡丹’(JMD)最为丰富(70 种)，约为‘福安菜茶’(CC，35 种)和‘金观音’(JGY，34 种)的 2 倍。‘黄观音’(HGY)次之(62 种)，‘梅占’(MZ)居中(49 种)，福云系列(FYL/FYQ)与‘福鼎大毫’(FDDH)的挥发性物质种类介于 38~41 种区间。

表 1　不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶干茶样挥发性化合物的种类

Table 1　Volatile compounds in dry tea samples of flower-fruit-scented tanyang congou black tea from different tea cultivars

序号	香气类型	挥发性化合物种类数量							
		CC	FDDH	FYL	FYQ	MZ	HGY	JGY	JMD
1	醇类	4	7	9	8	8	6	2	11
2	醛类	4	6	10	10	11	16	8	11
3	酮类	3	3	2	2	1	2	3	7
4	萜烯类	6	9	3	7	9	9	7	15
5	酯类	8	5	6	8	13	8	6	16
6	碳氢化合物	7	5	6	4	3	11	4	3
7	芳香烃类	3	4	2	2	3	10	3	6
8	酸类	/	/	/	/	1	/	1	1
	总成分	35	39	38	41	49	62	34	70

注：/：未检出。

醇类化合物在 8 种红茶中的相对含量如图 4 所示。鉴于醇类物质主要呈现出花果香、甜香等气味特征。其相对含量分布与各品种坦洋工夫红茶表现出的花果香特性相符，其中以‘金牡丹’品种鲜叶制备的花果香型坦洋工夫红茶(JMD)的挥发性物质种类丰富(70 种)、醇类化合物占比优势(57.36%)，为感官审评中“浓郁持久的花果香”特征提供了挥发性化学基础。

为了深入分析不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶的挥发性物质差异，本文进一步应用了正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)模型。模型参数显示良好的拟合与预测能力：自变量拟合指数(R^2x)为 0.994，因变量拟合指数(R^2y)为 0.935，模型预测指数(Q^2)为 0.985(图 5A)。根据模型评价标准，(R^2 与 Q^2>0.5)，模型结果可信。OPLS-DA 模型显示(图 5A)，‘金观音’(JGY)、‘黄观音’(HGY)、‘福云七号’(FYQ)和‘梅占’(MZ)分布于横轴负半轴，其中‘金观音’与其他品种区分最显著，其次为‘福云七号’，‘梅占’与‘黄观音’差异较小。‘金牡丹’(JMD)、‘福鼎大毫’(FDDH)、‘福安菜茶’(CC)和‘福云六号’(FYL)则分布于横轴正

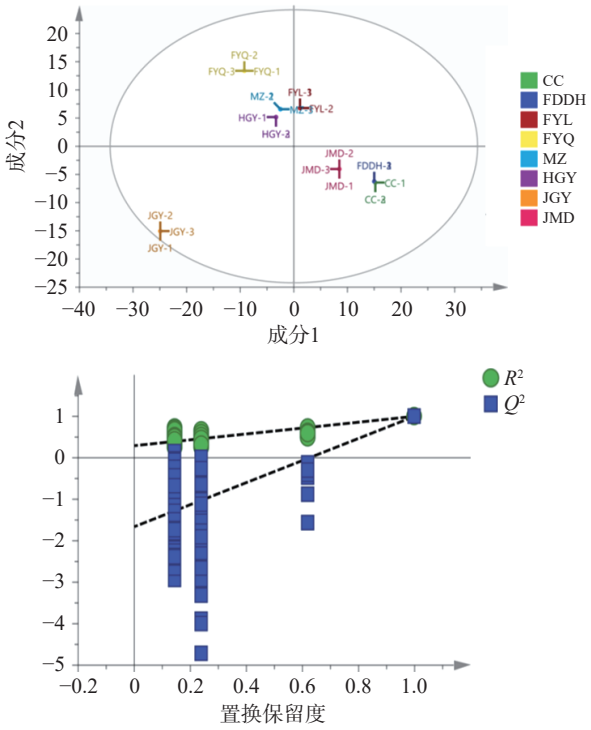


图 5　不同品种花果香型坦洋工夫红茶的 OPLS-DA(A)和模型交叉验证结果(B)

Fig.5　OPLS-DA (A) and model cross-validation results (B) for different varieties of floral and fruity aroma-type TanYang congou black tea

表 2 7 个关键香气化合物的相对含量

Table 2 Relative content of 7 key aroma compound

序号	香气成分	质量浓度(μg/L)							
		CC	FDDH	FYL	FYQ	MZ	HGY	JGY	JMD
1	己醛Hexanal	3.90	4.90	14.35	8.40	9.59	20.77	10.38	6.06
2	芳樟醇Linalool	45.74	12.01	32.69	155.07	100.66	66.12	54.51	28.39
3	柠檬醛Neral	/	/	3.79	0.69	4.92	3.52	1.61	3.95
4	香叶醇Geraniol	85.86	26.16	158.87	61.53	257.57	150.90	135.23	323.39
5	反式-β-紫罗兰酮Trans-β-ionone	5.64	1.97	5.51	3.05	3.75	4.70	3.08	5.47
6	反式-橙花叔醇Trans-nerolidol	5.41	3.82	0.00	2.39	2.88	14.06	8.88	8.94
7	苯乙醛Benzaldehyde	5.32	11.20	12.22	18.87	7.38	20.46	9.49	13.98

注: /: 未检出。

半轴, ‘金牡丹’与其余三个品种差异显著, 而‘福鼎大毫’与‘福安菜茶’差异较小, ‘福云六号’、‘梅占’和‘福云七号’之间差异亦较小。

模型的交叉验证(图 5B)与置换验证结果进一步证实了其可靠性: R^2 值接近 1, 表示模型对数据的拟合优度高。Q^2 值接近 1 说明预测能力强。置换验证中 Q^2 回归线的交点在零以下, 表明模型无过拟合现象。综上, 模型的拟合效果良好, 该 OPLS-DA 模型能有效区分和预测不同品种红茶的挥发性成分特征。

鉴于芳樟醇和香叶醇是红茶的特征性香气成分, 其香气阈值分别为 6 g/kg[35] 和 40 g/kg[36], 且二者比例显著影响红茶香型[29]。前期课题组鉴定出 7 种花果香型坦洋工夫红茶的关键香气化合物[37](表 2): 醇类(芳樟醇、香叶醇、反式-橙花叔醇), 醛类(已醛、柠檬醛、苯乙醛)及酮类(反式-β-紫罗兰酮)。其中香叶醇是区分香气强度的核心指标, ‘金牡丹’(JMD)以 323.39 μg/L 的高相对含量奠定其"浓郁持久花果香"的物质基础; ‘梅占’、‘黄观音’(HGY)和‘金观音’(JGY)亦因较高香叶醇相对含量呈现明显花果香特征。芳樟醇相对含量差异显著影响香型多样性, ‘福云七号’(FYQ)以最高相对含量形成独特香韵, 其与香叶醇的比例差异是香型分化的关键。反式-橙花叔醇以‘黄观音’(HGY)相对含量最高, ‘金牡丹’(JMD)和‘金观音’(JGY)次之, 丰富了香气层次。醛类成分中, 己醛在‘黄观音’(HGY, 20.77 μg/L)和‘福云六号’(FYL)较高, 苯乙醛在‘黄观音’(HGY)和‘福云七号’(FYQ)突出, 柠檬醛在‘梅占’(MZ)和‘福云六号’(FYL)相对显著。

感官特征与化学成分高度关联: ‘金牡丹’(JMD)因关键花果香组分(醇/萜烯/酯类占总量 60%)的全面优势及香叶醇绝对优势, 与感官最优评价一致; ‘黄观音’(HGY)虽总成分种类多, 但核心醇类种类匮乏且香叶醇相对不足, 可能导致香气饱满度欠佳; ‘福安菜茶’(CC)总成分最少, 醇醛类基础弱, 但酯类及苯乙醛支撑其主要香气[29,36−37]。综上, 本研究明确了香叶醇、芳樟醇和反式-橙花叔醇是构成花果香型坦洋工夫红茶特征香气的核心醇类物质, 其相对含量及比例的品种间差异是导致香气类型多样化和品质优劣的关键化学基础。‘金牡丹’品种因其在关键花果香物质(尤其是香叶醇)上的显著优势, 展现出最优异的感官品质。

2.4 抗氧化能力分析

为了进一步分析品种间的差异性, 对各个品种抗氧化能力进行分析(图 6)。‘福安菜茶’、‘金牡丹’、‘梅占’和‘金观音’这四个表现出较强 DPPH 自由基清除率, 这一结果与非挥发物质的含量对应, 这些品种中多酚类化合物如儿茶素、黄酮类等含量较高。ABTS 阳离子清除率无显著差异(P>0.05)。

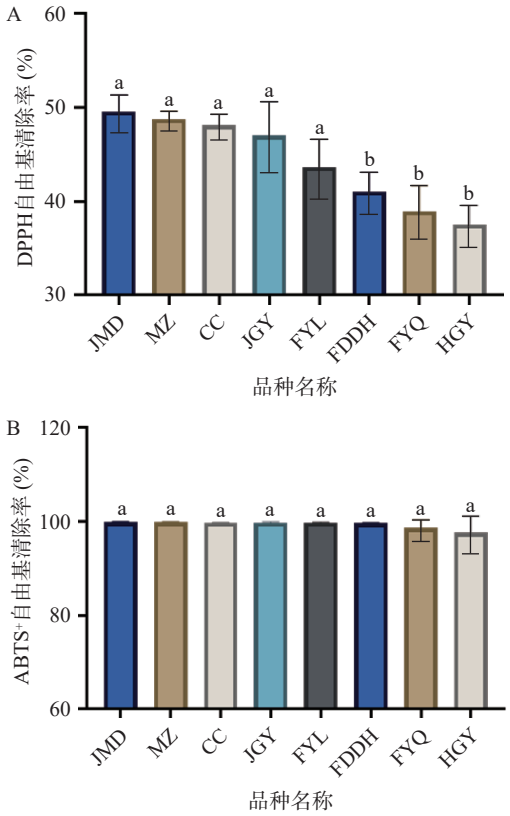


图 6 不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶 DPPH 自由基清除率(A)和 $ABTS^+$自由基清除率(B)

Fig.6 DPPH· scavenging rate (A) and $ABTS^{+}$· scavenging rate (B) of flower-fruit-scented TanYang congou black tea prepared with different tea cultivar

2.5 不同茶树品种花果香型坦洋工夫红茶适制性评价

近年来, 层次分析-灰色关联度法、隶属函数法

和熵权-TOPSIS 法等方法在品质评价领域被广泛应用[38−40]。本研究采用这几种方法对参试茶树种质的花果香型坦洋工夫红茶适制性进行了综合评价，结果如表 3 所示。三种方法均一致表明‘金牡丹’(JMD)的适制性最优，其加权关联度、隶属度值和相对接近度 C 值均位列第一。‘梅占’(MZ)在灰色关联度法中排名第二，在隶属函数法和熵权-TOPSIS 法中分别位列第三和第四。‘金观音’(JGY)在隶属函数法中排名第二，在灰色关联度法和熵权-TOPSIS 法中分列第五和第三。值得注意的是，‘福鼎大毫’(FDDH)在熵权-TOPSIS 法中表现突出，排名第二，明显优于其在灰色关联度法和隶属函数法中的位置。‘福安菜茶’(CC)、‘福云七号’(FYQ)、‘福云六号’(FYL)在三种方法中综合评价均靠后。

表 3　不同评价方式对不同茶树种质花果香型坦洋工夫红茶适制性的综合评价排名表

Table 3　Comprehensive evaluation ranking table of different assessment methods for the suitability of various tea germplasm

种质	层次分析+灰色关联度		隶属函数		熵权+TOPSIS	
	加权关联度	排序	属值	排序	相对接近度C	排序
JMD	0.978	1	0.737695	1	0.730113	1
MZ	0.935	2	0.559995	3	0.377366	4
CC	0.876	7	0.351804	7	0.342245	7
JGY	0.91	5	0.561739	2	0.41954	3
HGY	0.92	3	0.454518	5	0.359834	5
FYL	0.849	8	0.285448	8	0.303484	8
FYQ	0.914	4	0.38439	6	0.344682	6
FDDH	0.903	6	0.555145	4	0.425918	2

评价方法的选择与验证对结果的可靠性至关重要。相关性分析(图 7)显示，层次分析-灰色关联度法(r=0.87)和隶属函数法(r=0.86)所得结果与感官审评综合得分均呈极显著正相关，表明这两种方法能更准确地反映花果香型坦洋工夫红茶的适制性，这与王轩[40] 及刘丙花等[41−42] 的研究结论一致。然而，熵权-TOPSIS 法结果与感官审评得分的相关性(r=0.69)未达显著水平(P>0.05)，其评价体系更侧重化学成分指标(如酸类、酮类、芳香烃)而弱化了感官指标权重，可能是导致‘福鼎大毫’排名差异的原因。尽管如此，‘金牡丹’在三种方法中均排名第一，其作为最佳适制品种的结论具有高度一致性。

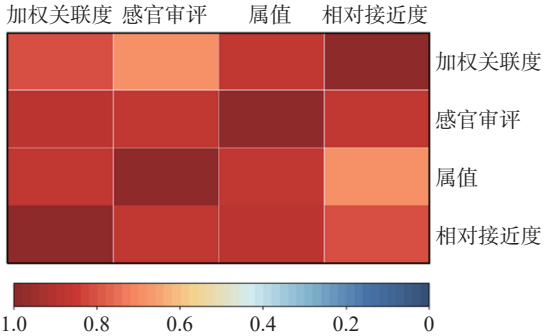


图 7　感官审评得分与三种评价方法的相关性分析

Fig.7　Correlation analysis between sensory evaluation scores and three evaluation methods

3　结论

本研究选用了福安市 8 个主栽茶树品种(‘福安菜茶’、‘福云六号’、‘福云七号’、‘福鼎大毫’、‘金牡丹’、‘金观音’、‘黄观音’和‘梅占’)为对象，通过感官审评、非挥发性成分(氨基酸/咖啡碱/儿茶素等)、挥发性物质及抗氧化能力等多维指标，结合层次分析赋权结合灰色关联度法、隶属函数法和熵权 TOPSIS 法对评价其对花果香型坦洋工夫红茶的适制性。‘金牡丹’(JMD)品种花果香型坦洋工夫红茶浓郁持久花果香特征显著，滋味浓强鲜爽，与香气/滋味相关的灰色关联度与隶属函数评分均居首位；物质种类最丰富(70 种)，醇类占比最高(57.36%±2.65%)，且香叶醇相对含量(323.39 μg/L)较高。灰色关联度法与隶属函数法的评价结果与感官审评一致性最高，‘金牡丹’品种最适制花果香型坦洋工夫红茶。

© 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] DING Z Z, YANG C S, HU B, et al. Lightweight CNN combined with knowledge distillation for the accurate determination of black tea fermentation degree[J]. Food Research International, 2024, 194: 114929.

[2] China Tea Circulation Association. 2023 Annual report on china tea production and sales situation[EB/OL]. (2024-04-16)[2024-06-13]. https://mp.weixin.qq.com/s/JL0ww7dHZKaGexvKXoiaA.

[3] 福安市茶业协会. T/FACX 001-2018 花果香坦洋工夫 闽科红[S]. 北京：中国标准出版社, 2018. [Fuan Tea Industry Association. T/FACX-2018 TanYang gongfu tea with floral-fruity aroma flavour minkehong black tea group standard[S]. Beijing: Standard Press of China, 2018.]

[4] FENG Y, WANG J, ZHAO Y, et al. Biosynthesis of orchid-like volatile methyl jasmonate in tea (*Camellia sinensis*) leaves in response to multiple stresses during the shaking process of oolong tea[J]. LWT- Food Science and Technology, 2021(17): 111184.

[5] WANG J J, OUYANG W, ZHU X Z, et al. Effect of shaking on the improvement of aroma quality and transformation of volatile metabolites in black tea[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101007.

[6] YIN X, XIAO Y B, WANG K F, et al. Effect of shaking manners on floral aroma quality and identification of key floral-aroma-active compounds in Hunan black tea[J]. Food Research International, 2023, 174: 113515.

[7] WANG Y J, HUANG L F, DENG G J, et al. The shaking and standing processing improve the aroma quality of summer black tea[J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139772.

[8] FENG J, ZHUANG J Y, CHEN Q L, et al. The effect of maturity of tea leaves and processing methods on the formation of milky flavor in white tea-A metabolomic study[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 139080.

[9] LI P L, DAI W D, LU M L, et al. Metabolomic analysis reveals the composition differences in 13 Chinese tea cultivars of different manufacturing suitabilities[J]. Journal of the Science of Food

and Agriculture, 2018, 98(3): 1153−1161.
[10] 纪鹏彬, 李新生, 燕飞, 等. 茶叶适制性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 219−224. [JI P B, LI X S, YAN F, et al. Research progress on tea suitability[J]. Food Res Dev, 2021, 42(13): 219−224.]
[11] 江新凤, 李琛, 曹辉华, 等. 江西省丘陵红壤地区主栽茶树品种的工夫红茶适制性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(24): 281−288. [JAING X F, LI C, CAO H H, et al. Main tea varieties in hilly red soil areas of jiangxi province for congou black tea processing[J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(24): 281−288.]
[12] 杨娟, 李中林, 袁林颖, 等. 不同茶树品种夏季鲜叶工夫红茶适制性比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(13): 4242−4248. [YANG J, LI Z L, YUAN L Y, et al. Comparison of the suitability of different tea varieties fresh leaves in summer for congou black tea production[J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(13): 4242−4248.]
[13] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119−121. [YU X F, FU D. Multi-index comprehensive evaluation methods[J]. Statistics Decis, 2004(11): 119−121.]
[14] GE F H, WANG H S, et al. Evaluation of germination response and the resistance of maiplant species seedling to drought stress in the hill-gullied Loess Plateau region of northern Shaanxi [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(2): 348−356.
[15] SCHAAD N W, ABRAMS J, MADDEN L V, et al. An assessment model for rating high-threat crop pathogens[J]. Phytopathology®, 2006, 96(6): 616−621.
[16] 李华鑫. 豫南引进茶树品种生育特性比较及综合评价体系建立[D]. 郑州: 河南农业大学, 2010. [LI H X. Comparison of growth characteristics of introduced tea varieties in southern henan and establishment of comprehensive evaluation system[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010.]
[17] 王治会, 彭华, 杨普香, 等. 基于多元统计法的赣育茶树新品系评价[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 540−548. [WANG Z H, PENG H, YANG P X, et al. Evaluation of new tea strains in jiangxi province based on multivariate statistical method[J]. Jiangxi Agricultural University, 2022, 44(3): 540−548.]
[18] 陈辉煌. 基于福安生态茶园建设的几点思考[J]. 福建茶叶, 2024, 46(1): 123−125. [CHEN H H. Reflections on the construction of Fu'an ecological tea garden[J]. Fujian Tea, 2024, 46(1): 123−125.]
[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 23776-2018 茶叶感官审评方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 23776-2018 Methodology for sensory evaluation of tea[S]. Beijing: Standard Press of China, 2018.]
[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8303-2018 茶 茶多酚和儿茶素类含量的检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 8303-2018 Tea - Determination of tea polyphenols and catechins content[S]. Beijing: Standard Press of China, 2018.]
[21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 23193-2017 茶叶中茶氨酸的测定 高效液相色谱法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 23193-2017 Determination of theanine in tea - High performance liquid chromatography[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.]
[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 8312-2013 茶 咖啡碱测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 8312-2013 Tea - Determination of caffeine[S]. Beijing: Standard Press of China, 2013.]
[23] 袁冬演, 张芬, 陈家献, 等. 不同虫茶及其植物原料的抗氧化作用效果比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 310−319. [YUAN D Y, ZHANG F, CHEN J X. Comparison of antioxidant effects of different insect teas and their plant raw materials[J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(3): 310−319.]
[24] 朱晓凤, 刘政权, 宛晓春, 等. SDE 和 HS-SPME 结合 GC-MS 分析霍山黄大茶香气成分的比较[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 214−221. [ZHU X F, LIU Z Q, WAN X C, et al. Comparison of simultaneous distillation and extraction and headspace-solid phase microextraction for analysis of aroma components of huoshan large-leaf yellow tea by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Sci, 2020, 41(4): 214−221.]
[25] 邓健康, 刘璇, 吴昕烨, 等. 基于层次分析和灰色关联度法的苹果(等外果)汁品质评价[J]. 中国食品学报, 2017, 17(4): 197−208. [DENG J K, LIU X, WU X Y, et al. Quality evaluation of apple (substandard) juice from different cultivars based on analytic hierarchy process and grey interconnect degree analysis[J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2017, 17(4): 197−208.]
[26] 雷雨, 段继华, 黄飞毅, 等. 灰色综合评判在茶树育种中的应用[J]. 分子植物育种, 2021, 19(5): 1724−1730. [LEI Y, DUAN J H, HUANG F Y, et al. Application of grey comprehensive evaluation in tea breeding[J]. Mol Plant Breed, 2021, 19(5): 1724−1730.]
[27] 席嘉宾, 陈平, 张惠霞, 等. 中国地毯草野生种质资源耐旱性变异的初步研究[J]. 草业学报, 2006(3): 93−99. [XI J B, CHEN P, ZHANG H X, et al. Studies on the drought tolerance of wild germplasm resources of *Axonopus compressus* in China[J]. Acta Pratacult Sin, 2006(3): 93−99.]
[28] 冯晓莉, 李成义, 魏舒畅, 等. 基于主观赋值结合熵权 TOPSIS 法综合评价不同产地黄花菜质量[J]. 中国现代应用药学, 2022, 39(22): 2927−2934. [FENG X L, LI C Y, WEI S C, et al. Comprehensive evaluation of quality of *Hemerocallis citrina* Baroni from different regions based on subjective assignment combined with entropy TOPSIS method[J]. Chin J Mod Appl Pharm, 2022, 39(22): 2927−2934.]
[29] 陈林海. 基于同时蒸馏萃取-气质联用法(SDE-GC-MS)分析不同品种原料坦洋工夫红茶的香气组分[J]. 茶叶学报, 2023, 64(6): 51−63. [CHEN L H. Analysis of aroma components in Tanyang Gongfu black tea of different tea varieties by simultaneous distillation extraction-gas chromatography-mass spectrometry (SDE-GC-MS)[J]. Acta Tea Sin, 2023, 64(6): 51−63.]
[30] ZHOU Z W, WU Q Y, CHEN L Q, 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.
[31] OWUOR P O, TSUSHIDA T, HORITA H, et al. Effects of artificial withering on the chemical composition and quality of black tea[J]. Tropical Science, 1987, 27: 159−166.

［32］林岱, 李冰洁, 周建武, 等. 红茶滋味成分多相分布的研究[J]. 茶叶科学，2017, 37(4)：347−355. ［LIN D, LI B J, ZHOU J W, et al. Multiphase distribution of taste components in black tea infusion[J]. Journal of Tea Science, 2017, 37(4)：347−355. ］
［33］王淑燕, 赵峰, 饶耿慧, 等. 基于电子鼻和 ATD-GC-MS 技术分析茉莉花茶香气成分的产地差异[J]. 食品工业科技，2021, 42(15)：234−239. ［WANG S Y, ZHAO F, RAO G H, et al. Analysis of origin differences in aroma components of jasmine tea based on electronic nose and ATD-GC-MS[J]. Food Ind Tech, 2021, 42(15)：234−239. ］
［34］刘威, 张永瑞, 鲁静, 等. 不同加工工艺刺槐花代用茶香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1)：250−256. ［LI C, YUE C N, YANG P X, et al. Research progress on characteristic aroma of congou black tea[J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(22)：8834−8842. ］
［35］孙磊, 钱旭, 张国军, 等. ‘香妃’和‘早玫瑰香’葡萄温室与露地栽培单萜积累差异分析[J]. 园艺学报，2018, 45(8)：1467−1478. ［SUN L, QIAN X, ZHANG G J, et al. Comparative analysis of monoterpene accumulation in 'Xiangfei' and 'Zao Meiguixiang' grapes between greenhouse and open-field cultivation[J]. Acta Hortic Sin, 2018, 45(8)：1467−1478. ］
［36］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.
［37］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 H M. Quality analysis of 29 tea germplasms for white tea production and construction of suitability evaluation system[D]. Fuzhou: Fujian Agricultural University, 2023. ］
［38］卢磊, 唐金. 基于灰色关联度和层次分析法的不同富士系品种果实品质评价[J]. 天津农业科学, 2024, 30(3)：43-47, 52. ［LU L, TANG J. Comprehensive evaluation of different fuji apple cultivars based on grey relational analysis and analytic hierarchy process[J]. Tianjin Agricultural University, 2024, 30(3)：43-47. ］
［39］和智坚, 李毓萍, 张倩薇, 等. 基于德尔菲法和层次分析法构建川茶营养健康评价指标体系[J]. 食品与发酵科技，2025, 61(1)：132−141. ［HE Z J, LI Y P, ZHANG Q W, et al. Construction of nutritional and health evaluation index system for sichuan tea based on delphi method and analytic hierarchy process[J]. Food Ferment Sci Technol, 2025, 61(1)：132−141. ］
［40］王轩. 不同产地红富士苹果品质评价及加工适宜性研究[D]. 北京：中国农业科学院, 2013. ［WANG X. Research on quality evaluation and processing suitability of fuji apples from different regions[D]. Beijing: Chinese Acad Agric Sci, 2013. ］
［41］刘丙花, 唐贵敏, 梁静, 等. 基于隶属函数法评价 15 个石榴品种（系）果实品质[J]. 山东农业科学，2024, 56(11)：68−75. ［LIU B H, TANG G M, LIANG J, et al. Evaluation of fruit quality of 15 pomegranate varieties（lines）based on membership function method[J]. Shandong Agricultural Science, 2024, 56(11)：68−75. ］
［42］韩晓, 刘凤之, 谢计蒙, 等. 四种综合评价法对不同葡萄品种设施环境适应性的评价和比较[J]. 植物生理学报，2017, 53(12)：2235−2243. ［HAN X, LIU F Z, XIE J M, et al. Evaluation and comparison of four comprehensive evaluation methods on the adaptability of different grape cultivars to facility environments[J]. Plant Physiol J, 2017, 53(12)：2235−2243. ］