

不同处理清香型铁观音茶感官品质及生化成分与香气成分分析

周炎花¹, 冯花², 杨双旭¹, 沈丹玉³, 谢杰全⁴, 郭雅玲⁵, 王飞权^{2*}

(1. 闽北职业技术学院管理系, 福建南平 353011)(2. 武夷学院茶与食品学院, 福建武夷山 354300)
(3. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江杭州 311400)(4. 福建省日进茶叶有限公司, 福建漳州 363806)
(5. 福建农林大学园艺学院, 福建福州 350002)

摘要: 为探究不同摇青处理对清香型铁观音单叶茶品质的影响, 以中开面三叶嫩梢四次摇青 (CK1) 和单叶四次摇青 (CK2) 为对照, 分别设置单叶 2 次摇青 (DY1) 和单叶 3 次摇青 (DY2) 处理, 对四种处理所制茶叶的感官品质、主要生化成分和香气成分进行了比较。结果表明, CK2 感官品质综合得分 (93.10 分) 显著高于其他处理 ($P<0.05$)。摇青次数的增加, 可降低铁观音“单叶茶”中水浸出物、茶多酚、咖啡碱等含量及酚氨比值, 增加氨基酸等的含量。从 4 组不同处理样本中共检测出 76 个香气成分, 分属 10 大类; 基于香气成分相对含量建立的 PCA 和 PLS-DA 模型可有效区分不同处理的茶叶样品; 进一步以 $VIP>1$ 、 $P<0.05$ 、 $OAV>10$ 为筛选条件, 确定芳樟醇、吲哚、橙花叔醇等 11 种组分为导致样本间香气品质差异的关键呈香物质。本研究结果为清香型铁观音单叶茶的工艺创新与品质提升提供了理论依据。

关键词: 清香型铁观音; 单叶茶; 感官品质; 生化成分; 香气成分

文章编号: 1673-9078(2026)5-346-356

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0271

Sensory Quality, Biochemical Components, and Aroma Profiles of Light-scented Tieguanyin Tea Under Different Shaking Treatments

ZHOU Yanhua¹, FENG Hua², YANG Shuangxu¹, SHEN Danyu³, XIE Jiequan⁴, GUO Yaling⁵, WANG Feiquan^{2*}

(1. Department of Management, Minbei Vocational and Technical College, Nanping 353011, China)
(2. College of Tea and Food Science, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)(3. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China)(4. Rijin Tea Co. Ltd., Zhangzhou 363806, China)
(5. College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: To investigate the effects of different shaking treatments on the quality of light-scented Tieguanyin single-leaf tea, four processing treatments were designed. Four-time shaking of moderately opened three-leaf shoots (CK1) and four-time shaking of single leaves (CK2) were used as controls, while two-time shaking (DY1) and three-time shaking (DY2) of single leaves were applied as experimental treatments. The sensory quality, major biochemical components, and aroma composition of teas produced under these treatments were systematically compared. The results showed that the comprehensive sensory quality score of CK2

引文格式:

周炎花, 冯花, 杨双旭, 等. 不同处理清香型铁观音茶感官品质及生化成分与香气成分分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 346-356.

ZHOU Yanhua, FENG Hua, YANG Shuangxu, et al. Sensory quality, biochemical components, and aroma profiles of light-scented tieguanyin tea under different shaking treatments [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 346-356.

收稿日期: 2024-10-26; 修回日期: 2025-06-19; 接受日期: 2025-06-23

基金项目: 中央引导地方科技发展专项 (2021L3058); 南平市科技特派员创新创业大赛项目 (N2023T028); 武夷学院校企联合项目 (2024ZXH02)

作者简介: 周炎花 (1983-), 女, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 茶叶加工与品质控制, E-mail: 329092172@qq.com

通讯作者: 王飞权 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 茶树种质资源与茶叶生物化学, E-mail: hanxi2000827@163.com

(93.10 points) was significantly higher than those of the other treatments ($P<0.05$). In single-leaf teas (DY1 and DY2), increasing the number of shakings led to significant decreases in the contents of water extract, tea polyphenols, caffeine, and the phenol-to-amino acid ratio, while the amino acid content increased significantly. A total of 76 aroma compounds belonging to ten chemical categories were identified across all treatments. Principal component analysis (PCA) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) based on relative aroma compound contents effectively distinguished tea samples subjected to different shaking treatments. Further screening using variable importance in projection (VIP) >1 , $P<0.05$, and odor activity value (OAV) >10 identified key aroma compounds, linalool, indole, nerolidol, and 11 other components as the key contributors to aroma quality differences among samples. These results provide a theoretical basis for process optimization and quality improvement of light-scented Tieguanyin single-leaf tea.

Key words: light-scented Tieguanyin; single-leaf tea; sensory quality; biochemical components; aroma compounds

铁观音是乌龙茶的代表性产品之一，产于福建闽南地区，因其独特的品质风格而深受饮茶者喜爱^[1]。随着市场需求变化，铁观音现有产品包括清香型、浓香型和陈香型等类型。传统铁观音生产中，是以驻芽中开面 3~4 叶为主的嫩梢为原料，经萎凋、摇青、杀青、揉捻和干燥等工序制成铁观音茶叶产品^[2]，其中摇青是铁观音茶叶品质形成的关键工序。近年来，为制得“形圆结、色翠绿、香浓郁，味鲜醇”的高品质清香型铁观音，茶叶企业开始探索利用单片鲜叶进行清香型铁观音的产品创新。然而，由于采摘方式的改变，适用于单片鲜叶生产优质清香型铁观音茶的配套工艺参数尚不清楚，致使茶叶企业利用单片鲜叶生产所制清香型铁观音的产品品质参差不齐。因此，针对单片鲜叶的理化性状，系统开展单片鲜叶生产优质清香型铁观音配套工艺研究，对丰富清香型铁观音产品类型、推进清香型铁观音茶叶加工技术创新与推广利用具有重要意义。

众所周知，鲜叶原料和加工工艺是影响铁观音品质形成的关键因素。同一品种不同采摘标准的鲜叶原料，其所制乌龙茶品质差异显著，如 Zeng 等^[3]采用传统乌龙茶加工工艺，对比单叶原料与一芽三叶原料的挥发性成分差异，发现单叶成品茶中吲哚、橙花叔醇、 α -法呢烯及芳樟醇等特征香气物质的含量显著提高。加工过程中生化成分的转化与积累为茶叶品质的形成奠定了重要物质基础，而不同工艺或不同环境条件下，则导致茶叶中生化成分的转化程度与方向发生改变而形成不同的茶叶品质，如黄欢等^[4]研究发现，咖啡碱与茶多酚在铁观音加工过程中，其含量随工艺流程逐渐递减，游离氨基酸总量则呈持续积累趋势，而在炒青之后，茶多酚、咖啡碱含量趋于稳定，游离氨基酸含量微量减少。邓慧莉等^[5]研究表明，高温（35℃）做青条件下，法呢烯和甲基庚烯酮等果香香气物质显著积累，低温（15℃）做青条件下，橙花叔醇、吲哚、

氧化芳樟醇、芳樟醇、己酸叶醇酯等花香香气物质显著积累。康育鑫等^[6]研究表明铁观音加工过程中关键香气成分 α -法呢烯、反式-橙花叔醇、吲哚的含量明显增加。目前，前人虽然从鲜叶原料和加工过程等方面对铁观音茶叶品质形成机制进行了研究，但关于不同摇青处理对清香型铁观音“单叶茶”品质及其生化成分的影响研究鲜见报道^[7]。因此，本研究将以传统采摘标准（中开面三叶嫩梢，CK1）和单片叶（CK2）进行 4 次摇青制成的清香型铁观音为对照，以单片叶分别进行 2 次和 3 次摇青制成的清香型铁观音为处理，对其感官品质、生化成分和香气成分进行对比分析，旨在探明不同摇青次数所制铁观音单叶茶的品质特征及其风味物质基础，明确优质清香型铁观音单叶茶的最佳摇青工艺，以期为清香型铁观音“单叶茶”加工技术的创新研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2024 年 5 月，在福建省日进茶叶有限公司茶园基地，采摘铁观音茶树品种的中开面三叶新梢 10 kg，作为传统清香型铁观音加工用原料，同时采摘中开面三叶新梢第 2、3 叶位的单片鲜叶 30 kg，混匀后分成 3 等份，作为 2 次、3 次和 4 次摇青处理的鲜叶原料。

1.2 主要仪器设备

60 型调速摇青机、JY-6CRT-55B 揉捻机、6CWC-100 杀青机和 JY-6CHZ-7B 茶叶烘焙机，福建佳友茶叶机械有限公司；UV6100 紫外可见分光光度计，上海元析仪器有限公司；6890N 气相色谱-5975B 质谱联用仪（GC-MS），美国 Agilent 公司；SPME 手动进样器和 PDMS/DVB/CAR 萃取纤维，美国 Supelco 公司；Plate（RCT digital）磁力加热搅拌器，德国 IKA 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 试验设计

以清香型铁观音传统加工工艺为对照（CK1），即中开面三叶新梢进行4次摇青，以单片鲜叶分别进行2次（DY1）、3次（DY2）和4次（CK2）摇青为处理，按照图1的工艺流程将鲜叶制成清香型铁观音茶叶样本，各工序的技术参数参照本课题前期研究的方法^[7]设置，具体如表1所示。

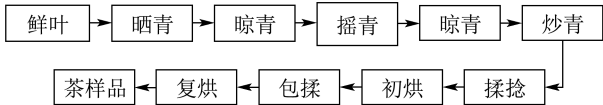


图1 样品制备工艺流程
Fig.1 Sample preparation process

表1 不同处理的工艺参数

Table 1 Process parameters under different treatments	
处理	工艺参数
DY1	第1摇: 转速 20 r·min ⁻¹ , 时间 2 min, 凉青 1 h → 第2摇: 转速 25 r·min ⁻¹ , 时间 6 min, 凉青 2 h
DY2	第1摇: 转速 20 r·min ⁻¹ , 时间 2 min, 凉青 1 h → 第2摇: 转速 25 r·min ⁻¹ , 时间 6 min, 凉青 2 h → 第3摇: 转速 30 r·min ⁻¹ , 时间 10 min, 凉青 2 h
CK1	第1摇: 转速 20 r·min ⁻¹ , 时间 2 min, 凉青 1 h → 第2摇: 转速 25 r·min ⁻¹ , 时间 6 min, 凉青 2 h → 第3摇: 转速 30 r·min ⁻¹ , 时间 10 min, 凉青 2 h → 第4摇: 转速 30 r·min ⁻¹ , 摇青时间 15 min, 凉青 3 h

1.3.2 感官品质审评方法

由3位一级评茶师组成的审评小组，按照GB/T 23776-2018中乌龙茶的审评方法^[8]对铁观音的外形、香气、滋味、汤色和叶底品质进行密码审评，采用百分制法对各因子进行打分，加权平均法计算各样品感官品质综合得分。

1.3.3 生化成分测定方法

参照文献^[9]和GB/T 8312-2013^[10]的方法分别测定样本中水浸出物、茶多酚、游离氨基酸的总量和咖啡碱含量，采用三氯化铝比色法^[11]、蒽酮比色法和系统比色法^[12]分别测定样本中黄酮类物质总量、可溶性糖含量和茶黄素、茶红素、茶褐素含量。

1.3.4 香气成分分析方法

香气成分的萃取方法和GC-MS条件设置参照文献^[13]的方法。

定性与定量：搜索NIST08标准谱库检索匹配各组分^[14]，使用保留时间、匹配度（≥80%）、保留指数结合相关文献^[15,16]进行定性，采用内标法定量，计算各组分的含量^[17]。

OAV值分析：参照陈倩莲等^[18]的方法，计算气味活度值（Odor Activity Value, OAV），确定对样品总体风味贡献最大的关键香气成分。

1.4 数据分析

采用IBM SPSS 20.0软件进行单因素方差分析；采用SIMCA-14.1软件进行多元统计分析，包括主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）、层次聚类分析（Hierarchical Cluster Analysis, HCA）和偏最小二乘判别分析（Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA），经200次置换检验确认PLS-DA模型的有效性。差异香气成分的筛选条件是变量投影重要性值（Variable Importance in Projection, VIP）大于1和P值小于0.05^[19]，其表达量聚类热图采用TBtools软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同处理清香型铁观音茶感官品质分析

如表2所示，不同摇青次数所制清香型铁观音“单叶茶”DY1、DY2和CK2的感官品质特征明显不同：外形上，三者均圆结，但干茶色泽上DY1呈青绿色，而其他均翠绿油润，得分上CK2最高、DY2其次、DY1最低；香气上，三者层次分明，其中以CK2得分最高，呈现出香气浓郁持久、兰花香显的品质特点，DY2其次，呈现出清香持久带兰花香的品质特点，DY1最低，呈现出明显的青气，说明增加摇青次数，可减轻铁观音“单叶茶”的青气，凸显出清香和花香的优质特征^[6]；滋味上，以CK2得分最高，呈现出鲜醇甘爽的特点，DY2其次，呈现出鲜醇、稍浓略带青的特点，DY1最低，呈现出鲜浓带青涩味的特点，说明增加摇青次数，可减弱铁观音“单叶茶”的刺激性和收敛性，显露出醇和甘爽的优质特点，且滋味的协调性更佳。综合得分上，三者间均存在显著差异（P<0.05），其中以CK2综合得分最高（93.10分），DY2其次（88.79分），DY1最低（83.12分）。结果表明，摇青处理对清香型铁观音“单叶茶”的感官品质影响显著，且增加摇青次数可改善香气与滋味品质，从而提升清香型铁观音“单叶茶”的综合品质。

在摇青次数一致的情况下，CK2（单叶茶）的感官品质明显优于CK1，其综合得分（93.10分）显著高于后者（88.79分），表现出外形圆结、香气兰花香浓郁、滋味鲜醇甘爽显花香的优异品质；与CK2相比，CK1则在滋味的厚度上表现突出，说明采用中开面三叶嫩梢制出的铁观音在滋味厚度上优于单叶茶，但因汤中花香

不显致使得分偏低。结果表明，以单片鲜叶为原料采用4次摇青处理可以制出优质清香型铁观音茶叶产品。

2.2 不同处理清香型铁观音茶基本生化成分分析

茶树品种、采摘标准、气候环境、季节等因素对茶树鲜叶中生化成分的含量与组成影响显著，从而导致相同工艺下茶叶产品的风味品质产生差异。茶汤中的水浸出物、茶多酚、氨基酸、咖啡碱等生化成分的含量与组成是决定茶叶滋味品质的关键因素^[20]，其中水浸出物总量的高低决定茶汤滋味的浓淡，茶多酚含量的高低决定茶汤的刺激性和收敛性，氨基酸则是构成茶汤鲜爽口感的重要成分，咖啡碱和黄酮类物质是茶汤苦涩味物质基础。

如表3所示，DY1、DY2和CK2在基本生化成分的含量与组成上存在显著差异。其中，水浸出物、茶多酚、黄酮类总量及咖啡碱含量和酚氨比值均以DY1显著最高，其含量和比值分别为42.17%、16.18%、8.63 mg·g⁻¹、3.19%和9.81，而CK2均显著最低，分别为39.31%、15.13%、7.72 mg·g⁻¹、3.08%和8.26；氨基酸则相反，其含量在CK2中显著最高

(1.83%)、DY1中显著最低(1.65%)。结果表明，摇青次数的增加，可显著降低铁观音“单叶茶”中水浸出物、茶多酚、咖啡碱、黄酮类等成分的含量及酚氨比值，增加氨基酸的含量，从而改善清香型铁观音“单叶茶”的滋味品质，这与滋味品质的审评结果相吻合。Lin等^[21]研究发现，在铁观音加工中氨基酸含量总体呈上升趋势，而与苦涩味相关的儿茶素类及黄酮醇苷类物质则显著降解，与本研究结果基本一致。

在茶叶加工或储存中，茶多酚会因为酶促或非酶促氧化而转化为茶黄素、茶红素和茶褐素等水溶性色素物质，从而影响茶汤的色泽与滋味品质。由表3可知，茶黄素在DY1中的含量最高(0.27%)、CK2中最低(0.21%)，茶红素和茶褐素则在CK2中的含量最高，分别为1.77%和2.30%，在DY1中最低，分别为1.57%和2.18%。结果表明，摇青次数的增加，可加深单片鲜茶叶缘细胞的损伤，从而加速叶内茶多酚和茶黄素的氧化聚合，积累较多的茶红素和茶褐素，致使茶汤的苦涩味降低、茶汤色泽更加金黄，这与汤色和滋味品质审评结果相吻合。Chen等^[22]的研究发现，深度摇青促进了多酚类主体成分儿茶素的氧化聚合，进而形成了茶黄素等氧化产物，从而降低了茶叶的涩味。

表 2 不同处理清香型铁观音感官审评结果

Table 2 Sensory evaluation results of light-scented tieguanyin with different treatments											
样品 编号	外形 (20%)		汤色 (5%)		香气 (30%)		滋味 (35%)		叶底 (10%)		总分
	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	
CK1	紧结，翠绿润	89.17	金黄绿，明亮	89.67	清香、花香，持久	90.00	鲜爽，较厚	89.67	软亮，尚匀齐	86.17	88.79 ± 0.53 ^b
DY1	圆结，青绿	84.00	绿黄尚亮	86.33	尚清香、带花香，带青气	81.83	鲜浓，带青涩	80.33	软尚亮，匀齐	85.33	83.12 ± 0.52 ^c
DY2	圆结，翠绿润	91.00	金黄绿，明亮	90.83	清香带兰花香，持久	88.50	鲜爽，尚浓，带青	88.00	软亮，匀齐	91.50	89.42 ± 0.35 ^b
CK2	圆结，翠绿润	92.83	金黄绿、明亮	94.00	兰花香，浓郁	93.10	鲜醇甘爽，显花香	93.33	软亮，匀齐	93.50	93.10 ± 0.09 ^a

注：同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 3 清香型铁观音的生化成分

Table 3 The content of biochemical compositions of light-scented Tieguanyin				
生化成分	CK1	DY1	DY2	CK2
水浸出物/%	39.37 ± 0.22 ^c	41.27 ± 0.26 ^a	40.02 ± 0.33 ^b	39.31 ± 0.43 ^c
茶多酚/%	15.60 ± 0.15 ^b	16.18 ± 0.11 ^a	15.81 ± 0.09 ^b	15.13 ± 0.10 ^c
氨基酸/%	1.86 ± 0.04 ^a	1.65 ± 0.06 ^c	1.78 ± 0.02 ^b	1.84 ± 0.05 ^a
咖啡碱/%	3.24 ± 0.05 ^a	3.19 ± 0.02 ^a	3.15 ± 0.04 ^{ab}	3.08 ± 0.08 ^b
可溶性糖/(mg·g ⁻¹)	33.52 ± 0.15 ^a	31.81 ± 0.31 ^c	33.23 ± 0.05 ^a	32.78 ± 0.06 ^b
黄酮类/(mg·g ⁻¹)	8.57 ± 0.07 ^{ab}	8.63 ± 0.12 ^a	8.35 ± 0.06 ^b	7.72 ± 0.07 ^c
茶黄素/%	0.21 ± 0.02 ^b	0.27 ± 0.02 ^a	0.22 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.04 ^b
茶红素/%	1.86 ± 0.06 ^a	1.57 ± 0.03 ^c	1.68 ± 0.04 ^b	1.77 ± 0.06 ^a
茶褐素/%	2.41 ± 0.03 ^a	2.18 ± 0.04 ^c	2.27 ± 0.04 ^b	2.30 ± 0.02 ^b
酚氨比	8.61 ± 0.07 ^c	9.81 ± 0.05 ^a	9.07 ± 0.16 ^b	8.26 ± 0.05 ^d

注：同行不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$)，下表同。

在摇青次数一致的条件下, CK2 中除了茶黄素的含量与 CK1 相同外, 其他生化成分的含量及酚氨比值均低于或显著低于后者, 这可能与传统采摘标准中茶叶嫩茎的存在有关, 即乌龙茶在摇青和静置过程中, 通过走水实现嫩茎中水溶性物质向叶片的转移, 从而增加茶叶可溶性物质的含量, 该结果进一步说明了 CK1 在滋味厚度上优于单叶茶的化学本质。

2.3 不同处理清香型铁观音香气成分分析

2.3.1 香气含量与构成分析

如表 4 所示, 不同处理清香型铁观音样本中检测出 76 个香气成分, 涵盖碳氢化合物 (25 个)、酯类 (20 个)、醇类 (10 个)、醛类 (8 个)、内酯 (4 个)、酮类 (3 个)、酸类 (2 个)、杂氧化合物 (1 个)、含氮化合物 (2 个) 和酚类 (1 个) 等 10 大类型。DY1、DY2、CK2 和 CK1 中分别检测出 71、73、69 和 70 个香气成分, 其中共有成分 64 个。香气总量由高到低依次为 CK1 ($167.89\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、DY1 ($157.15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)、DY2 ($145.37\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 和 CK2 ($124.86\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 且样本两两间均存在显著差异。随着摇青次数的增加, “单叶茶” 香气总量呈下降趋势, 且传统嫩梢制作的铁观音 (CK1) 的香气总量高于单叶茶。

DY1、DY2、CK2、CK1 中含量在 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上的香气成分分别有 9、6、5、8 个 (表 4), 其中 DY1 中以 β -罗勒烯 ($21.01\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 花香、青香) 的含量最高, DY2 和 CK2 中均以橙花叔醇 (23.07 、 $27.02\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 花香) 的含量最高, CK1 中以吲哚 ($33.25\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 茉莉花香) 的含量最高。值得注意的是, 随着摇青次数的增加, 橙花叔醇、吲哚、 α -法呢烯、茉莉内酯、柏木烯和苯乙腈等花香成分^[23,24]在清香型铁观音 “单叶茶”

中显著富集, 而 β -罗勒烯、紫苏烯、丙烯酸丁酯、草酸 2-苯乙基丙酯和己酸叶醇酯则明显下降, 该结果与前人^[3,6,25,26]的研究结果相吻合。

对不同摇青次数清香型铁观音 “单叶茶” 中 64 个共有成分进行方差分析 (表 4), 结果显示, 除 2-乙基-1-己醇、苯甲醛、十六烷、苯乙腈在不同 “单叶茶” 茶样中相对含量差异不显著外 ($P>0.05$), 其他成分均存在显著差异。其中, 具有花香特征的橙花叔醇, 低浓度时呈现橙子和茉莉花香的吲哚, 具有花果香的 α -法呢烯和具有百合花或玉兰花香味的芳樟醇^[5,27], 它们在 CK2 中显著富集, 从而赋予其浓郁兰花香的物质基础, 这为其香气品质审评结果提供了有力支撑。值得一提的是, β -环柠檬醛、2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-乙醛、5-甲基-5-丙基壬烷仅在 4 次摇青样本 (CK2 和 CK1) 中被检出, 反-2-辛烯醛、 δ -芹子烯和 2-正戊基呋喃仅在少于 4 次摇青样本 (DY1 和 DY2) 中被检出, 香叶醛、苯乙酸肉桂醇酯、去氢白菖烯仅在单片鲜叶所制样本 (DY1、DY2 和 CK2) 中被检出, 2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-乙醛和 5-甲基-5-丙基壬烷仅在中开面三叶嫩梢所制样本 (CK1) 中被检出, 表明做青次数和采摘标准的不同导致这些香气成分在不同样本中的特异性积累。

在摇青次数一致的条件下, CK2 与 CK1 中橙花叔醇、苯乙腈、茉莉内酯、己酸叶醇酯、草酸 2-苯乙基丙酯、 α -法呢烯等花香成分的相对含量, 在二者间均存在显著差异。结果表明, 同一工艺条件下, 鲜叶原料在采摘标准上的差异, 导致 CK2 与 CK1 中主要香气成分在相对含量上存在显著差异, 进而使得二者呈现出不同程度的花香特征, 即 CK2 花香浓郁持久, 而 CK1 则清香、花香持久。

表 4 清香型铁观音香气成分的相对含量
Table 4 The relative content of aromatic components of light-scented Tieguanyin ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

序号	化合物	保留时间/ min	保留 指数	VIP	P	DY1	DY2	CK2	CK1
1	辛醇	11.25	859	1.02	0.00	1.55 ± 0.04^a	1.45 ± 0.03^b	0.76 ± 0.03^c	1.47 ± 0.04^b
2	2-乙基-1-己醇	18.34	1 012	0.87	0.10	0.88 ± 0.56^{ab}	1.18 ± 0.01^a	0.76 ± 0.02^{ab}	0.51 ± 0.02^b
3	氧化物芳樟醇 I	20.29	1 058	0.94	0.00	0.68 ± 0.02^c	0.61 ± 0.03^c	0.75 ± 0.04^b	1.15 ± 0.08^a
4	芳樟醇	21.43	1 084	1.12	0.00	2.47 ± 0.03^a	2.60 ± 0.08^a	1.06 ± 0.06^b	2.58 ± 0.09^a
5	苯乙醇	22.05	1 098	1.03	0.00	2.16 ± 0.05^b	1.33 ± 0.03^c	1.37 ± 0.03^c	2.81 ± 0.13^a
6	氧化物芳樟醇 II	24.16	1 155	1.05	0.00	0.89 ± 0.02^b	0.62 ± 0.05^d	0.74 ± 0.05^c	1.20 ± 0.01^a
7	2-环己烯-1-醇	27.19	1 243	1.04	0.00	0.07 ± 0.01^c	0.11 ± 0.01^b	0.01 ± 0.01^d	0.23 ± 0.02^a
8	橙花叔醇	35.48	1 538	0.88	0.00	20.49 ± 0.65^d	23.07 ± 1.51^c	27.02 ± 1.20^b	32.37 ± 0.68^a
9	法尼醇	35.73	1 548	0.91	0.00	0.32 ± 0.03^b	0.27 ± 0.02^c	0.20 ± 0.02^d	0.38 ± 0.03^a
10	雪松醇	36.99	1 599	0.99	0.00	0.35 ± 0.03^a	0.21 ± 0.03^b	0.18 ± 0.02^b	0.36 ± 0.02^a

续表4

序号	化合物	保留时间/ min	保留 指数	VIP	<i>P</i>	DY1	DY2	CK2	CK1
醛 类	1 苯甲醛	15.30	950	0.94	0.00	0.01 ± 0.01 ^b	0.01 ± 0.01 ^b	0.01 ± 0.01 ^b	0.37 ± 0.02 ^a
	2 2,4-庚二烯醛	16.98	983	1.35	0.00	0.26 ± 0.02 ^b	0.45 ± 0.04 ^a	0.01 ± 0.01 ^d	0.17 ± 0.04 ^c
	3 反-2-辛烯醛	19.72	1 044	0.89	0.00	0.34 ± 0.04 ^a	0.24 ± 0.04 ^b	—	—
	4 壬醛	21.63	1 022	1.19	0.00	1.97 ± 0.08 ^b	2.17 ± 0.07 ^a	1.19 ± 0.07 ^d	1.63 ± 0.06 ^c
	5 癸醛	25.33	1 187	1.07	0.00	0.65 ± 0.05 ^a	0.20 ± 0.02 ^{bc}	0.16 ± 0.03 ^c	0.25 ± 0.06 ^b
	6 β-环柠檬醛	25.89	1 203	1.07	0.00	—	—	0.75 ± 0.05 ^a	0.37 ± 0.04 ^b
	7 2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-乙醛	27.09	1 240	0.92	0.00	—	—	—	0.13 ± 0.03 ^a
	8 香叶醛	27.36	1 248	1.21	0.00	1.14 ± 0.10 ^a	0.01 ± 0.02 ^c	0.25 ± 0.08 ^b	—
碳 氢 类	1 柠檬烯	18.52	1 017	0.89	0.00	2.22 ± 0.09 ^a	1.17 ± 0.04 ^b	0.34 ± 0.05 ^c	0.26 ± 0.03 ^c
	2 (E)-β-罗勒烯	18.7	1 021	0.88	0.00	0.77 ± 0.06 ^a	0.44 ± 0.04 ^b	0.03 ± 0.03 ^d	0.16 ± 0.05 ^c
	3 β-罗勒烯	19.17	1 032	0.88	0.00	21.01 ± 1.20 ^a	16.36 ± 0.72 ^b	8.85 ± 0.47 ^c	11.03 ± 0.93 ^d
	4 紫苏烯	21.94	1 096	1.20	0.00	11.89 ± 0.72 ^a	10.31 ± 0.67 ^b	6.63 ± 0.34 ^c	5.67 ± 0.34 ^c
	5 对伞花烃	22.29	1 105	0.86	0.00	0.23 ± 0.07 ^b	0.19 ± 0.03 ^b	0.20 ± 0.02 ^b	0.36 ± 0.05 ^a
	6 波斯菊萜	22.64	1 114	0.91	0.00	0.81 ± 0.07 ^a	0.48 ± 0.03 ^b	0.31 ± 0.02 ^c	0.34 ± 0.04 ^c
	7 十二烷	25.09	1 181	0.91	0.00	0.73 ± 0.08 ^a	0.47 ± 0.05 ^b	0.37 ± 0.04 ^b	0.40 ± 0.04 ^b
	8 5-甲基-5-丙基壬烷	28.89	1 296	0.91	0.00	—	—	—	0.06 ± 0.02 ^a
	9 萜品油烯	29.75	1 325	0.83	0.00	0.25 ± 0.04 ^{ab}	0.21 ± 0.03 ^{bc}	0.17 ± 0.02 ^c	0.28 ± 0.03 ^a
	10 β-榄香烯	31.05	1 371	0.98	0.00	0.68 ± 0.06 ^a	0.45 ± 0.06 ^{bc}	0.39 ± 0.02 ^c	0.50 ± 0.04 ^b
	11 柏木烯	31.97	1 403	1.24	0.00	1.99 ± 0.11 ^c	2.71 ± 0.07 ^a	2.56 ± 0.09 ^a	2.34 ± 0.07 ^b
	12 β-柏木烯	32.21	1 412	1.06	0.00	1.55 ± 0.06 ^a	0.92 ± 0.06 ^b	0.89 ± 0.02 ^{bc}	0.82 ± 0.04 ^c
	13 罗汉柏烯	32.47	1 422	0.95	0.00	0.78 ± 0.07 ^a	0.44 ± 0.04 ^b	0.34 ± 0.02 ^c	0.40 ± 0.06 ^{bc}
	14 (E)-β-法呢烯	32.59	1 426	1.06	0.00	1.10 ± 0.06 ^b	0.77 ± 0.06 ^c	0.84 ± 0.05 ^c	1.30 ± 0.06 ^a
	15 α-雪松烯	32.97	1 441	1.20	0.00	—	0.02 ± 0.01 ^b	0.00 ± 0.00 ^b	0.07 ± 0.02 ^a
	16 δ-芹子烯	33.17	1 448	0.88	0.00	0.13 ± 0.02 ^a	0.08 ± 0.01 ^b	—	—
	17 γ-依兰烯	33.39	1 457	0.99	0.00	0.41 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.04 ^c	0.26 ± 0.02 ^c	0.35 ± 0.03 ^b
	18 α-香柑油烯	33.55	1 463	0.96	0.00	1.44 ± 0.08 ^b	1.06 ± 0.08 ^c	1.10 ± 0.07 ^c	2.53 ± 0.09 ^a
	19 β-人参烯	33.86	1 475	0.96	0.00	0.28 ± 0.03 ^a	0.17 ± 0.02 ^b	0.14 ± 0.02 ^b	0.15 ± 0.02 ^b
	20 α-法呢烯	33.95	1 478	0.91	0.00	17.99 ± 0.60 ^d	19.96 ± 0.65 ^c	22.21 ± 1.27 ^b	31.11 ± 1.01 ^a
	21 β-绿叶烯	34.42	1 496	1.05	0.00	0.25 ± 0.03 ^b	0.19 ± 0.04 ^c	0.30 ± 0.02 ^b	0.37 ± 0.04 ^a
	22 δ-杜松油烯	34.47	1 498	0.81	0.00	0.43 ± 0.05 ^a	0.35 ± 0.06 ^b	0.23 ± 0.02 ^c	0.26 ± 0.03 ^c
	23 α-雪松烯	34.96	1 517	1.20	0.00	—	0.11 ± 0.02 ^b	—	0.18 ± 0.03 ^a
	24 去氢白菖烯	36.06	1 561	1.06	0.00	0.46 ± 0.06 ^a	0.23 ± 0.05 ^c	0.35 ± 0.03 ^b	—
	25 十六烷	36.33	1 572	0.57	0.37	0.11 ± 0.03 ^a	0.13 ± 0.03 ^a	0.13 ± 0.02 ^a	0.15 ± 0.01 ^a
酮 类	1 6-甲基-5-庚烯-2-酮	16.29	969	1.21	0.00	0.36 ± 0.04 ^b	0.46 ± 0.05 ^a	0.06 ± 0.01 ^d	0.25 ± 0.04 ^c
	2 顺-茉莉酮	31.12	1 373	0.91	0.00	1.08 ± 0.04 ^c	1.17 ± 0.07 ^c	1.53 ± 0.07 ^b	2.01 ± 0.10 ^a
	3 β-紫罗酮	33.45	1 459	1.14	0.00	0.12 ± 0.01 ^c	0.18 ± 0.03 ^a	0.15 ± 0.01 ^b	0.20 ± 0.01 ^a

续表4

	序号	化合物	保留时间/ min	保留 指数	VIP	<i>P</i>	DY1	DY2	CK2	CK1
酯类	1	苯甲酸己酯	36.07	1 559	1.32	0.00	0.07 ± 0.02 ^b	0.15 ± 0.03 ^a	0.02 ± 0.02 ^c	0.13 ± 0.03 ^a
	2	丙烯酸丁酯	11.82	873	0.91	0.00	13.79 ± 0.93 ^a	11.04 ± 0.80 ^b	3.35 ± 0.11 ^d	4.73 ± 0.11 ^c
	3	丙酸正丁酯	12.35	887	0.86	0.00	0.12 ± 0.04 ^a	0.08 ± 0.02 ^a	0.01 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.03 ^a
	4	丁酸丁酯	16.79	980	0.86	0.00	0.69 ± 0.07 ^a	0.50 ± 0.04 ^b	0.24 ± 0.05 ^d	0.39 ± 0.06 ^c
	5	醋酸异辛酯	23.16	1 128	0.86	0.00	0.53 ± 0.06 ^a	0.38 ± 0.04 ^b	0.25 ± 0.03 ^c	0.38 ± 0.02 ^b
	6	顺-3-己烯基丁酯	24.56	1 166	0.96	0.00	1.09 ± 0.07 ^a	0.95 ± 0.07 ^b	0.35 ± 0.05 ^d	0.78 ± 0.04 ^c
	7	丁酸辛酯	24.77	1 172	0.91	0.00	0.24 ± 0.03 ^b	0.17 ± 0.04 ^b	0.07 ± 0.02 ^c	0.37 ± 0.06 ^a
	8	水杨酸甲酯	24.99	1 178	0.94	0.00	0.48 ± 0.07 ^b	0.37 ± 0.04 ^c	0.19 ± 0.03 ^d	1.46 ± 0.06 ^a
	9	异戊酸叶醇酯	26.09	1 209	0.93	0.00	1.58 ± 0.07 ^a	1.30 ± 0.05 ^b	0.46 ± 0.06 ^d	0.85 ± 0.06 ^c
	10	2-甲基丁酸叶醇酯	26.25	1 214	0.88	0.00	0.27 ± 0.05 ^a	0.17 ± 0.03 ^b	0.02 ± 0.02 ^c	0.25 ± 0.06 ^{ab}
	11	苯乙酸肉桂醇酯	26.75	1 230	0.97	0.00	0.48 ± 0.04 ^c	0.56 ± 0.04 ^b	0.92 ± 0.06 ^a	—
	12	苯乙酸苯乙酯	26.95	1 236	1.09	0.00	0.25 ± 0.01 ^b	0.27 ± 0.03 ^{ab}	—	0.32 ± 0.04 ^a
	13	己酸 2,2-二甲基丙酯	27.89	1 265	0.94	0.00	0.08 ± 0.01 ^c	0.12 ± 0.01 ^{bc}	0.27 ± 0.04 ^a	0.14 ± 0.02 ^b
	14	乙酸香叶酯	27.95	1 267	0.85	0.00	0.31 ± 0.02 ^a	0.21 ± 0.02 ^b	0.15 ± 0.04 ^c	0.18 ± 0.03 ^{bc}
	15	草酸 2-苯乙基丙酯	28.44	1 282	0.94	0.00	3.42 ± 0.41 ^b	2.53 ± 0.12 ^c	2.01 ± 0.11 ^d	4.14 ± 0.12 ^a
	16	己酸叶醇酯	30.58	1 354	0.95	0.00	4.53 ± 0.12 ^a	3.05 ± 0.06 ^b	2.38 ± 0.15 ^c	3.18 ± 0.14 ^b
	17	己酸己酯	30.72	1 359	0.89	0.00	0.70 ± 0.07 ^a	0.57 ± 0.04 ^b	0.34 ± 0.04 ^c	0.65 ± 0.06 ^{ab}
	18	β-丁酸苯乙酯	32.34	1 417	0.94	0.00	0.41 ± 0.02 ^b	0.33 ± 0.03 ^c	0.25 ± 0.04 ^d	0.88 ± 0.02 ^a
	19	苯甲酸叶醇酯	35.83	1 552	0.91	0.00	0.28 ± 0.04 ^a	0.19 ± 0.04 ^b	0.02 ± 0.02 ^c	0.25 ± 0.04 ^{ab}
	20	己酸-2-苯乙酯	37.35	1 616	0.94	0.00	0.23 ± 0.04 ^c	0.23 ± 0.03 ^c	0.42 ± 0.04 ^b	0.52 ± 0.04 ^a
内酯	1	二氢海葵内酯	26.15	1 211	1.35	0.00	0.03 ± 0.02 ^c	0.26 ± 0.03 ^a	0.16 ± 0.03 ^b	0.06 ± 0.02 ^c
	2	二氢茉莉内酯	19.35	1 036	1.49	0.00	0.02 ± 0.01 ^c	0.23 ± 0.04 ^a	0.09 ± 0.02 ^b	0.12 ± 0.03 ^b
	3	香豆素	21.69	1 090	1.36	0.00	0.02 ± 0.01 ^c	0.24 ± 0.06 ^a	0.14 ± 0.01 ^b	0.16 ± 0.04 ^b
	4	茉莉内酯	33.72	1 469	0.97	0.00	2.60 ± 0.08 ^b	2.55 ± 0.09 ^b	2.81 ± 0.10 ^a	2.35 ± 0.10 ^c
酸类	1	2-乙基-1,2,3-丙三酯丁酸	25.74	1 198	0.89	0.00	0.16 ± 0.04 ^c	0.26 ± 0.02 ^b	0.31 ± 0.02 ^b	0.46 ± 0.05 ^a
	2	反-2-己烯基己酸	30.8	1 362	0.86	0.00	0.12 ± 0.03 ^{ab}	0.08 ± 0.02 ^b	0.03 ± 0.03 ^c	0.14 ± 0.02 ^a
酚类	1	己烷雌酚	36.78	1 590	0.86	0.00	0.36 ± 0.06 ^c	0.40 ± 0.05 ^c	0.50 ± 0.03 ^b	0.67 ± 0.05 ^a
含氮化合物	1	苯乙腈	22.99	1 124	0.92	0.00	2.14 ± 0.13 ^b	2.21 ± 0.13 ^b	2.27 ± 0.11 ^b	3.46 ± 0.08 ^a
	2	吲哚	28.29	1 277	0.91	0.00	20.79 ± 0.77 ^c	21.99 ± 1.06 ^{bc}	23.26 ± 1.21 ^b	33.25 ± 0.95 ^a
杂氧化合物	1	2-正戊基呋喃	16.55	975	1.26	0.00	0.07 ± 0.02 ^b	0.13 ± 0.03 ^a	—	—
总和							157.15 ± 6.41 ^b	145.37 ± 5.86 ^c	124.86 ± 3.33 ^d	167.89 ± 4.39 ^a

注：“—”表示该香气成分未检测到或痕量。

2.3.2 基于PCA和HCA对不同处理清香型铁观音茶的区分

PCA 作为一种无监督的模式识别方法，广泛应用于不同茶类加工过程及品质等级的判别分析^[28]。如图 2a 所示，基于香气成分的相对含量构建 PCA 模型 ($R^2_x=0.79$, $Q^2=0.61$)，提取的两个主成分，其累积方差解释率达 80.50%，涵盖了香气成分的主要信息。由图可知，不同处理清香型铁观音茶叶样本被明显区分，且 DY1、DY2、CK2 和 CK1 均独立分布在不同象限中，表明它们的香气代谢谱存在明显差异。层次聚类分析结果显示 (HCA，图 2b)，DY1 和 DY2 聚于第 I 类群，CK2 和 CK1 分别聚于第 II 和第 III 类群，表明 4 次摇青所制清香型铁观音“单叶茶”与少于 4 次摇青所制清香型铁观音“单叶茶”间在香气特征上存在较大差距，而后两者差距较小；同时，清香型铁观音“单叶茶”与传统采制工艺所制清香型铁观音间在香气特征上亦存在较大差距，说明摇青次数和采摘标准对清香型铁观音的香气影响显著。

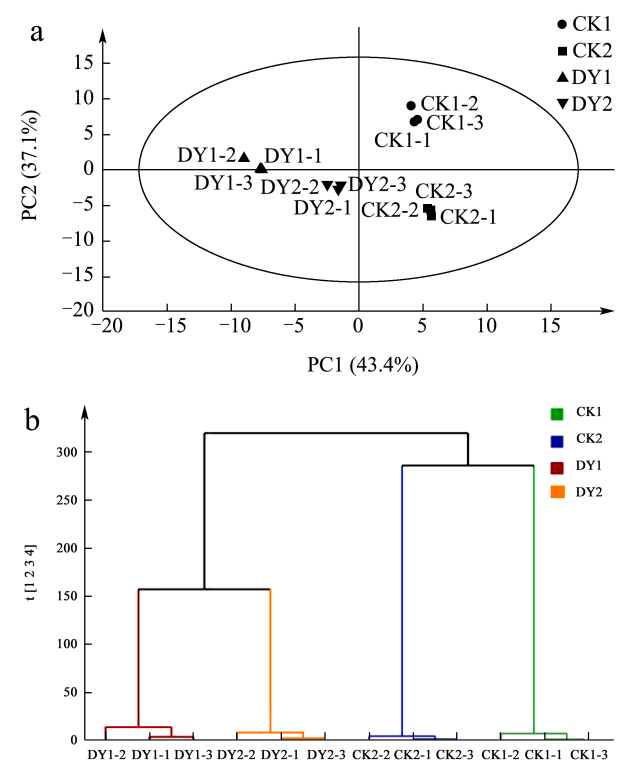


图 2 清香型铁观音香气成分的 PCA 和 HCA

Fig.2 PCA and HCA of aroma components of light-scented Tieguanyin

注：(a) PCA，(b) HCA。

2.3.3 差异香气成分的筛选

PLS-DA 作为一种有监督式下的判别分析方法，在茶叶品质客观评价领域得到了广泛应用^[29]。如图 3a 所示，基于不同摇青处理铁观音茶香气成分相对含量构建的 PLS-DA 模型，能够对不同处理清香型

铁观音茶叶样本进行有效区分。该模型的拟合参数为 $R^2_x=0.94$ 、 $R^2_y=0.99$ 、 $Q^2=0.98$ ，表明其具有较高的累积解释度和预测能力^[9]。为了评估模型的建模效果，对其进行 200 次交叉验证的置换检验 (图 3b)，结果显示， $R^2=0.14$ 、 $Q^2=-0.51$ ，说明所构建的 PLS-DA 模型具有可靠性，不存在过拟合现象^[22]，因此，该模型适用于对不同处理清香型铁观音茶叶样本的判别分析。

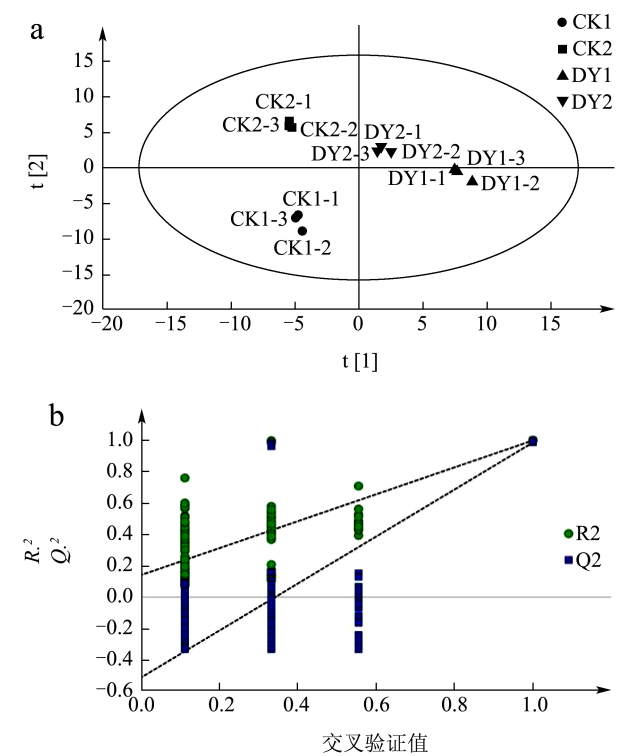


图 3 清香型铁观音香气成分的 PLS-DA 得分图及其交叉验证模型

Fig.3 Score plot and cross-validation model of PLS-DA model for aroma components of light-scented Tieguanyin

注：(a) PLS-DA，(b) 交叉验证模型。

在 PLS-DA 模型中，VIP 值是衡量各变量对分类判别贡献度的关键指标，广泛运用于乌龙茶^[30,31]、绿茶^[32]、红茶^[33]等茶类的品质成分分析。一般将 $VIP>1$ 设为筛选阈值，认为达到该标准的变量对类群区分具有显著影响，且其数值大小与变量在不同类别间的差异程度呈正相关^[34]。由图 4、表 4 可知，24 个香气成分的 $VIP>1$ 、 $P<0.05$ ，表明这些化合物在不同处理间存在显著差异，可作为区分不同处理清香型铁观音茶叶样本的关键差异香气成分。同时，橙花叔醇、丙烯酸丁酯、 β -罗勒烯、吡啶、 α -法呢烯、草酸-2-苯乙基丙酯、芳樟醇、苯乙腈、紫苏烯、茉莉内酯等关键差异香气成分，均具有一定的花香、清香、花果香、芳草香等气味特征，这些可能是不同处理清香型铁观音香气品质差异形成的重要物质基础。

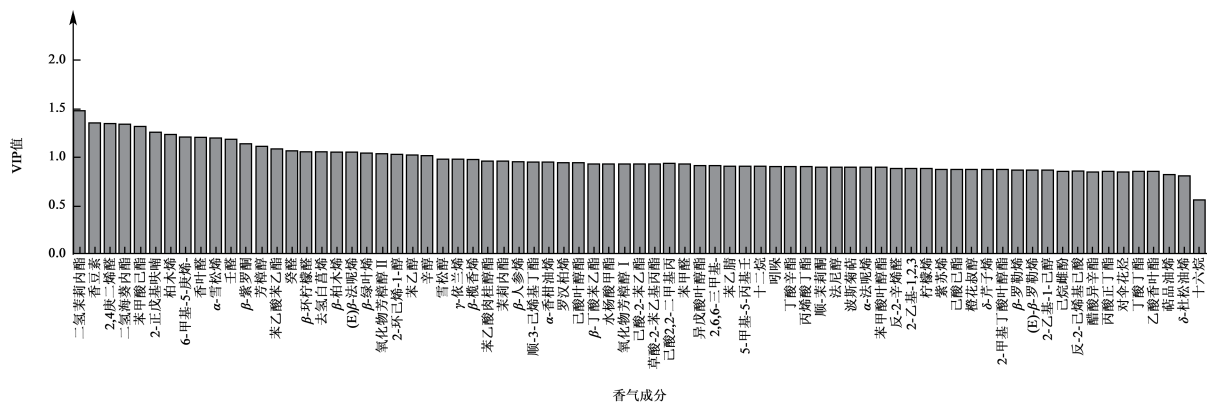


图 4 清香型铁观音香气成分的 PLS-DA 模型的 VIP 得分图

Fig.4 VIP score diagram of PLS-DA model for aroma components of light-scented Tieguanyin

2.3.4 不同处理清香型铁观音关键差异香气成分的HCA分析

如图 5 所示，基于 24 个关键差异香气组分的相对含量进行 HCA 分析，将不同处理茶叶样本划分为 3 个类群。其中，CK2 和 CK1 分别单独聚为两类，DY1 和 DY2 聚为一类，该结果与图 2b 结果一致，说明这 24 个组分是引起不同处理清香型铁观音香气产生差异的关键物质基础。

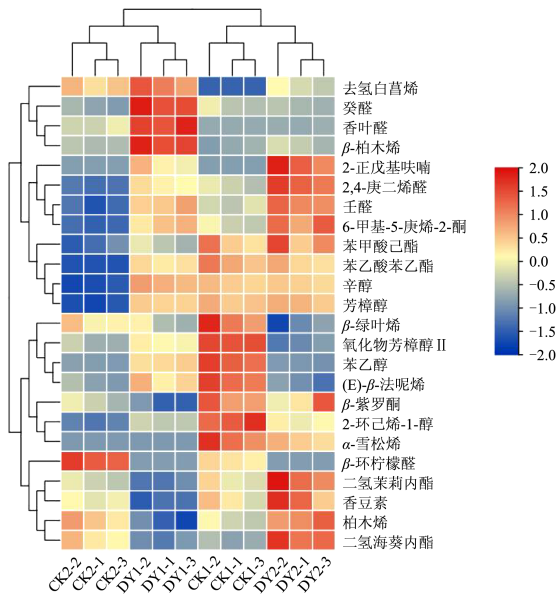


图 5 铁观音 24 个差异呈香成分的聚类热图

Fig.5 Cluster heat map of 24 different aromatic components in Tieguanyin tea

进一步分析发现（图 5、表 4），去氢白菖烯、癸醛、香叶醛、 β -柏木烯等具有草本香、柑橘香、橙皮香和木香的香气成分在 DY1 中总体表达量高于其他样本；2,4-庚二烯醛、壬醛、2-正戊基呋喃、6-甲基-5-庚烯-2-酮、苯甲酸乙酯、苯乙酸苯乙酯、二氢海葵内酯、柏木烯、香豆素、二氢海葵内酯等具有青香、清

香、花香、柠檬香的香气成分在 DY2 中总体表达量高于其他样本； β -环柠檬醛、去氢白菖烯、二氢海葵内酯等具有花香、清香和果香的香气成分在 CK2 中总体表达量较高，而 2,4-庚二烯醛、壬醛、辛醇、苯甲酸乙酯、苯乙酸苯乙酯等具有青香、油脂香和果香的香气成分在 CK2 中总体表达量最低；氧化物芳樟醇 II、苯乙醇、(E)- β -法呢烯、 β -绿叶烯、 β -紫罗酮、2-环己烯-1-醇、 α -雪松烯、苯甲酸乙酯等具有花香、清香、奶香和果香的香气成分在 CK1 中总体表达量高于其他样本。结果表明，去氢白菖烯、癸醛、香叶醛等 24 个香气成分是区分不同处理的清香型铁观音样本的关键组分，同时这些香气成分均呈现出不同的气味特征，其在不同样本中相对含量的差异，可能是导致不同处理清香型铁观音香气品质差异的重要基础，这与感官审评结果基本吻合。

2.3.5 不同处理清香型铁观音茶特征性呈香物质分析

OAV 用于评估香气成分对茶叶样品香气的贡献^[17,18]，一般认为 OAV>1 的香气成分则被认为对茶叶香气具有贡献，OAV>10 的则具有重要贡献^[35]。如表 5 所示，计算出 17 个香气成分的 OAV 值大于 1，其中 DY1、DY2、CK2、CK1 中分别有 16、14、14、16 个香气成分的 OAV>1。基于 OAV>10，筛选出芳樟醇、壬醛、呋喃、癸醛、橙花叔醇、 β -紫罗酮、 β -罗勒烯、茉莉内酯、 α -法呢烯、顺-茉莉酮、氧化物芳樟醇 I 对 4 个样本香气的贡献更为突出。不同样本间比较发现，具有烘烤香的 2-正戊基呋喃仅在 DY1、DY2 中大于 1，具有花果香的 β -环柠檬醛在 CK2 中大于 10，可见这些组分可能是这些样品特征性香气成分。前人研究发现^[25,26]，橙花叔醇、 α -法呢烯、呋喃、芳樟醇、丁酸苯乙酯等具有花香、果香等气味特点的香气成分是形成清香型铁观音香气品质的物质基础，这在本研究中进一步得到印证。

表 5 不同处理铁观音OAV>1的香气成分及其气味描述
Table 5 Aroma components with OAV > 1 and their odor descriptions

香气成分	阈值 ^[37-42] /(μg·g ⁻¹)	OAV				香气特征
		DY1	DY2	CK2	CK1	
芳樟醇	0.000 22	1 124.24	1 183.33	481.82	1 171.21	花香
苯乙醇	0.086	2.52	1.54	1.60	3.26	花香, 玫瑰香
氧化物芳樟醇 I	0.006	11.39	10.22	12.50	19.22	甜香、木香, 带有花香
橙花叔醇	0.015	136.62	153.82	180.13	215.78	花香
吲哚	0.011	188.97	199.91	211.45	302.30	茉莉花香
茉莉内酯	0.007	37.10	36.38	40.10	33.52	茉莉香, 蜜桃味, 椰子香
壬醛	0.001	197.00	217.00	118.67	163.33	玫瑰香、柑橘香、清香
癸醛	0.000 1	653.33	196.67	156.67	246.67	柑橘香、橙皮香、花香
β-环柠檬醛	0.005	—	—	15.00	7.47	花果香
(E)-β-法呢烯	0.087	1.26	0.89	0.96	1.49	花香、柑橘香
α-法呢烯	0.087	20.68	22.95	25.53	35.76	花香
β-罗勒烯	0.034	61.80	48.11	26.04	32.45	甜草药香
对伞花烃	0.011 4	2.02	1.67	1.75	3.16	柑橘香
β-紫罗酮	0.000 2	58.33	90.00	75.00	98.33	花香、果香、甜香
顺-茉莉酮	0.007	15.43	16.67	21.90	28.71	茉莉香、花香、木质香、草本香
2-正戊基呋喃	0.004 8	1.39	2.78	—	—	烘烤香, 豆香, 果香
水杨酸甲酯	0.04	1.21	0.93	0.48	3.64	薄荷、冬青

以 VIP > 1、P < 0.05、OAV > 10 为条件，筛选出芳樟醇、吲哚、橙花叔醇等 11 个关键差异呈香成分形成不同处理清香型铁观音香气品质产生差异的关键物质基础，可作为清香型铁观音不同香型化学判别或香气品质定向化加工的关键标志性成分。研究表明，摇青过程中在机械力的作用下使得叶缘细胞结构被破坏，引发一系列酶促或非酶促反应，导致香气成分，尤其是关键呈香成分发生转化或积累，从而形成不同香气品质的茶叶样本^[23,24]，即随着摇青次数的增加，芳樟醇、吲哚、橙花叔醇、茉莉内酯、β-紫罗酮、α-法尼烯等关键呈香成分的相对含量明显增加，从而使 CK2 的花香、果香更加浓郁，亦与 Hao 等^[36]的研究结果相吻合。

3 结论

摇青次数对清香型铁观音“单叶茶”感官品质影响显著，其中以单片叶进行 4 次摇青所制清香型铁观音（CK2）品质最优，且综合得分显著高于传统采制方式所制清香型铁观音（CK1）。

摇青次数的增加，可降低清香型铁观音“单叶茶”中水浸出物、茶多酚、咖啡碱、黄酮类、茶黄素等的含量及酚氨比值，提升游离氨基酸、茶红素、茶褐素含量，从而改善其滋味品质。与 CK1 相比，CK2 中茶

多酚、咖啡碱、可溶性糖等滋味成分的含量较低，氨基酸含量与之差异不显著。

摇青次数的增加，可降低清香型铁观音“单叶茶”的香气总量，显著富集橙花叔醇、吲哚、α-法尼烯、茉莉内酯、柏木烯等花香成分，从而改善其香气品质。与 CK1 相比，CK2 的香气总量较低，其中橙花叔醇、茉莉内酯、α-法尼烯等花香成分的含量在二者间存在显著差异。

基于香气成分相对含量建立的 PCA 和 PLS-DA 模型，可有效区分不同处理清香型铁观音样本。以 VIP > 1、P < 0.05、OAV > 10 为条件，筛选出芳樟醇、吲哚、橙花叔醇等 11 个组分是引起 4 份样本香气品质差异形成的关键呈香成分。

参考文献

[1] 何春梅,高水练,叶乃兴,等.铁观音滋味与香气品质化学研究进展[J].中国茶叶,2021,43(11):1-6.

[2] 吴晓新,王晓霞,张玉叶,等.安溪铁观音现代与传统加工工艺差异的分析探讨[J].中国茶叶加工,2020,5:22-25.

[3] ZENG L T, ZHOU Y, FU X M, et al. Does oolong tea (*Camellia sinensis*) made from a combination of leaf and stem smell more aromatic than leaf-only tea? Contribution of the stem to oolong tea aroma [J]. Food Chemistry, 2017, 237: 488-498.

[4] 黄欢,赵展恒,王玉娇,等.铁观音加工过程中咖啡碱、茶多酚、

- 游离氨基酸含量变化研究[J].福建农业学报,2014,29(3):282-285.
- [5] 邓慧莉,李鑫磊,毛贻帆,等.不同做青温度对乌龙茶滋味与香气品质的影响[J].食品安全质量检测学报,2021,12(14):5766-5771.
- [6] 康育鑫,陈永快,肖两德,等.安溪铁观音加工过程中影响色、香、味的成分变化[J].食品工业科技,2022,43(12):291-298.
- [7] 周炎花,谢杰全,郭雅玲,等.单片叶制作清香型铁观音的工艺与品质研究[J].中国茶叶,2022,44(11):18-23.
- [8] GB/T 23776-2018,茶叶感官审评方法[S].
- [9] 冯花,王飞权,陈荣冰,等.不同茶树新品系的武夷岩茶适制性鉴定[J].江苏农业科学,2021,49(23):173-184.
- [10] GB/T 8312-2013,茶咖啡碱测定[S].
- [11] 何书美,刘敬兰.茶叶中总黄酮含量测定方法的研究[J].分析化学,2007,35(9):1365-1368.
- [12] 张正竹.茶叶生物化学实验教程[M].北京:中国农业出版社,2009.
- [13] 黄藩,张厅,刘晓,等.四川黑茶的特征香气成分分析[J].食品工业科技,2023,44(12):328-336.
- [14] NIST Chemistry Web Book [DB/OL]. <https://webbook.nist.gov/chemistry/>. (2022/8/6)
- [15] LIN J E, ZHANG P, PAN Z Q, et al. Discrimination of oolong tea (*Camellia sinensis*) varieties based on feature extraction and selection from aromatic profiles analysed by HS-SPME/GC-MS [J]. Food Chemistry, 2013, 141(1): 259-265.
- [16] PANG X, YU W, CAO C, et al. Comparison of potent odorants in raw and ripened Pu-erh tea infusions based on odor activity value calculation and multivariate analysis: understanding the role of pile fermentation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67: 13139-13149.
- [17] 徐梦婷,邵淑贤,陈静,等.不同茶树品种工夫红茶挥发性成分及其关键香气成分分析[J].现代食品科技,2023,39(1):281-290.
- [18] 陈倩莲,刘仕章,占仕权,等.基于HS-SPME-GC-MS和OAV鉴定4种武夷岩茶关键呈香物质[J].食品工业科技,2023,44(14):296-303.
- [19] 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.
- [20] 宛晓春,李大祥,张正竹,等.茶叶生物化学研究进展.茶叶生物化学研究进展[J].茶叶科学,2015,35(1):1-10.
- [21] LIN J Q, LIN H Z, LI C X, et al. Unveiling characteristic metabolic accumulation over enzymatic-catalyzed process of Tieguanyin oolong tea manufacturing by DESI-MSI and multiple-omics [J]. Food Research International, 2024, 181: 114136.
- [22] CHEN S, LIU H H, ZHAO X M, et al. Non-targeted metabolomics analysis reveals dynamic changes of volatile and non-volatile metabolites during oolong tea manufacture [J]. Food Research International, 2020, 128: 108778.
- [23] ZENG L T, ZHOU X C, SU X G, et al. Chinese oolong tea: an aromatic beverage produced under multiple stresses [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 242-253.
- [24] ZHOU Y, ZENG L T, LIU X Y, et al. Formation of (E)-nerolidol in tea (*Camellia sinensis*) leaves exposed to multiple stresses during tea manufacturing [J]. Food Chemistry, 2017, (231): 78-86.
- [25] 柳镇章.安溪铁观音产品品质及拼配、烘焙和贮存关键技术的研究[D].福州:福建农林大学,2022.
- [26] 张珍珍,杨远帆,孙浩,等.3种清香型铁观音挥发性成分及香味特征[J].集美大学学报(自然科学版),2016,21(3):175-183.
- [27] 柳镇章,陈彬,蔡银笔,等.基于多元统计分析的不同安溪铁观音茶产品的化学品质[J].食品科学,2022,43(18):224-235.
- [28] 陈林,林清霞,张应根,等.不同风味类型铁观音乌龙茶香气组成化学模式识别研究[J].茶叶科学,2018,38(3):253-262.
- [29] ZENG L, FU Y Q, LIU Y Y, et al. Comparative analysis of different grades of tieguanyin oolong tea based on metabolomics and sensory evaluation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 174: 114423.
- [30] QIN D D, WANG Q S, JIANG X H, et al. Identification of key volatile and odor-active compounds in 10 main fragrance types of Fenghuang Dancong tea using HS-SPME/GC-MS combined with multivariate analysis [J]. Food Research International, 2023, 173: 113356.
- [31] FU Z J, HAO S X, ZHOU J Y, et al. Profiling volatile compounds in fresh leaves of 22 major oolong tea germplasm cultivated in Fujian of China [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 327: 1-13.
- [32] 尹洪旭,杨艳芹,姚月凤,等.基于气相色谱-质谱技术与多元统计分析对不同栗香特征绿茶判别分析[J].食品科学,2019,40(4):192-198.
- [33] 徐梦婷,谷梦雅,陈静,等.基于代谢组学的金牡丹和金观音高香红茶风味品质解析[J].食品科学,2024,45(19):150-161.
- [34] 苟祎,夏丽飞,张艳梅,等.基于HS-SPME-GC-MS的不同品种普洱熟茶香气成分的比较分析[J].现代食品科技,2023,39(10):278-288.
- [35] 张韵,李蕙蕙,周圣弘,等.基于OAV对3种高香种工夫红茶的香气特征分析[J].食品研究与开发,2020,41(21):184-191.
- [36] HAO Z L, WANG J Y, ZHUANG J Y, et al. Another inner truth of shaking: water migration and transformation-advanced physicochemical alterations in tea leaves [J]. Food Chemistry, 2025, 467: 142338.
- [37] QIN D D, WANG Q S, JIANG X H, et al. Identification of key volatile and odor-active compounds in 10 main fragrance types of Fenghuang Dancong tea using HS-SPME/GC-MS combined with multivariate analysis [J]. Food Research International, 2023, 173: 113356.
- [38] YUE C, CAO H, ZHANG S, et al. Aroma characteristics of Wuyi rock tea prepared from 16 different tea plant varieties [J]. Food Chemistry X. 2023, 17: 100586.
- [39] XUE J J, LIU P P, YIN J F, 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): 3951.
- [40] GUO X Y, HO, C T, WAN X C, et al. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing [J]. Food Chemistry, 2020: 341, 128230.
- [41] ZHU J C, CHEN F, WANG L Y, et al. Comparison of aroma-active volatiles in oolong tea infusions using GC-olfactometry, GC-FPD, and GC-MS [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(34): 7499-7510.
- [42] WANG M, LI J L, LIU X H, et al. Characterization of key odorants in lingtou dancong oolong tea and their differences induced by environmental conditions from different altitudes [J]. Metabolites, 2022, 12: 1063.