夏瑶, 郭俊齐, 贾子璐, 等. 制茶方式对绿茶挥发性成分的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 25−33. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090132
XIA Yao, GUO Junqi, JIA Zilu, et al. Influence of Tea Processing Methods on the Volatile Components of Green Tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 25−33. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090132

·特邀主编专栏—茶饮品全产业链生产关键技术研究与应用（客座主编: 尹军峰、张建勇、许勇泉、崔宏春）·

制茶方式对绿茶挥发性成分的影响

夏　瑶[1], 郭俊齐[1], 贾子璐[1], 王亚菲[1], 苏　会[1], 周琼琼[1], 安晓军[2], 李甚颖[2], 赵仁亮[1,*]
（1.河南农业大学园艺学院, 河南郑州 450002;
2.河南省千宝农业种植有限责任公司, 河南舞钢 462541）

摘　要: 茶叶的挥发性成分是决定其感官品质的核心因素，而不同的制茶方式对茶叶香气物质的形成与保留具有显著影响。本研究以河南省舞钢市茶鲜叶为原料，通过传统手工与机械化加工两种方式制备绿茶，分析其挥发性香气成分的差异；结合感官审评、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPME-GC-MS）、相对气味活度值（ROAV）分析等方法，探讨制茶方式对绿茶香气品质的影响。研究发现，传统手工制茶和机械化加工所得茶样感官品质均较优，手工茶样外形更平整，机械加工茶样汤色更明亮；传统手工制茶在保留醇类、酮类、醛类等关键香气物质方面更具优势，而机械化加工在酯类、萜类方面及工艺稳定性表现突出，关键香气成分分析显示，反-2-壬烯-1-醇和吲哚的 ROAV 在机械加工茶样中较高，而香叶醇、2,3-丁二酮、香叶基丙酮等在手工茶样中含量更高。研究结果表明传统手工制作的茶叶香气化合物种类和数量多于机械化加工的，但机械化加工其品质稳定性要优于手工制茶，该研究进一步丰富了茶叶加工的基础理论体系，为后续通过工艺改良实现手工与机械化加工优势互补、精准调控绿茶香气品质奠定了重要基础。

关键词: 绿茶, 手工制茶, 机械化加工, 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用（HS-SPMS-GC-MS）, 挥发性成分
中图分类号: TS207.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0025−09　　本文网刊:
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090132

Influence of Tea Processing Methods on the Volatile Components of Green Tea

XIA Yao[1], GUO Junqi[1], JIA Zilu[1], WANG Yafei[1], SU Hui[1], ZHOU Qiongqiong[1], AN Xiaojun[2], LI Shenying[2], ZHAO Renliang[1,*]
（1.College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
2.Henan Qianbao Agricultural Planting Co., Ltd., Wugang 462541, China）

Abstract: The volatile composition of tea is a key determinant of its sensory quality, with processing methods significantly influencing the formation and retention of aroma compounds. This study investigated the impact of traditional manual versus mechanized processing on the aroma profile of green tea produced from fresh leaves sourced from Wugang City, Henan Province. Sensory evaluation, headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and relative odor activity value (ROAV) analysis, differences in volatile components were systematically examined. Results indicated that both methods yielded tea samples with favorable sensory quality, with manually processed tea showing more uniform appearance and mechanically processed tea exhibiting brighter liquor color. Traditional manual processing was more effective in retaining key aroma compounds such as alcohols, ketones and aldehydes, while

收稿日期: 2025−09−12
基金项目: 河南省科技研发计划联合基金重点项目（235200810019）; 河南农业大学“百千万”科教服务行动基金项目（30803429）; 大别山实验室重点课题研发专项（DML009）; 河南省中央引导地方科技发展资金项目（Z20251831079）。
作者简介: 夏瑶（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 茶叶加工与品质化学, E-mail: 19839756182@163.com。
*** 通信作者:** 赵仁亮（1983−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 茶叶加工与品质化学, E-mail: zrenliang@henan.edu.cn。

mechanized processing excelled in preserving esters, terpenes and offered higher process stability. ROAV-based analysis of key aroma components revealed higher levels of trans-2-nonen-1-ol and indole in mechanically processed tea, whereas geraniol, 2,3-butanedione, and geranyl acetone were more prominent in manually processed tea. These findings suggested that traditional processing yielded a richer diversity and concentration of aroma compounds, whereas mechanized processing ensured greater consistency in product quality. This study enhanced the theoretical understanding of tea processing and provided a foundation for optimizing green tea aroma quality by integrating the advantages of both manual and mechanized methods.

Key words: green tea; traditional manual processing; mechanical processing; headspace solid-phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS); volatile components

绿茶通过摊放、杀青、揉捻及干燥一系列复杂的步骤加工而成,这些步骤共同作用,赋予绿茶独特的色泽、香气和口感,在我国六大茶类中产量和销量均居于首位[1]。香气是评价品质的核心指标之一[2],香气成分的组成与含量直接影响消费者对绿茶的喜好程度和市场价值。手工制茶是茶叶制作的传统形式,是与茶叶机械化生产相对应的一个概念,其强调的是茶叶制作的过程全靠手工加工,利用炒茶师傅的技术和经验把茶鲜叶经过一系列工序加工制作成成品茶的过程[3]。手工制茶不仅是茶叶加工的一种工艺形式,也是茶文化传承和表现的载体。这种制茶方式能够灵活控制工艺参数,在一定程度上使茶叶形成独特的香气和风味。然而,手工制茶效率较低,受人为因素影响较大,难以满足大规模生产的需求。

随着科技的发展,机械化加工逐渐成为茶叶生产的主流方式[4]。它生产效率高,能连续规模化作业,短时间处理大量鲜叶以满足市场需求;标准化参数设定保障了产品质量稳定,还因设备使用食品级材料且易清洁,卫生条件良好,同时减少人工依赖,降低劳动力成本。但是,机械化加工过程中的高温、高压等条件可能会改变茶叶香气前体物质的降解路径,进而影响香气成分的生成,导致茶叶香气品质与传统手工制茶有所差异。

目前已知能够从茶叶当中提取得到的香气物质多达 700 多种,主要包括醇、酚、酸、醛、酯和杂环类化合物[5−7]。茶叶品质除与不同产地[8] 及茶树品种[9] 等因素有关外,与加工工艺密切相关。李文萃等[10] 研究表明,不同炒干条件下夏季日照绿茶品质差异明显。张锦程等[11] 研究表明,不同工艺组藤茶的挥发性香气物质较对照组均有一定程度的提升,且出现了独有的特征香气,采用绿茶加工技术制作的藤茶出现了萜品油烯、柠檬醛两种具有柠檬清香的挥发性成分。刘珍珍等[12] 研究表明,汉中绿茶加工过程中,青香化合物经摊青后含量显著增加后于杀青和干燥工序显著下降,花香化合物经摊青后含量增加后于杀青和干燥工序后下降,坚果香化合物则随摊青、杀青和干燥工序呈现显著增加趋势。刘蔚蓝等[13] 研究发现手工所制晴隆扁形绿茶感官品质较不稳定,其中 2 个茶样感官审评总分低于 90.00 分,未达到名优绿茶的品质等级。机械所制晴隆扁形绿茶感官品质较为稳定,均达到名优绿茶品质要求。喻俊等[14] 研究发现半机械加工工艺感官审评得分最高,其结合了全机械加工工艺的外形优势和全手工加工工艺的香气和滋味的优势,从而提高了都匀毛尖茶品质。本研究选取传统手工制茶与机械化加工制作的舞钢绿茶,对其挥发性香气成分进行分析,旨在揭示不同加工方式影响茶叶香气形成,为优化舞钢绿茶的加工工艺提供科学依据,提升舞钢绿茶的品质和市场竞争力。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

实验所用的舞钢绿茶鲜叶　采自河南省舞钢市当地茶园,采摘标准为一芽二叶初展。选择生长状况良好、无病虫害的茶树鲜叶,采摘后立即运回工厂进行加工处理,采摘时间为 2024 年 4 月 8 日;正构烷烃标准品(C7~C35)　O2si Smart Solutions 公司;氯化钠　分析纯,国药集团化学试剂有限公司;癸酸乙酯标准品(>98.0%)　梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;正己烷　色谱纯,德国 Merck 公司;2-庚酮　色谱纯,美国 Sigma-Aldrich 公司。

8890-5977B 气相色谱-质谱联用仪、65 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头　美国 Agilent 公司;MS105DU 电子天平　美国 METTLER TOLEDO 公司;MM400 球磨仪　德国 Retsch 公司;SP200-2T 多通道加热型磁力搅拌器　杭州米欧仪器有限公司;HP-5MS UI 气相色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)　安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 绿茶加工　机械制茶方式通过摊放-杀青-回潮-理条-压片-干燥工序制作,传统手工制茶方式采用扁形茶的青锅和辉锅制作工艺,机械制茶工艺及参数:杀青时间共计 2~3 min,分五区梯度变温杀青,一区 480 ℃,二区 430 ℃,三区 360 ℃,四区 300 ℃,五区 280 ℃;然后分级回潮 3~5 h,期间翻动一次;接着理条共计 15 min,首先 220 ℃,5~7 min,接着 180 ℃,8~10 min;再次回潮 3~5 h;干燥分两次进行,首先 85 ℃,30 min,接着把温度升高到 110 ℃,10 min,一共就是 40 min;中间摊凉 2 h,第二次干燥时 80 ℃,40 min。传统手工制茶工艺及参数:第一阶段共计 15 min:杀青 240 ℃,5 min;理条 200 ℃,5 min;做型 180 ℃,

5 min；第二阶段回潮：4~8 h；第三阶段共计 40 min：辉锅 100 ℃，5 min；80 ℃，30 min；110 ℃，5 min。最终制备具有典型绿茶风味特征的舞钢绿茶机械和手工样品各 3 份，机械加工所制绿茶命名为 A1、A2、A3，手工制作的绿茶命名为 B1、B2、B3。

1.2.2　感官审评　准确称取茶样 3 g 用 150 mL 沸水冲泡 4 min，由 7 名审评专家按照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》中绿茶的审评方法进行评审[15]，取平均分。茶样的最终感官审评成绩满分为 100 分，其中外形占 25%，汤色占 10%，香气占 25%，滋味占 30%，叶底占 10%。

1.2.3　HS-SPME 条件　采用 HS-SPME 对样品进行前处理[16]。准确称取 300 mg 茶样放置于 20 mL 的顶空萃取瓶中，分别加入 1 g NaCl、10 μL 50 mg/mL 癸酸乙酯溶液、5 mL 纯水，放入磁力转子加盖摇匀。随后置于加热型磁力搅拌器中在 400 $r \cdot min^{-1}$ 搅拌条件下 80 ℃ 下水浴 20 min，然后将老化过的固相微萃取头放入顶空萃取瓶中同样条件下进行吸附，时长为 30 min，将提取吸附过样品的固相微萃取头插入仪器进样口，250 ℃ 条件下解吸附 3 min。

解吸附参数条件：将吸附过茶叶气味的固相微萃取头置于进样口中，进样口温度设置 250 ℃，解吸附保持 3 min，从而释放香气提取物至 GC-MS 系统中。

1.2.4　GC-MS 分析　GC 条件：进样口和传输线温度设置为 250 ℃；载气使用高纯度氦气（纯度≥99.99%）；采用不分流的进样方式，柱流量为 1.2 $mL \cdot min^{-1}$。程序升温：40 ℃（3.5 min），以 10 $℃ \cdot min^{-1}$ 升至 100 ℃，以 7 $℃ \cdot min^{-1}$ 升至 180 ℃，以 25 $℃ \cdot min^{-1}$ 升至 280 ℃，保持 7 min。

MS 条件：EI 模式下工作，离子源温度为 230 ℃，四极杆温度为 150 ℃，电压为 70 eV。质谱仪使用离子扫描模式（Ion scanning mode，SIM），GC-MS 下机数据使用 MassHunter MS 定量分析软件进行处理[17]。采用正构烷烃标准品（C7~C35）测定各个化合物的保留指数（RI），使用 NIST 谱库检索程序对挥发性化合物的质谱图数据进行搜索匹配，质谱比对结果结合 RI 以确定各色谱峰所对应的挥发性化合物结构。

1.2.5　挥发性成分的定量和 ROAV 的计算　采用相对定量法对挥发性成分进行定量，按下式计算：

$$C = \frac{A_i}{A_{总}} \times 100$$

式中：C 为任一组分的相对含量，%；A_i 为任一组分的色谱峰面积；$A_{总}$为所有组分的总色谱峰面积。

ROAV 计算公式如下：

$$C_i = \frac{C_{is} \times A_i}{A_{is}}$$

$$ROAV_i = \frac{C_i}{OT_i}$$

式中：$ROAV_i$ 为任一组分的香气活度值；C_i 为任一组分的质量浓度，μg/L；$C_i s$ 为内标的质量浓度，μg/L；A_i 为任一组分的色谱峰面积；$A_i s$ 为内标的色谱峰面积；OT_i 为任一组分在水中的香气阈值，μg/L。香气阈值来源于书本 *Compilations of odour threshoid values in air,water and other media*（Edition 2011）。

1.3　数据处理

采用 Excel2016 软件预处理试验数据，采用 SPSS27.0 进行香气成分的单因素方差分析，采用 Graphpad prism9.5 统计差异并作图，采用 Origin 2024 作热图。

2　结果与分析

2.1　不同制茶方式所制绿茶感官审评

对机械和手工制作的舞钢绿茶进行感官审评，结果如表 1 所示，两类茶样的感官表现均较优，总分都超过 90 分，在外形上手工制作的绿茶更扁平、直，香气上的评分也较高，具有清花香，但在汤色上手工制作的绿茶较机械加工所得的绿茶略差，机械加工的绿茶汤色更明亮。以外形、汤色、香气、滋味（权重最高）、叶底为维度，结果显示两类茶样感官品质均较优（总分超 91），其中手工茶样（如 B2）总分更高（最高 94.35），外形更“扁平直”、香气带花香，机械类茶样外形稍欠规整，但两类茶样的香气（清香/嫩香）与滋味（鲜爽/鲜醇）均是突出优势，结合总分发现机械制作的绿茶评分接近相对稳定，而手工制作的绿茶总分差异明显，存在波动。

表 1　机械和手工制作舞钢绿茶感官审评

Table 1　Sensory evaluation of machine-processed and manually-processed wugang green tea

茶样	外形（25%）		汤色（10%）		香气（25%）		滋味（30%）		叶底（10%）		总分
	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	评分	评语	
A1	91	欠扁平、直、尚光滑	93	黄绿、明亮	93	嫩香	95	鲜醇	94	嫩绿、匀齐	93.2
A2	90	欠扁平、不直、尚光滑	91	黄绿、尚明亮	92	清香	95	鲜醇	91	嫩绿、尚匀齐	92.2
A3	91	扁平、不直、尚光滑	90	黄绿、尚明亮	93	嫩香	96	鲜醇	92	嫩绿、尚匀齐	93
B1	94	扁平、直、光滑	91	浅黄、明亮	93	清香	92	鲜爽	93	鲜嫩、尚明亮	92.75
B2	95	扁平、直、光滑	92	黄绿、尚明亮	96	清香、带花香	94	鲜醇	92	嫩绿	94.35
B3	91	扁平、直、尚光滑	88	浅黄、尚明亮	95	嫩香、带花香	89	鲜爽略带糊味	93	嫩绿、尚明亮	91.3

2.2 不同制茶方式所制绿茶挥发性成分的 GC-MS 鉴定与分析

挥发性代谢物在决定茶叶口感和香气特征中起着关键作用[18], 采用 HS-SPME-GC-MS 方法对机械加工和手工制作的绿茶中的挥发性成分进行分析, 最终从不同工艺制作绿茶中共鉴定出 81 种挥发性成分(表 2), 根据官能团的性质可分为 6 类, 包括酯类(22 种)、醇类(19 种)、醛类(8 种)、萜类(7 种)、酮类(15 种)和其他类(10 种)。从表 2 可知, 酯类(22)化合物数量最多, 其次是醇类(19)、酮类(15), 这三类化合物含量在机械加工和手工制作茶的挥发性物质占比分别为 84%、80%, 各类化合物占总挥发物浓度的百分比见图 1。

表 2 机械和手工制作舞钢绿茶挥发性成分及相对含量

Table 2 Volatile components and relative content of wugang green tea by mechanical and handmade methods

组别	化合物名称	保留指数	相对含量(%)						香气特征
			A1	A2	A3	B1	B2	B3	
醇类	2-甲基-1-丙醇	1.911	3.460	3.913	3.609	4.150	4.330	4.258	醇甜香
醇类	3-戊醇	2.363	0.206	0.282	0.249	0.074	0.095	0.049	温和的醇香
醇类	1-戊醇	3.02	0.208	0.191	0.201	0.160	0.141	0.146	醇香与果香
醇类	1-己醇	4.229	0.090	0.072	0.082	0.209	0.244	0.185	淡淡的果香和醇香
醇类	2-乙基-1-己醇	7.375	0.211	0.235	0.160	0.042	0.038	0.053	微弱果香和醇香
醇类	苯甲醇	7.532	0.153	0.133	0.139	0.068	0.179	0.160	花香和醇香
醇类	苯乙醇	9.939	0.591	0.418	0.326	0.488	0.478	0.674	玫瑰花香
醇类	1-(4-甲基苯基)乙醇	10.004	0.219	0.210	0.282	0.033	0.029	0.096	微弱的花香和醇香
醇类	α,4-二甲基环己烷甲醇	14.207	0.190	0.133	0.133	0.137	0.137	0.111	微弱的醇香
醇类	1-癸醇	16.086	0.088	0.038	0.036	0.170	0.163	0.174	果香和醇香
醇类	1-十二醇	25.173	0.425	0.405	0.290	0.065	0.136	0.140	淡淡的醇香
醇类	柏木醇	30.881	0.036	0.036	0.125	0.040	0.040	0.047	松木香
醇类	1-十六醇	35.924	11.504	10.907	10.299	7.513	7.731	7.526	淡淡的醇香
醇类	反-2-己烯-1-醇	4.147	0.040	0.039	0.055	0.042	0.028	0.030	草香与花香
醇类	3,7-二甲基-1,5,7-辛三烯-3-醇	9.65	1.104	1.017	1.022	1.196	1.001	0.895	花香和木香
醇类	芳樟醇	9.398	1.094	1.017	1.022	1.196	1.272	1.287	优雅的花香
醇类	4-萜品醇	12.139	0.097	0.096	0.083	0.208	0.223	0.231	松针和清凉的香气
醇类	α-松油醇	12.626	0.247	0.204	0.211	0.153	0.138	0.131	花香和松木香
醇类	香叶醇	15.289	3.191	3.042	2.564	5.681	5.469	6.669	玫瑰花香
酯类	γ-壬内酯	20.103	0.084	0.076	0.050	0.172	0.169	0.192	奶香和甜香
酯类	5-癸内酯	26.297	0.132	0.127	0.124	0.120	0.117	0.183	奶香和甜香
酯类	二氢猕猴桃内酯	27.596	0.151	0.152	0.149	0.217	0.202	0.276	甜香和果香
酯类	(Z)-7-癸烯-5-内酯	27.254	0.158	0.148	0.125	0.216	0.221	0.342	水果和甜香
酯类	乙酸甲酯	1.383	3.460	3.197	3.325	4.150	4.330	4.277	水果香味
酯类	2-乙酰基丁内酯	4.877	0.012	0.007	0.007	0.005	0.004	0.005	有奶香、焦糖香
酯类	丙酸异戊酯	5.962	0.208	0.192	0.222	0.076	0.088	0.101	水果香气
酯类	己酸乙酯	6.637	0.283	0.329	0.281	0.000	0.000	0.000	水果香
酯类	苯甲酸甲酯	9.234	0.234	0.254	0.166	0.093	0.063	0.078	水果香和花香
酯类	甲酸辛酯	9.874	0.698	0.625	0.678	0.471	0.405	0.362	水果香
酯类	顺-3-己烯醇丁酸酯	12.544	0.195	0.179	0.224	0.304	0.272	0.295	水果和青草香
酯类	乙酸苯乙酯	15.375	0.028	0.033	0.023	0.033	0.032	0.048	花香和甜香
酯类	2-甲氧基苯甲酸甲酯	19.144	1.536	1.303	1.194	0.387	0.354	0.120	水果香和花香
酯类	邻氨基苯甲酸甲酯	19.188	0.047	0.027	0.049	0.032	0.048	0.049	甜香和花香
酯类	己酸己酯	21.111	0.400	0.684	0.513	1.192	1.221	1.112	水果香, 类似梨
酯类	反-2-己烯醇己酸酯	21.709	20.446	19.584	22.637	15.385	14.913	14.739	葡萄香气
酯类	2-(甲氨基)苯甲酸甲酯	22.248	0.013	0.004	0.008	0.141	0.155	0.143	甜香和花香
酯类	十一酸乙酯	26.198	0.011	0.014	0.012	0.088	0.083	0.057	水果香
酯类	顺-3-己烯醇苯甲酸酯	29.468	0.331	0.538	0.379	0.593	0.611	0.650	水果和花香
酯类	茉莉酸甲酯	32.061	0.691	0.707	0.678	0.816	0.985	0.915	茉莉花香
酯类	顺-3-己烯醇水杨酸酯	33.002	0.346	0.378	0.281	0.414	0.399	0.426	水果和清新的草本香
酯类	苯甲酸苄酯	34.359	0.045	0.067	0.042	0.087	0.088	0.135	花香和果香
醛类	异丁醛	1.505	3.460	3.913	3.752	5.122	5.008	5.196	果香和草香
醛类	2-甲基丁醛	2.157	0.176	0.320	0.267	0.304	0.280	0.432	强烈的果香
醛类	对甲基苯甲醛	8.76	0.042	0.037	0.023	0.142	0.192	0.122	甜香和杏仁香

续表 2

组别	化合物名称	保留指数	相对含量(%)						香气特征
			A1	A2	A3	B1	B2	B3	
醛类	藏红花醛	13.127	0.052	0.045	0.042	0.037	0.036	0.039	花香和甜香
醛类	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-甲醛	15.246	0.017	0.015	0.016	0.019	0.018	0.021	果香和花香
醛类	3-甲基-2-丁烯醛	3.224	0.020	0.035	0.034	0.028	0.026	0.023	果香和辛香
醛类	柠檬醛	16.086	0.177	0.168	0.154	0.538	0.544	0.636	强烈的柠檬香
醛类	反-柠檬醛	15.95	0.059	0.168	0.154	0.778	0.544	0.636	清新的柠檬香气
酮类	2,3-丁二酮	1.733	3.460	3.913	3.894	5.122	5.008	5.196	奶油、甜香的气息，提升香气的丰富度和醇厚感
酮类	2,2,6-三甲基环己酮	7.532	0.232	0.204	0.171	0.057	0.061	0.054	木香和果香
酮类	苯乙酮	8.34	0.067	0.111	0.077	0.213	0.151	0.220	甜香和果香
酮类	3,3,5-三甲基环己酮	8.577	0.109	0.091	0.092	0.054	0.051	0.040	木香和果香
酮类	4'-羟基苯乙酮	24.326	0.074	0.097	0.030	0.148	0.137	0.145	甜香和果香
酮类	2-十三烷酮	26.347	0.035	0.026	0.028	0.019	0.022	0.031	微弱的果香和酮香
酮类	覆盆子酮	27.856	1.117	1.082	1.153	1.766	1.777	1.586	覆盆子的水果香
酮类	6-甲基-5-庚烯-2-酮	6.323	0.630	0.675	0.710	0.371	0.296	0.218	果香和辛香
酮类	(E)-3-辛烯-2-酮	7.453	0.083	0.047	0.129	0.209	0.280	0.288	果香和酮香
酮类	2-壬烯-4-酮	10.203	0.086	0.083	0.070	0.278	0.208	0.209	果香和酮香
酮类	2,6,6-三甲基-2-环己烯-1-酮	10.894	0.663	0.623	0.505	0.611	0.496	0.637	木香和果香
酮类	*β*-大马士酮	21.209	1.629	1.842	1.844	0.132	0.137	0.117	浓郁的花香和甜香
酮类	*α*-紫罗兰酮	23.022	0.073	0.052	0.036	0.073	0.058	0.085	紫罗兰般的花香
酮类	香叶基丙酮	24.234	0.599	0.444	0.318	1.049	1.176	1.193	微弱的花香和果香
酮类	*β*-紫罗兰酮	25.802	0.116	0.148	0.167	0.856	0.856	0.901	雅的花香
萜类	*α*-蒎烯	5.337	0.928	0.527	0.476	0.398	0.624	0.442	松木香
萜类	月桂烯	6.433	0.417	0.399	0.304	0.444	0.442	0.305	清新的花香和柑橘香
萜类	3-蒈烯	6.899	0.444	0.424	0.478	0.627	0.633	0.713	松木香
萜类	*α*-萜品烯	7.045	0.014	0.010	0.009	0.011	0.011	0.034	松针般香气
萜类	罗勒烯	7.558	0.528	0.537	0.539	0.069	0.091	0.099	花香和草香
萜类	萜品烯	9.042	0.103	0.100	0.097	0.129	0.107	0.127	松针和柑橘香
萜类	*γ*-萜品	8.195	0.379	0.455	0.412	0.066	0.065	0.086	松针和柠檬香
其他类	2,5-二甲基吡嗪	4.98	0.000	0.000	0.000	0.125	0.141	0.137	烤香、坚果香
其他类	2,6-二甲基吡嗪	4.98	0.010	0.008	0.006	0.016	0.018	0.028	烤香和坚果香气
其他类	2(5H)-呋喃酮	4.997	0.195	0.175	0.182	0.040	0.027	0.011	甜香、焦糖香
其他类	2-戊基呋喃	6.478	0.075	0.163	0.092	0.085	0.080	0.092	焦糖、坚果香
其他类	2-乙酰基吡咯	8.31	0.235	0.224	0.223	0.021	0.022	0.101	烤香和坚果香
其他类	6,7-二氢-5-甲基-5H-环戊并(*c*)吡喃	11.075	0.063	0.140	0.097	0.047	0.044	0.060	甜香
其他类	吲哚	17.117	16.868	17.047	16.532	13.205	12.883	13.072	
其他类	苯乙烯	4.589	0.066	0.139	0.094	0.047	0.046	0.032	甜香和橡胶
其他类	顺式茴芹脑	16.687	0.269	0.224	0.179	0.550	0.590	0.592	香辛料香气
其他类	(E)-2-甲基-3,5-庚二烯	9.524	0.089	0.134	0.046	0.072	0.072	0.064	清新的草香和淡淡的果香

注：香气来源从PubChem中获得。

由于化学结构的差异，各化合物在 GC-MS 谱图中的峰响应强度差别迥异，因此具有不同官能团结构的化合物峰面积往往不具有可比性。然而，具有相同官能团的化合物的化学性质较为类似，其含量往往与峰面积呈正比[19]，可以反映出不同制作工艺中各类别化合物的大致分布情况。如图 1 所示，机械加工、手工制作的舞钢绿茶中相对浓度最高的化合物种类相同，化合物数量最多的酯类中反-2-己烯醇己酸酯含量最高，乙酸甲酯、2-甲氧基苯甲酸甲酯等分别具有玫瑰香气、青柠檬香气，为绿茶香气贡献了果香和花香[20]。数量次之的醇类、酮类及其它类相对含量高的化合物分别是 1-十六醇、2,3-丁二酮、吲哚。醇类中 2-甲基-1-丙醇具有清香，是构成绿茶清香的关键成分，芳樟醇及其氧化物具有百合花或玉兰花香气，增加了绿茶的花香韵味[21]，香叶醇则具有玫瑰香气，使绿茶香气更为丰富。酮类中 *α*-紫罗兰酮、*β*-紫罗兰酮具有紫罗兰香，对绿茶香气影响较大[22]。结合图 1，可发现手工加工和机械制作的绿茶在醇类、酯类、酮类、醛类以及其他类化合物含量占比上都存在差异，手工制作绿茶中，醇类香气化合物占比达 41.53%，较机械加工绿茶的 36.25% 高出 5.28%；酮类化合物占比亦高于机械加工绿茶 1.65%。而在酯类及其他类香气化合物的占比上，机械加工绿茶则分别较手工制作绿茶高出 5.02% 与 3.75%。

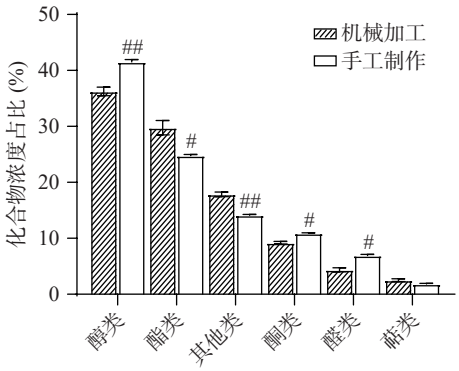


图 1 机械加工和手工制作舞钢绿茶挥发性成分分类

Fig.1 Classification of volatile compounds in machine-processed and manually-processed wugang green tea

注: 图中#表示浓度占比差异显著(P<0.05); ##表示浓度占比差异显著(P<0.01)。

2.3 不同制茶方式所制绿茶中关键差异性化合物分析

作为一种无监督的区分方法, PCA 采用降维原理将多个指标转换为有限数量的综合指标, 这些综合指标被称为主成分(PC)。在本研究中, 基于手工制作和机械加工绿茶挥发性成分的峰面积, 对不同方式制作绿茶中鉴定出的 82 种挥发性成分进行多元统计分析。由 PCA 得分图(图 2)可知, 机械加工和手工制作的样本在一定程度上有分离趋势, 但并非完全分离, 说明这两个组别的绿茶的挥发性成分含量水平存在差异。为了确定不同加工方式的绿茶中关键差异性成分, 采用了监督的 PLS-DA 方法来评估不同加工工艺下的绿茶样品的挥发性化合物。上述 PCA 和 PLS-DA 表明, 挥发性化合物受不同加工工艺影响较大。通过 200 次数据分组随机打乱验证, R^2 反映模型解释力、Q^2 体现预测力, 原始模型 R^2、Q^2 较高, 置换后二者迅速下降, Q^2 回归线斜率为正值但远低于原始值, 说明模型无过拟合风险, 能有效区分分组且具预测能力, 可用于后续差异分析, 夯实了模型可靠性。通常 PLS-DA 中变量投影重要性(Variable importance in projection, VIP)大于 1 的化合物可作为区分不同组别的关键香气成分, 通过上述 PLS-DA, 从 81 种挥发性成分中共筛选出区分不同制作方式绿茶的 16 种关键差异性成分(VIP>1), 使用单向方差和 VIP(P<0.05, VIP>1)标准, 筛选出了 16 个关键的差异代谢物, 结果表明共有覆盆子酮等 16 种成分在手工制作和机械加工两组样品之间存在统计学差异(P<0.05)。

为直观清晰呈现样本中化学物质的含量分布差异, 绘制此热图, 先对各物质数据归一化处理[23], 再按规则将数据与颜色映射关联(图 3)。从右侧的颜色标尺能够明确看到, 蓝色所代表的化合物含量处于较高水平, 其数值可高达 15.14; 而白色对应的化合物含量则较低, 数值能低至−5.24。观察热图, 发现这些化学物质的含量分布呈现出较为鲜明的特征, 依据颜色的差异, 大致可以区分出不同含量水平的类别。其

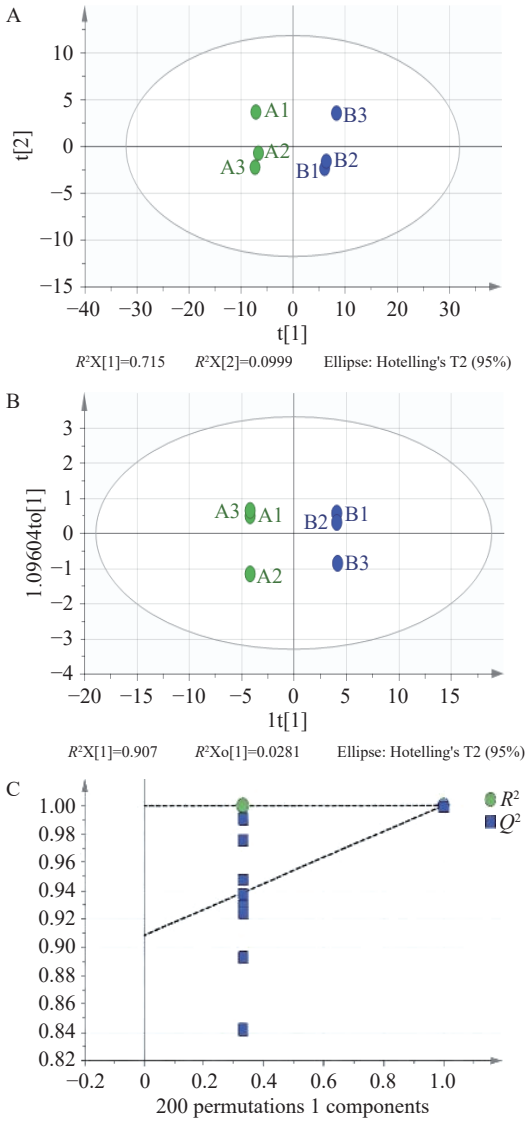


图 2 机械加工和手工制作舞钢绿茶挥发性成分的 PCA、PLS-DA 得分图、验证模型图

Fig.2 Score plots and validation model plot of PCA and PLS-DA for volatile compounds in machine-processed and manually-processed wugang green tea

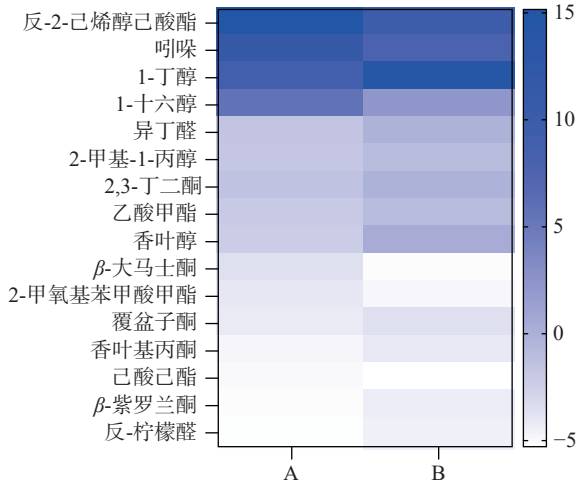


图 3 机械加工和手工制作舞钢绿茶中关键差异性挥发性成分热图

Fig.3 Heatmap of key differential volatile compounds in machine-processed and manually-processed wugang green tea

中反-2-己烯醇己酸酯、吲哚、1-十六醇等化学物质，在热图中呈现出深蓝色，这清晰地表明它们在样本中的含量显著高于平均值。而像反-柠檬醛、β-紫罗兰酮等化学物质，其颜色偏浅，呈现白色调，也就意味着它们在样本中的含量是低于平均值的。在机械加工（A 组）与手工制作（B 组）绿茶的对比中，反-2-己烯醇己酸酯、吲哚、1-十六醇等化合物在机械加工组相对富集（颜色偏深），1-丁醇、香叶醇、2,3-丁二酮等在手工组含量表现更突出（部分区域颜色有差异）。这些差异化合物可作为区分两种制作工艺绿茶的潜在标志，这些化合物以酯类和酮类居多，主要呈现清新瓜果和甜香花香等优良气味特征。

2.4　不同加工方式所制绿茶中关键差异性挥发性成分的定量及 ROAV 分析

茶叶中挥发性成分复杂多样，不同化合物的气味阈值与香气特征差异显著，对机械加工和手工制作的舞钢绿茶贡献程度也有所不同。为精准剖析关键挥发性成分对两种制作方式绿茶香气的具体贡献，运用 ROAV 测定法进行深入分析。ROAV 测定法作为食品关键香气活性成分的主流分析手段之一，可准确评估单一香气成分对整体香气的作用[24]。通常，ROAV 大于 1 时，该化合物对整体样本具备香气贡献，且 ROAV 越高，香气贡献程度越大[25]。

如表 3 所示，在上述 16 种香气成分中，ROAV> 1000 的化合物有 11 种，其中异丁醛的 ROVA 最大，它的香气主要呈现出甜香、果香的特点，类似天然的樱桃等香气，香气较为浓郁且持久[25]。接着是具有清香气味的吲哚，其次是覆盆子酮，它呈现出覆盆子果香，这种香气带有清新、甜美的特质，同时还伴有水果香甜味，甜香柔和不腻，与果香相辅相成，丰富了整体香气层次。而后依次为具有奶油、甜香的气息的 2,3-丁二酮等，推断这些物质对舞钢绿茶香气品质具有关键性贡献作用。此外 100≤ROAV≤1000 的有 2 种，分别是具有水果香的乙酸甲酯[26]，具有花香紫罗兰香的 β–紫罗兰酮。1≤ROAV≤100 的有 3 种，分别为 2-甲基丁醛、2-壬烯-4-酮、1-戊醇。这些化合物可能共同决定了舞钢绿茶的香气品质特征。不同化合物因其 ROAV 表现，在茶叶香气品质形成中扮演着不同角色，共同塑造了茶叶独特的香气特征。香叶焦磷酸糖苷前体在芳樟醇合成酶和香叶醇合成酶的作用下分别水解释放芳樟醇和香叶醇，芳樟醇和香叶醇是凤凰单丛茶的重要香气成分[27]。β-紫罗兰酮带有特殊的紫罗兰花香，是 β-胡萝卜素在绿茶加工过程中热裂解或红茶发酵过程中通过酶促氧化降解得到的[28]，有研究表明该物质是绿茶、红茶的关键呈香成分。对比相关研究发现，反式-β-紫罗兰酮和己醛等也曾被鉴定为不同工艺绿茶、安吉白茶和英德红茶中的关键香气活性成分[29]。此外，β-紫罗兰酮和壬醛等还被认为是区分不同凌云白毫绿茶的关键差异香气化合物[30]。在 16 种关键香气成分里，异丁醛的香气活度最高，是舞钢绿茶香气的核心贡献者，呈现甜香、果香与樱桃香，且香气持久；覆盆子酮、芳樟醇等物质则分别赋予茶叶果香、花香等特征，共同奠定茶叶香气基底。对比手工制作绿茶和机械加工绿茶，发现反-2-壬烯-1-醇、吲哚的 ROVA 在机械加工中会高于手工制作的绿茶，而香叶醇、2,3-丁二酮、香叶基丙酮等在手工制作的绿茶中更高。

表 3　机械加工和手工制作舞钢绿茶挥发性化合物的 ROAV 及香气特征分析

Table 3　Relative odor activity value (ROAV) and aroma characteristics of volatile compounds in machine-processed and manually-processed wugang green tea

化合物名称	阈值（μg/mL）	香气描述	ROAV					
			A1	A2	A3	B1	B2	B3
反-2-壬烯-1-醇	0.13	草香与花香	6137.80	6843.83	6468.19	4578.19	4313.27	4749.01
1-丁醇	1.85	醇香和微弱水果香	39658.49	24382.24	21456.76	36673.54	26735.83	34262.42
香叶醇	7.5	玫瑰花香	2149.29	1969.24	2384.34	2727.07	2459.78	2461.87
乙酸甲酯	47	水果香味	233.86	427.13	122.96	324.89	147.72	258.16
β-紫罗兰酮	7	雅的花香	337.52	411.13	441.93	457.79	446.64	397.23
香叶基丙酮	0.06	微弱的花香和果香	31731.88	30563.10	31863.66	53961.67	77031.95	56833.84
覆盆子酮	0.01	覆盆子的水果香	1099122.65	2007510.32	577921.35	1526990.91	694283.45	1213371.47
2-甲基-1-丙醇	7.5	醇甜香	1465.50	2676.68	770.56	2035.99	925.71	1617.83
反-柠檬醛	0.04	清新的柠檬香气	4723.12	32768.48	59512.73	79602.11	80865.64	63241.77
吲哚	0.011	甜美花香	4871613.04	4651538.02	4880164.15	4275308.53	4095197.46	3901319.57
1-十六醇	1.1	淡淡的醇香	1500.72	24772.47	30506.00	23556.27	22978.95	22195.92
异丁醛	0.001	果香和草香	10991226.48	20075103.20	5779213.53	15269909.08	6942834.54	12133714.75
2,3-丁二酮	0.006	奶油、甜香的气息	1831871.08	3345850.53	963202.26	2544984.85	1157139.09	2022285.79
1-戊醇	150.2	油脂	3.07	3.24	1.71	3.47	4.05	3.89
2-甲基丁醛	84.3	青香	6.63	7.31	6.99	11.73	11.15	17.39
2-壬烯-4-酮	0.02	瓜果香	13.64	28.88	18.69	45.16	34.86	30.92

注：OTi值为挥发性成分在水中的阈值；香气来源从PubChem中获得。

3 结论

为了确定不同加工方式对绿茶香气成分的影响，对手工制作和机械加工制成的舞钢绿茶样本进行感官审评并对其中的挥发性成分和特征香气成分进行系统的研究。首先按照 GB/T 23776—2018《茶叶感官审评方法》对六个样本进行审评，采用 HS-SPME-GC-MS 分析技术，从两种方式制作的绿茶中共鉴定出 81 种挥发性成分，探明了不同加工方式绿茶的香气物质基础。继而通过多元统计分析方法，从中选出吲哚、1-丁醇等 16 种香气成分是不同制作工艺的绿茶中的关键差异性成分（P<0.05）。随后经 ROAV 分析，最终确定 16 种关键香气活性成分对于区分不同制茶方式的舞钢绿茶具有重要作用，表现为手工制作组中香叶醇、2,3-丁二酮、香叶基丙酮等多数化合物的 ROAV 高于机械加工组，这表明手工组样本中这些香气成分对整体香气的贡献程度更大，两组茶叶香气因这些化合物 ROAV 差异，呈现出不同的香气风格和品质特征。这些成分可作为不同制茶方式舞钢绿茶鉴别的潜在化学标记物，实验结果可为不同加工方式的舞钢绿茶的判别、绿茶风味品质的定向加工和调控提供理论依据。

从感官审评结果来看，传统手工制茶和机械化加工所得茶样感官品质均较优，手工茶样外形更平整，机械加工茶样汤色更明亮，传统手工制茶在保留醛类、醇类、酮类化合物等关键香气物质方面更具优势，而机械化加工在酯类、其他类化合物方面及工艺稳定性表现突出，手工和机械加工各有特色，在香气组成和关键呈香物质上有差别，可以互相借鉴，从而优化制茶工艺、提升绿茶品质、丰富绿茶加工理论，促进茶产业的进一步发展。

© 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] 郭佩华, 闫璐. 绿茶品质分析及其存储影响因素研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(16): 75−78,83. [GUO Peihua, YAN Lu. Research progress on quality analysis and storage influencing factors of green tea[J]. Modern Food, 2022, 28(16): 75−78,83.]

[2] 欧晓西, 黄慧清, 李秋明, 等. 基于 SBSE-GC-O-MS 技术‘梅占’茶关键香气成分分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 271−279. [OU Xiaoxi, HUANG Huiqing, LI Qiuming, et al. Key aromatic compounds analysis of 'Meizhan' tea based on SBSE-GC-O-MS technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 271−279.]

[3] 张春花, 李灿香, 颜学行, 等. 福建茶区不同茶树品种“白牡丹”茶的品质差异分析[J]. 茶叶通讯, 2023, 50(1): 76−82. [ZHANG Chunhua, LI Canxiang, YAN Xuexing, et al. Effects of volatile aroma components in white peony tea by post-fermented of the raw tea with bifenthrin pesticide residues[J]. Journal of Tea Communication, 2023, 50(1): 76−82.]

[4] 张悦, KANG Suyoung, 吕海鹏, 等. 基于 HS-SPME-GC-O/MS 方法分析新、陈大红袍中的关键差异性香气活性成分[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 347−366. [ZHANG Yue, KANG Suyoung, LÜ Haipeng, et al. Analysis of key differential aroma-active components in new and aged Dahongpao oolong teas based on HS-SPME-GC-O/MS technology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 347−366.]

[5] 蔡清寿. 茶叶香气特征及香气提取方法分析[J]. 福建茶叶, 2023, 45(6): 24−26. [CAI Qingshou. Analysis of tea aroma characteristics and aroma extraction methods[J]. Tea in Fujian, 2023, 45(6): 24−26.]

[6] 张春花, 满红平, 颜学行, 等. 云南不同地域(产地)古树茶主要化学成分差异分析[J]. 茶叶通讯, 2023, 50(3): 364−369. [ZHANG Chunhua, MAN Hongping, YAN Xuexing, et al. Comparison of main chemical constituents of ancient tea from different regions of Yunnan[J]. Journal of Tea Communication, 2023, 50(3): 364−369.]

[7] CHEN Yulong, JIANG Yueming, DUAN Jun, et al. Variation in catechin contents in relation to quality of 'Huang Zhi Xiang' Oolong tea (*Camellia sinensis*) at various growing altitudes and seasons[J]. Food Chemistry, 2010, 119(2): 648−652.

[8] 杨娟, 陈善敏, 王杰, 等. 不同杀青方式对扁形绿芽茶风味品质形成的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 59−69. [YANG Juan, CHEN Shanmin, WANG Jie, et al. Effect of different fixing methods on the quality formation of flat-shaped green bud tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 59−69.]

[9] 陈应会, 陈浩. 手工制茶与茶文化发展探究[J]. 山西农经, 2018(14): 55. [CHEN Yinghui, CHEN Hao. Study on handmade tea and the development of tea culture[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2018(14): 55.]

[10] 李文萃, 高华峰, 范起业, 等. 不同炒干条件下夏季日照绿茶的品质变化及香气成分比较[J]. 现代食品科技, 2020, 36(11): 255−262. [LI Wencui, GAO Huafeng, FAN Qiye, et al. Comparison of the quality and aroma components of Rizhao green tea harvested in summer dried under different roasting conditions[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(11): 255−262.]

[11] 张锦程, 余佶, 麻成金, 等. GC-MS 结合 ROAV 分析评价加工工艺对藤茶香气成分的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(12): 20−25,31. [ZHANG Jincheng, YU Ji, MA Chengjin, et al. Analysis of volatile aroma components of *Ampelopsis grossedentata* tea with different processing technology based on GC-MS combined with ROAV[J]. Food & Machinery, 2021, 37(12): 20−25,31.]

[12] 刘珍珍, 陈小华, 李崇勇, 等. 汉中绿茶重要香气成分及其在加工过程中的变化研究[J]. 茶叶通讯, 2021, 48(1): 71−79. [LIU Zhenzhen, CHEN Xiaohua, LI Chongyong, et al. Study on important aroma compounds in Hanzhong green tea and their changes during processing[J]. Journal of Tea Communication, 2021, 48(1): 71−79.]

[13] 刘蔚蓝, 韩丹, 田璐萍, 等. 手工与机械所制晴隆扁形绿茶的感官品质差异[J]. 农技服务, 2024, 41(11): 48−50. [LIU Weilan, HAN Dan, TIAN Luping, et al. Sensory quality difference of Qinglong flat green tea made by hand and machine[J]. Agricultural Technology Service, 2024, 41(11): 48−50.]

[14] 喻俊, 李亚波, 张婕. 不同加工工艺对都匀毛尖茶感官品质及化学成分的影响[J]. 广州化工, 2023, 51(4): 62−64. [YU Jun, LI Yabo, ZHANG Jie. Effect of different processing techniques on sensory quality and chemical components of Duyun Maojian tea[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2023, 51(4): 62−64.]

[15] 周泱妤, 杜玖宏, 郭欢, 等. 不同采摘时间黄金芽绿茶风味化学成分及感官品质分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(7): 294−308.

［ZHOU Yangyu, DU Jiuhong, GUO Huan, et al. A comparative study on flavor compound profiles and sensory attributes of huangjinya green tea harvested at different times[J]. Modern Food Science & Technology, 2025, 41(7): 294−308.］
［16］吴芳英, 贺磊, 王继坤, 等. 四种丽水名优绿茶香气成分分析[J]. 茶叶学报, 2024, 65(6): 37−47. ［WU Fangying, HE Lei, WANG Jikun, et al. Aromatics of four premium Lishui green teas[J]. Acta Tea Sinica, 2024, 65(6): 37−47.］
［17］侯紫妍, 郭俊齐, 张军芳, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术分析不同采摘时期舞钢绿茶的挥发性成分与关键香气活性成分[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(19): 159−168. ［HOU Ziyan, GUO Junqi, ZHANG Junfang, et al. Analysis of volatile components and key odor-active compounds of Wugang green tea at different harvest periods based on HS-SPME-GC-MS technology[J]. Food Research and Development, 2025, 46(19): 159−168.］
［18］郑慕蓉, 谢寿桂, 秦荣基, 等. 基于仿宋斗茶与茶叶感官审评的茶叶品质对比评价[J]. 武夷学院学报, 2024, 43(1): 54−62. ［ZHENG Murong, XIE Shougui, QIN Rongji, et al. Analysis on the quality evaluation of the tea in imitating of song dynasty tea competition and modern tea sensory evaluation[J]. Journal of Nanping Teachers College, 2024, 43(1): 54−62.］
［19］WANG Mengqi, MA Wanjun, SHI Jiang, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC–MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination[J]. Food Research International, 2020, 130: 108908.
［20］孙天雨, 文博, 王春峰, 等. 5-氨基乙酰丙酸对库尔勒香梨果实品质和挥发性代谢物的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 8−17. ［SUN Tianyu, WEN Bo, WANG Chunfeng, et al. Effect of 5-aminolevulinic acid on the quality and volatile metabolites of Korla fragrant pear fruit[J]. Food Science, 2024, 45(23): 8−17.］
［21］HE Guangyun, HOU Xue, HAN Mei, et al. Discrimination and polyphenol compositions of green teas with seasonal variations based on UPLC-QTOF/MS combined with chemometrics[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105: 104267.
［22］石亚丽, 白艳, 马婉君, 等. 安吉白茶挥发性成分及关键呈香成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 261−268. ［SHI Yali, BAI Yan, MA Wanjun, et al. Analysis of volatile components and key aroma-active compounds of anjibaicha[J]. Food Science, 2022, 43(20): 261−268.］
［23］KANG S, YAN H, ZHU Y, et al. Identification and quantification of key odorants in the world's four most famous black teas[J]. Food Research International, 2019, 121: 73−83.
［24］杨婷. ‘黔茶 1 号’直条形绿茶加工过程代谢物变化的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024. ［YANG Ting. Study on the changes of metabolites during the processing of 'Qiancha No. 1' straight-strip green tea[D]. Guiyang: Guizhou University, 2024.］
［25］王梦琪, 朱荫, 张悦, 等. “清香”绿茶的挥发性成分及其关键香气成分分析[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 219−228. ［WANG Mengqi, ZHU Yin, ZHANG Yue, et al. Analysis of volatile composition and key aroma compounds of green teas with fresh scent flavor[J]. Food Science, 2019, 40(22): 219−228.］
［26］陈芝飞, 蔡莉莉, 郝辉, 等. 香气活力值在食品关键香气成分表征中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 329−335. ［CHEN Zhifei, CAI Lili, HAO Hui, et al. Progress in the application of odor activity values in the characterization of key aroma components in foods[J]. Food Science, 2018, 39(19): 329−335.］
［27］李璐, 温明椿, 张海伟, 等. 茶叶香气成分研究进展[J]. 中国茶叶加工, 2025(2): 5−21. ［LI Lu, WEN Mingchun, ZHANG Haiwei, et al. Research progress on tea aroma components[J]. China Tea Processing, 2025(2): 5−21.］
［28］窦宏亮. 绿茶饮料在贮藏中主要生化成分和香气成分的变化及其对茶饮料品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007. ［DOU Hongliang. Study on the change of the main biochemistry、aroma components as well as their influence on the flavor of green tea beverages during storage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007.］
［29］CHEN Xiaohua, CHEN Dejing, JIANG Hai, et al. Aroma characterization of Hanzhong black tea (*Camellia sinensis*) using solid phase extraction coupled with gas chromatography–mass spectrometry and olfactometry and sensory analysis[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 130−136.
［30］HO C T, ZHENG X, LI S M. Tea aroma formation[J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9−27.