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]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 311−321. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040180

LI Lei, ZHANG Xiuqiong, ZHAO Lei, et al. Characteristic Aroma Components of Guangnan Dixu Black Tea and Their Changes during Processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 311−321. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040180

· 分析检测 ·

广南底圩红茶加工过程中香气成分的变化

李　蕾[1], 张秀琼[2], 赵　蕾[1], 李在辉[3], 付　萍[1], 王朝梁[1,*], 冯　颖[1,*]

（1.文山学院三七医药学院, 云南文山 663099;
2.云南师范大学, 云南昆明 650000;
3.文山州土壤肥料工作站, 云南文山 663099）

摘　要: 香气是评价茶叶品质的关键因素。为探究广南底圩红茶加工过程中香气成分的动态演变规律，本研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术（headspace solid-phase microextraction gas chromatography mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS），系统分析了鲜叶（XY）、萎凋（WD）、揉捻（RN）、发酵（FJ）和干茶（GC）五个阶段的挥发性物质变化。结合香气活度值（Aroma-active values，OAV）与主成分分析（principal component analysis，PCA），筛选了各加工环节的关键呈香物质。结果表明：共鉴定出醇、醛、酯、酮、烷烃、烯烃及其他类共 96 种挥发性物质。香气成分在加工过程中呈现显著动态变化：萎凋阶段，醇类（如芳樟醇）含量下降，部分醛类开始形成；揉捻阶段挥发性物质总量增幅最大，醛类（如 (E)-2-己烯醛）、酮类（如 β-紫罗兰酮）及部分烯烃含量显著增加；发酵阶段，醛类（如壬醛）和部分酯类（如水杨酸甲酯）含量持续升高，但酯类总量在干燥阶段因高温挥发而急剧减少；干燥阶段，部分醇类氧化物（如 (E)-芳樟醇氧化物 (吡喃)）和醛类（如 (Z)-3-壬烯-1-醇）含量达到峰值。主成分分析（PCA）显示揉捻阶段样品与其他阶段分离明显，表明揉捻是底圩红茶香气形成的关键工序。最终干茶样品中 OAV>10 的关键香气物质有 9 种，分别为 2-甲基丁醛、庚醛、苯乙醛、反式芳樟醇氧化物（呋喃类）、壬醛、芳樟醇、(Z)-3-壬烯-1-醇、(E)-芳樟醇氧化物和苯甲醛。其中，2-甲基丁醛、壬醛、芳樟醇、(Z)-3-壬烯-1-醇和苯甲醛（OAV>100）贡献尤为突出，共同构成了广南底圩红茶兼具浓郁花香、甜香、果香与清新青草香气的典型特征。

关键词: HS-SPME-GC-MS, 广南底圩红茶, 香气成分, 香气活度值, 动态变化

中图分类号: TS272.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0311−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040180

本文网刊:

Characteristic Aroma Components of Guangnan Dixu Black Tea and Their Changes during Processing

LI Lei[1], ZHANG Xiuqiong[2], ZHAO Lei[1], LI Zaihui[3], FU Ping[1], WANG Chaoliang[1,*], FENG Ying[1,*]

（1.College of Sanqi Medical, Wenshan College, Wenshan 663099, China;
2.Yunnan Normal University, Kunming 650000, China;
3.Wenshan Prefecture Soil and Fertilizer Workstation, Wenshan 663099, China）

Abstract: Aroma was a key factor in evaluating tea quality. To investigate the dynamic evolution of aroma compounds during the processing of Guangnan Dixu black tea, this study utilized headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), to systematically analyze changes in volatile compounds at five processing stages: Fresh leaves (XY), withering (WD), rolling (RN), fermentation (FJ), and dried tea (GC). Aroma-active values (OAV) and principal component analysis (PCA) were used to identify key aroma compounds at each

收稿日期: 2025−04−15

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目（2023J1165）; 文山学院一流专业建设项目（WYZL2420101）。

作者简介: 李蕾（1976−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 932746539@qq.com。

*** 通信作者:** 王朝梁（1965−）, 男, 本科, 研究员, 研究方向: 中药材种植与产品开发, E-mail: 1010816954@qq.com。

冯颖（1999−）, 女, 硕士研究生, 实习研究员, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1085040603@qq.com。

processing stage. A total of 96 volatile compounds were identified, including alcohols, aldehydes, esters, ketones, alkanes, olefins, and others. The aroma components showed significant dynamic changes during processing. At the withering (WD) stage, the content of alcohols (such as linalool) decreased, while some aldehydes began to form. During the rolling (RN) stage, the total amount of volatile compounds increased the most. Aldehydes (such as (E)-2-hexenal), ketones (such as β-ionone), and some alkenes increased significantly. In the fermentation (FJ) stage, aldehydes (such as nonanal) and some esters (such as methyl salicylate) continued to increase in concentration. However, during the drying stage, the total amount of esters sharply decreased due to high-temperature volatilization. At the dried tea (GC) stage, certain alcohol oxides (such as (E)-linalool oxide (pyran)) and aldehydes (such as (Z)-3-nonen-1-ol) reached their peak concentrations. Principal component analysis (PCA) showed that samples from the rolling stage were clearly separated from those of other stages, indicating that rolling was a critical process for aroma formation in Guangnan Dixu black tea. In the final dried tea samples, nine key aroma compounds with OAV greater than 10 were identified: 2-methylbutanal, heptanal, phenylacetaldehyde, trans-linalool oxide (furan type), nonanal, linalool, (Z)-3-nonen-1-ol, (E)-linalool oxide, and benzaldehyde. Among these, 2-methylbutanal, nonanal, linalool, (Z)-3-nonen-1-ol, and benzaldehyde (all with OAVs greater than 100) made particularly significant contributions. Together, they formed the characteristic aroma profile of Guangnan Dixu black tea, which featured intense floral, sweet, fruity, and fresh grassy notes.

Key words: HS-SPME-GC-MS; Guangnan Dixu black tea; aroma components; odor activity values; dynamic changes

香气是评价茶叶品质的核心感官指标之一，直接影响产品的风味特征、市场接受度和经济价值[1]。茶叶中的挥发性香气物质种类繁多，目前已鉴定出超过 600 种，包括醇类、醛类、酯类、酮类、烃类等，虽然仅占干物质质量的 0.03%~0.05%，却对茶叶的独特香型起着决定性作用[2]。茶叶的香气特征主要受茶树品种（原料）和加工工艺两大因素影响[3]。红茶加工过程中的关键工序（萎凋、揉捻、发酵、干燥）涉及复杂的物理变化、酶促反应（如氧化、水解）和非酶促反应（如热解、酯化、Strecker 降解），这些反应共同驱动着香气前体物质的转化、释放和挥发，最终塑造了红茶特有的香气品质。

底圩茶是云南省广南县底圩乡特有的珍贵茶树种质资源，拥有三百余年的栽培历史，已被认定为国家农产品地理标志产品[4]。其富含茶多酚、咖啡碱、多糖等多种生物活性物质，具有显著的降血糖、抗氧化、抗肿瘤及调节免疫力等健康功效[5−6]，在功能食品开发中具有广阔前景。底圩茶可加工成红茶、白茶、绿茶和竹筒茶等，其中底圩红茶以其独特的风味深受消费者喜爱。然而，目前关于底圩红茶的研究多集中于其生化成分和保健功能[5−6]，对其加工过程中香气成分动态变化规律及关键呈香物质形成机制的系统研究尚属空白。近年来顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术（HS-SPME-GC-MS）结合香气活度值（Aroma active values，OAV）与多元统计分析（如主成分分析 PCA、正交偏最小二乘法判别分析 OPLS-DA）已被成功应用于浮梁红茶[7]、信阳红茶[8]、黄山红茶[9] 等不同品类红茶的关键香气物质鉴定与差异分析。

因此，为深入理解底圩红茶特征香气形成的化学基础及工艺影响，本研究采用 HS-SPME-GC-MS 技术，系统追踪底圩红茶加工全流程中挥发性香气成分的动态变化。结合香气活度值（OAV）、主成分分析（PCA）、正交偏最小二乘法判别分析（OPLS-DA）等多元统计方法，旨在阐明不同加工阶段香气物质的种类、含量及组成变化规律；筛选各工序环节及最终干茶中的关键差异挥发性物质及核心呈香化合物；初步探讨关键特征香气物质的可能代谢途径。本研究将为解析底圩红茶香气品质的形成机制提供科学依据，并为优化其加工工艺、定向调控和提升香气品质提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

茶鲜叶　于 2024 年 4 月采于云南省广南县底圩乡；癸酸乙酯标准品（99%）　购自阿拉丁生化科技股份有限公司（上海）。

DVB/CAR/PDMS 型固相微萃取头（50/30 μm）　美国默克公司；PDMS/ DVB 萃取针　美国 Supelco 公司；7890B 气相色谱仪、DB-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）　美国安捷伦科技公司；DHG-9023A 烘箱　上海楚度仪器设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　茶样制备　茶鲜叶为白毛茶一芽二叶鲜叶，按文山底圩姑娘茶厂的加工流程制备茶样：槽式萎凋（热风 35~38 ℃）4~6 h，揉捻 50 min，发酵（温度 24~28 ℃）8 h，初烘（毛火温度 110~120 ℃）15 min，文火（80~90 ℃）烘至最终含水率≤6%。在鲜叶、萎凋、揉捻、发酵、干燥阶段分别取样，编号为 XY、WD、RN、FJ 和 GC，锡箔纸包裹后立即置于液氮中固定，冻干后置于−80 ℃ 冰箱中待测，每个阶段样品重复三次。

1.2.2　挥发性成分检测　HS-SPME 萃取条件[10]：称取粉碎过 60 目筛的毛茶样品 0.5 g 置于 20 mL 顶空瓶中，吸取 10 mg/L 内标（癸酸乙酯）20 μL 于顶空瓶中，再吸取 5 mL 沸水加入顶空瓶中。盖上顶空瓶盖，摇晃混匀，置于 80 ℃ 烘箱中平衡 10 min 后，插

入预先老化好的 SPME 手柄，伸出萃取头，于 80 ℃烘箱中恒温萃取 50~60 min。待萃取饱和后，从烘箱中取出顶空瓶和 SPME 手柄，收回萃取头，拔出手柄，以最快速度手动进样，进行 GC-MS 分析。

色谱条件：使用高纯氦气作为载气，流速设置为 1 mL/min。进样口温度设为 250 ℃，采用不分流方式进样，并设定溶剂延迟为 5 min。升温程序：首先在 60 ℃下保持 2 min，然后以 3 ℃/min 的速率升温至 220 ℃，并在此温度范围内保持 10~20 min，最后将温度进一步升高至 280 ℃[10]。

质谱条件：电子轰击离子源（EI），离子源温度 230 ℃，质谱接口温度 280 ℃，电子能量 70 eV，采取全扫描模式，质量扫描范围：m/z 40~400[11]。

1.2.3　挥发性物质定性定量分析　使用 Qualitative Analysis Workflows B.08.00 软件分析，检测完成后下载原始数据，通过总离子流图进行定性分析。使用 Mass Hunter 定量分析软件 B.06.00 访问样本数据并下载质谱文件。根据 NIST 在线数据库（https://webbook.nist.gov/chemistry，于 2024 年 4 月 18 日访问）的参考值，通过保留指数（Retention Index）、CAS 号等进行匹配以完成定性分析。挥发性成分的相对定量采用 Su 等[10] 建立的方法，其相对含量（μg/kg）的计算公式如下：

$$A_x = [(S_1/S_2)\times C\times 20]/0.5\times 1000$$

式中：A_X 为目标化合物在茶叶中的相对含量（μg/kg）；S_1 为目标化合物的峰面积；S_2 为内标物的峰面积；C 为内标物在 20 mL 顶空瓶中的浓度（mg/L）。

1.2.4　OAV 计算　OAV 为各挥发性成分相对含量与气味阈值（Overflow Threshold，OT）的比值，其中 OT 值来源于参考文献中各挥发性化合物在水中的气味阈值[12]。OAV≥1 的化合物被认定为样品中的关键香气活性物质[13]，对样品的特征香气有显著贡献作用。OAV 计算公式如下：

$$OAV = C/T$$

式中：C 为香气成分相对含量（μg/kg）；T 为在水溶环境下该物质的感觉阈值（μg/kg）。

1.2.5　感官审评方法　组织 5 名具有高级评茶员及以上资格的评茶员按照 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》中红茶审评方法进行感官审评。

1.3　数据处理

通过 Microsoft Excel 2010 对 GC-MS 数据进行预处理，采用 SPSS 20 进行单因素方差分析；输入 SIMCA14.1 中进行主成分分析（PCA）、正交偏最小二乘法-判别分析（Orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）；使用迈维云平台（https://www.chiplot.online）绘制聚类分析热图，使用 Graphpad Prism 9.0 软件绘图，所有数据均为 3 次重复的平均值±标准差。

2　结果与分析

2.1　红茶加工过程中挥发性物质变化

采用 GC-MS 分析底圩红茶加工各阶段（鲜叶、萎凋、揉捻、发酵、干燥）的挥发性物质，共鉴定出 96 种挥发性物质（表 1）。涵盖醇类（19.79%）、醛类

表 1　广南底圩红茶加工过程中的挥发性物质

Table 1　Volatile substances during the processing of Guangnan Dixu black tea

分类	挥发性物质	CAS号	保留时间（min）	相似度	分子式	含量（μg/kg）				
						XY	WD	RN	FJ	GC
醇类	1-己醇	111-27-3	3.24	83	$C_6H_{14}O$	–	–	117.72±4.58^a	62.86±3.83^b	–
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	6.93	79	$C_8H_{16}O$	28.54±1.46	–	–	–	–
	苯甲醇	100-51-6	8.49	93	C_7H_8O	–	187.34±6.41^c	809.50±4.62^a	467.21±6.92^b	459.55±30.16^b
	芳樟醇	78-70-6	11.70	92	$C_{10}H_{18}O$	1438.69±16.42^a	948.73±13.33^d	1168.17±44.53^b	441.66±21.43^e	996.13±3.59^c
	苯乙醇	22258	12.48	73	$C_8H_{10}O$	94.34±1.00^c	441.70±15.43^b	–	537.94±32.16^a	528.13±11.71^a
	(Z)-3-壬烯-1-醇	10340-23-5	13.55	83	$C_9H_{18}O$	–	–	–	–	60.59±1.30
	α-萜品醇	98-55-5	15.27	81	$C_{10}H_{18}O$	15.06±0.71^b	28.62±1.45^a	–	–	–
	橙花醇	106-26-3	17.48	84	$C_{10}H_{16}O$	42.48±2.00^d	107.26±2.72^b	257.64±10.65^a	96.26±2.09^c	112.16±3.67^b
	香叶醇	106-24-1	18.13	96	$C_{10}H_{18}O$	495.35±6.56	–	–	–	–
	1-癸醇	112-30-1	27.33	78	$C_{10}H_{22}O$	–	3.57±0.18	–	–	–
	橙花叔醇	40716-66-3	30.81	96	$C_{15}H_{26}O$	34.78±1.29^{ab}	32.41±1.60^{ab}	45.41±16.35^a	24.99±4.46^b	34.08±2.46^{ab}
	雪松醇	77-53-2	32.12	77	$C_{15}H_{26}O$	15.63±0.60^c	13.64±1.39^c	96.23±6.14^a	63.10±2.29^b	3.30±0.41^d
	叶绿醇1	102608-53-7	42.14	94	$C_{20}H_{40}O$	–	24.35±0.22^b	46.44±2.85^a	8.19±0.54^c	–
	1-十二醇	112-53-8	48.49	78	$C_{12}H_{26}O$	–	2.15±0.15^b	–	3.33±0.07^a	–
	1-十六醇	36653-82-4	48.50	95	$C_{16}H_{34}O$	–	–	–	–	7.61±0.89
	叶绿醇2	150-86-7	49.37	94	$C_{20}H_{40}O$	104.83±0.41^b	71.37±0.52^c	119.54±6.34^a	7.93±0.31^e	19.60±0.64^d
	顺式芳樟醇氧化物	5989-33-3	10.36	84	$C_{10}H_{18}O_2$	58.32±0.60^b	185.49±6.37^a	–	–	–
	反式芳樟醇氧化物（呋喃类）	34995-77-2	11.00	89	$C_{10}H_{18}O_2$	71.17±1.95^d	–	241.7425.63^b	176.62±2.10^c	347.42±4.55^a
	(E)-芳樟醇氧化物（吡喃）	39028-58-5	14.53	78	$C_{10}H_{18}O_2$	–	19.02±0.67^c	52.45±1.02^b	25.25±1.69^c	342.91±18.57^a

续表 1

分类	挥发性物质	CAS号	保留时间（min）	相似度	分子式	含量(μg/kg)				
						XY	WD	RN	FJ	GC
醛类	2-甲基丁醛	96-17-3	0.84	85	$C_5H_{10}O$	–	–	–	227.42±10.45^{a}	109.89±3.21^{b}
	3-甲基丁醛	590-86-3	1.46	92	$C_5H_{10}O$	–	334.79±2.13	–	–	–
	糠醛	35796	2.57	81	$C_5H_4O_2$	–	–	13.73±0.52^{b}	13.83±0.54^{b}	15.07±0.64^{a}
	己醛	66-25-1	2.78	92	$C_6H_{12}O$	172.11±1.59^{d}	153.80±3.69^{e}	572.13±5.36^{a}	195.77±9.14^{c}	213.31±11.08^{b}
	(E)-2-己烯醛	6728-26-3	2.98	88	$C_6H_{10}O$	–	–	–	141.83±1.50^{b}	414.39±11.31^{a}
	(Z)-3-己烯醛	6789-80-6	3.52	86	$C_6H_{10}O$	–	60.55±1.10	–	–	–
	庚醛	111-71-7	3.76	74	$C_7H_{14}O$	–	–	–	–	75.90±1.33
	苯甲醛	100-52-7	6.32	93	C_7H_6O	110.55±1.57^{e}	228.15±2.31^{d}	340.83±14.54^{c}	401.60±6.31^{b}	571.12±6.48^{a}
	苯乙醛	122-78-1	8.72	97	C_8H_8O	135.00±2.45^{d}	159.32±2.67^{d}	244.72±10.26^{b}	586.86±8.61^{a}	206.40±3.67^{c}
	壬醛	124-19-6	11.37	81	$C_9H_{18}O$	–	–	–	449.84±24.98^{a}	311.72±19.46^{b}
	(E)-2-壬烯醛	18829-56-6	14.09	83	$C_9H_{16}O$	–	20.37±0.90^{c}	49.37±0.91^{a}	9.43±1.17^{d}	22.62±0.82^{b}
	癸醛	112-31-2	15.99	94	$C_{10}H_{20}O$	17.13±0.55^{d}	22.69±0.84^{c}	34.98±1.55^{a}	28.38±3.27^{b}	32.51±0.95^{a}
	β-环柠檬醛	432-25-7	16.49	83	$C_{10}H_{16}O$	24.36±0.86^{d}	46.69±1.39^{c}	261.27±2.01^{a}	62.71±0.87^{b}	64.69±4.97^{b}
	橙花醛	106-26-3	17.48	84	$C_{10}H_{16}O$	–	14.90±0.47^{b}	41.50±27.59^{a}	22.62±0.99^{ab}	40.23±1.94^{a}
	香叶醛	141-27-5	17.49	70	$C_{10}H_{16}O$	2.27±0.11^{d}	144.39±9.38^{c}	361.07±51.77^{a}	159.63±8.40^{c}	233.20±15.77^{b}
	(E)-2-癸烯醛	3913-81-3	18.36	71	$C_{10}H_{18}O$	–	3.34±0.43^{a}	–	5.07±0.26^{a}	–
	柠檬醛	5392-40-5	18.80	90	$C_{10}H_{16}O$	40.75±1.51	–	–	–	–
	(E,E)-2,4-癸二醛	25152-84-5	20.72	75	$C_{10}H_{16}O$	11.64±0.99^{a}	15.25±1.04^{a}	10.07±8.73^{a}	–	–
	脱氢环柠檬醛	116-26-7	24.0	74	$C_{10}H_{14}O$	–	–	–	–	0.80±0.23
	十二醛	112-54-9	24.66	82	$C_{12}H_{24}O$	5.63±0.24^{b}	5.55±0.36^{b}	–	9.41±0.91^{a}	–
酯类	(Z)-3-己烯-1-醇甲酸酯	33467-73-1	3.67	76	$C_7H_{12}O_2$	101.35±2.32	–	–	–	–
	己酸甲酯	106-70-7	5.56	70	$C_7H_{14}O_2$	–	–	4.22±0.16	–	–
	(Z)-丁酸3-己烯酯	16491-36-4	15.10	73	$C_{10}H_{18}O_2$	–	–	–	–	6.69±2.94
	水杨酸甲酯	119-36-8	15.43	97	$C_8H_8O_3$	231.00±5.51^{c}	651.44±2.77^{b}	–	1384.83±78.41^{a}	–
	δ-辛内酯	698-76-0	19.32	73	$C_8H_{14}O_2$	–	–	–	–	2.33±0.44
	(Z)-己酸3-己烯基酯	31501-11-8	23.53	72	$C_{12}H_{22}O_2$	–	–	75.43±2.07^{a}	7.85±1.28^{c}	26.27±11.24^{b}
	己酸己酯	6378-65-0	23.75	74	$C_{12}H_{24}O_2$	–	–	–	–	3.85±0.37
	二氢猕猴桃内酯	17092-92-1	29.27	84	$C_{11}H_{16}O_2$	29.46±0.96^{bc}	31.40±1.60^{bc}	91.47±7.16^{a}	32.96±0.68^{bc}	32.96±0.68^{bc}
	(Z)-3-己烯-1-醇苯甲酸酯	25152-85-6	31.03	87	$C_{13}H_{16}O_2$	2.60±0.42^{d}	4.36±0.13^{cd}	32.54±2.06^{a}	6.02±0.39^{c}	11.23±1.16^{b}
	8-(2-呋喃基)辛酸甲酯	38199-50-7	33.09	70	$C_{13}H_{20}O_3$	0.64±0.10^{d}	3.04±0.37^{c}	55.63±0.84^{a}		17.68±0.51^{b}
	甲基茉莉酸酯	1211-29-6	33.95	73	$C_{13}H_{20}O_3$	–	–	–	2.52±0.42^{b}	3.09±0.19^{a}
	顺式-3-己烯基水杨酸酯	65405-77-8	35.21	82	$C_{13}H_{16}O_3$	–	–	6.90±1.33^{a}	2.06±0.71^{b}	2.75±0.31^{b}
	苯甲酸苄酯	120-51-4	38.04	82	$C_{14}H_{12}O_2$	–	–	1.48±0.33^{a}	0.58±0.05^{b}	–
	十六烷酸甲酯	112-39-0	43.61	98	$C_{17}H_{34}O_2$	31.83±1.21^{e}	66.24±1.05^{c}	51.05±10.73^{d}	77.23±1.10^{b}	91.53±6.22^{a}
	(Z,Z)-9,12-十八碳二烯酸甲酯	112-63-0	48.81	92	$C_{19}H_{34}O_2$	–	–	40.48±0.87^{a}	–	10.80±0.51^{b}
	(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯	301-00-8	49.00	91	$C_{19}H_{32}O_2$	11.93±0.40^{d}	30.10±1.35^{b}	50.37±2.01^{a}		21.92±1.46^{c}
酮类	5-甲基2(3H)-呋喃酮	591-12-8	3.24	77	$C_5H_6O_2$	–	–	–	–	–
	3-戊酮	96-22-0	22.74	84	$C_5H_{10}O$	–	35.35±0.68	–	–	–
	β-大马士酮	23726-93-4	23.64	91	$C_{13}H_{18}O$	–	17.57±0.65^{d}	36.76±4.50^{b}	42.87±2.18^{a}	26.84±2.15^{c}
	顺式茉莉酮	488-10-8	24.26	93	$C_{11}H_{16}O$	–	–	48.12±2.01	–	–
	α-紫罗兰酮	127-41-3	25.38	79	$C_{13}H_{20}O$	15.29±0.15^{c}	19.33±0.85b^{bc}	82.90±4.95^{a}	19.23±1.58b^{c}	20.76±1.48^{b}
	脱氢紫罗兰酮	1203-08-3	25.60	95	$C_{13}H_{18}O$	–	–	21.22±0.84	–	–
	香叶基丙酮	689-67-8	26.46	97	$C_{13}H_{22}O$	16.31±0.74^{c}	24.62±0.61^{b}	–	30.29±0.96^{a}	27.96±3.16^{a}
	β-紫罗兰酮	79-77-6	27.74	73	$C_{13}H_{20}O$	94.82±2.24^{c}	109.52±0.80^{b}	226.12±12.04^{a}	118.90±6.42^{b}	134.21±9.87^{c}
	3-十三酮	1534-26-5	27.97	81	$C_{13}H_{26}O$	–	6.46±0.60^{c}	–	12.66±0.91^{a}	7.51±0.64^{b}
	植酮	502-69-2	40.93	71	$C_{18}H_{36}O$	13.45±0.19^{b}	13.94±0.32^{b}	33.69±2.43^{a}	9.30±0.53^{c}	13.88±0.47^{b}
烷烃类	十二烷	112-40-3	19.77	82	$C_{12}H_{26}$	–	–	–	–	5.92±0.26
	十五烷	629-62-9	20.23	86	$C_{15}H_{32}$	19.53±0.60^{c}	32.38±1.26^{b}	40.53±0.98^{a}	40.59±0.77^{a}	17.62±0.54^{d}
	茶螺烷	36431-72-8	20.61	71	$C_{13}H_{22}O$	–	4.91±0.25^{a}	–	5.12±0.35^{a}	5.26±0.32^{a}
	十四烷	629-59-4	24.32	82	$C_{14}H_{30}$	21.28±0.98^{c}	30.13±6.06^{b}	104.44±2.77^{a}	22.08±1.18^{c}	23.99±2.42^{c}
	十六烷	544-76-3	28.56	86	$C_{16}H_{34}$	6.13±0.23^{d}	6.10±0.24^{d}	50.52±1.04^{a}	38.18±2.88^{b}	16.79±0.61^{c}

续表 1

分类	挥发性物质	CAS号	保留时间（min）	相似度	分子式	含量(μg/kg)				
						XY	WD	RN	FJ	GC
烯烃类	十八烷	593-45-3	37.80	71	$C_{18}H_{38}$	33.10±3.25^{a}	29.91±0.48^{b}	14.03±1.29^{d}	9.74±0.32^{e}	24.50±0.48^{c}
	十七烷	629-78-7	39.71	78	$C_{17}H_{36}$	12.65±0.37^{c}	15.41±1.03^{bc}	22.09±1.25^{a}	17.67±0.88^{b}	14.74±3.05^{bc}
	α-罗勒烯	502-99-8	9.06	78	$C_{10}H_{16}$	–	–	–	–	166.29±4.32
	别罗勒烯	3016-19-1	12.63	84	$C_{10}H_{16}$	–	99.56±1.51^{c}	209.49±2.63^{a}	74.61±2.84^{d}	196.26±3.51^{b}
	顺式-β-法呢烯	28973-97-9	26.64	93	$C_{15}H_{24}$	6.53±0.27^{c}	8.60±0.62^{c}	51.12±2.82^{a}	9.20±1.00^{c}	12.45±1.10^{b}
	β-月桂烯	123-35-3	28.67	75	$C_{10}H_{16}$	273.18±3.35^{c}	347.92±4.87^{a}	–	317.24±24.22^{b}	–
	葎草烯环氧化物II	19888-34-7	30.29	70	$C_{15}H_{24}O$	–	1.56±0.27^{c}	–	4.09±0.22^{a}	3.07±0.45^{b}
	蛇麻烯环氧物 I	19888-33-6	30.32	80	$C_{15}H_{24}O$	–	–	14.93±0.61	–	–
其他类	2-乙基-呋喃	3208-16-0	4.79	72	$C_{6}H_{8}0$	1.08±0.04^{b}	3.27±0.28^{a}	–	–	–
	二甲基三硫化物	3658-80-8	5.87	80	$C_{2}H_{6}S_{3}$	–	–	69.47±1.38^{a}	5.16±0.41^{b}	4.77±0.43^{b}
	对甲酚	106-44-5	8.84	81	$C_{7}H_{8}O$	27.21±1.77^{b}	–	–	198.87±3.38^{a}	–
	辛酸	124-07-2	14.78	70	$C_{8}H_{16}O_{2}$	29.33±0.80^{a}	–	15.86±4.83^{b}	–	19.03±1.73^{b}
	2-戊基-呋喃	3777-69-3	16.31	75	$C_{9}H_{14}O$	2.72±0.37^{b}	–	182.34±6.42^{a}	5.32±0.49^{b}	–
	吲哚	120-72-9	19.65	83	$C_{8}H_{7}N$	2.12±0.14^{c}	7.16±0.25^{a}	2.51±0.15^{b}	–	–
	百里酚	89-83-8	19.69	76	$C_{10}H_{14}O$	–	1.00±0.20^{b}	–	1.58±0.39^{a}	–
	壬酸	89-83-8	19.69	76	$C_{10}H_{14}O$	–	82.67±1.59^{a}	64.97±0.63^{b}	66.35±0.96^{b}	58.22±2.71^{c}
	丁香酚	97-35-0	22.52	80	$C_{10}H_{12}O_{2}$	–	–	16.44±1.08^{a}	–	1.92±0.30^{b}
	正癸酸	334-48-5	23.11	76	$C_{10}H_{20}O_{2}$	33.76±0.34^{b}	25.05±0.82^{c}	41.34±2.71^{a}	13.51±0.70^{c}	21.49±0.56^{d}
	5-三甲基-1,2-二氢萘	1000357-25-8	24.62	75	$C_{13}H_{16}$	–	3.26±0.13^{b}	27.80±2.48^{a}	1.60±0.66^{bc}	2.32±0.93^{bc}
	2-乙酰基呋喃	1192-62-7	25.14	71	$C_{6}H_{6}O_{2}$	–	–	67.75±9.01	–	–
	十一酸	112-37-8	26.97	73	$C_{11}H_{22}O_{2}$	6.19±0.31^{b}	–	50.23±0.95^{a}	–	4.17±0.43^{c}
	十二烷酸	143-07-7	31.21	88	$C_{12}H_{24}O_{2}$	142.51±0.60^{a}	36.53±0.64^{d}	143.91±25.60^{a}	59.090±1.75^{c}	99.35±0.94^{b}
	τ-卡地诺	1474790	33.67	78	$C_{15}H_{26}O$	–	6.10±0.28^{b}	24.26±0.69^{a}	–	3.41±0.49^{c}
	α-卡地诺	481-34-5	34.15	80	$C_{15}H_{26}O$	5.07±0.16^{e}	11.73±0.62^{c}	44.41±1.04^{a}	9.32±0.89^{d}	16.01±1.33^{b}
	十四酸	544-63-8	38.09	87	$C_{14}H_{28}O_{2}$	2.63±0.37^{c}	3.83±0.33^{c}	39.63±2.19^{a}	2.76±0.54^{c}	9.82±0.25^{b}
	正十六烷酸	21096	44.72	91	$C_{16}H_{32}O_{2}$	18.10±0.22^{d}	10.56±0.70^{d}	70.87±5.50^{a}	25.62±0.67^{c}	59.41±1.07^{b}

注：同行不同小写字母表示显著性差异（P<0.05）；“–”表示未检出，表2同。

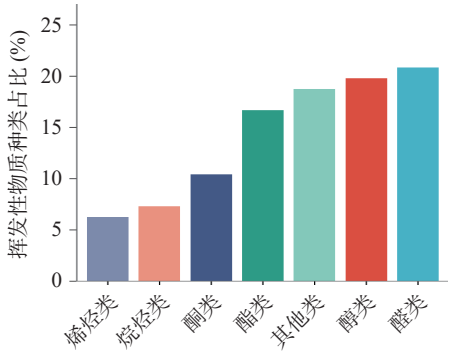


图 1　广南底圩红茶挥发性物质种类占比

Fig.1　Proportion of volatile compound categories Guangnan Dixu black tea

（20.83%）、酯类（16.67%）、酮类（10.42%）、烷烃（7.29%）、烯烃(6.25%)及其他成分(18.75%)(图 1)。挥发性成分在加工过程中呈动态变化，萎凋和揉捻过程中变化尤为突出。萎凋过程中叶片失水、细胞膜透性增加以及酶活性的启动(如糖苷酶)，促进了香气前体物质的释放与转化[14]。揉捻破坏了茶叶细胞，使香气前体沉淀到细胞中，随后经受酶促氧化，从而产生大量挥发性物质[15−17]。发酵阶段酶促反应持续进行，但部分挥发性物质可能因参与进一步反应(如氧化、聚合)或挥发而总量略有下降。干燥阶段的高温处理导致部分热敏性或不稳定物质挥发或转化，是总量下降的主要原因[18]。

2.2　广南底圩红茶加工过程中挥发性物质的动态变化

2.2.1　醇类物质的动态变化　醇类物质在底圩茶加工中占比波动较大(图 2a)，相对含量无明显变化规律(图 2b)。芳樟醇及其氧化物、苯甲醇、苯乙醇、香叶醇和橙花醇是主要的醇类化合物。芳樟醇作为重要的花香成分，其含量在加工过程中波动显著，鲜叶中含量最高，萎凋下降可能源于挥发或转化，揉捻上升可能与细胞破坏后糖苷水解加速有关[19−20]，发酵下降可能因 PPO 介导的偶联氧化作用消耗或转化为其他氧化物[21]，干燥上升可能源于部分结合态前体的热解释放或某些氧化产物的形成。

具有甜香、花香的苯甲醇、苯乙醇和橙花醇在加工后期含量显著增加。这与杨霁虹等[9]在祁门红茶中观察到的苯乙醇、苯甲醇是特征成分的结果相符。其含量增加可能源于持续的水解反应释放结合态苷元和类胡萝卜素(如 β-胡萝卜素)在加工后期的氧化降解产物[22−23]。

醇类的整体波动反映了其来源的多样性(糖苷水解、类胡萝卜素降解等)及其在后续加工中的不稳定性(挥发、氧化、转化)。新九曲红梅茶研究也显示香

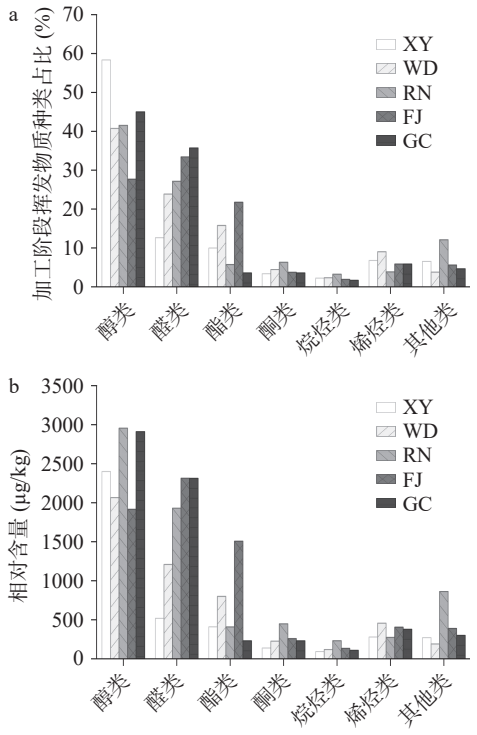


图 2　底圩红茶加工过程挥发性物质种类占比(a)和相对含量变化(b)

Fig.2　Proportion of volatile substances in the processing of Dixu black tea (a), relative content changes (b) of Guangnan Dixu black tea

叶醇、芳樟醇、苯乙醇是主要醇类,其含量变化受工艺和等级影响显著[24]。

2.2.2　醛、酯类物质的动态变化　醛类物质是广南底圩红茶加工中变化最显著的类别(图 2b)。其占比持续大幅上升,相对含量也急剧增加,尤其在揉捻、发酵阶段增幅最大。

苯甲醛(木质、苦杏仁香)含量不规则上升,干燥达峰值。其形成主要与苯丙氨酸的 Strecker 降解或氧化有关[25],干燥高温可能加速此过程。如表 1 所示,(E)-2-己烯醛(青草香)从无到有,显著增加(干燥阶段 414.39 μg/kg)。这主要源于不饱和脂肪酸(特别是亚麻酸 C18:3)在 LOX/HPL/ADH 途径下的酶促氧化降解[26],揉捻破坏细胞结构是该途径激活的关键。郭丽等[24] 在九曲红梅中也发现反-2-己烯醛是关键香气物质。

壬醛(花香、脂香、柠檬香)和香叶醛(柑橘、柠檬香)含量显著增加。壬醛可来自油酸(C18:1)降解[25]或类胡萝卜素次级产物。香叶醛(柠檬醛异构体之一)是类胡萝卜素(如 β-胡萝卜素)的重要热降解或光降解产物[22]。其含量增加与揉捻发酵阶段的酶促-氧化作用及干燥阶段的热效应密切相关。

醛类的显著增长是红茶加工(尤其揉捻发酵)的典型特征。这与张娅楠等[27] 指出的脂肪酸氧化降解(产生青草气醛如己醛、(E)-2-己烯醛)和 Strecker 降解-氨基酸转化(产生芳香醛如苯甲醛、苯乙醛)是红茶香气形成核心途径的结论高度一致。祁门红茶研究也表明己醛、庚醛、壬醛是区分‘祁门香’与其他品种的关键差异醛类[9]。底圩茶醛类持续积累的趋势,特别是(E)-2-己烯醛和壬醛的显著增加,与通氧发酵的新九曲红梅茶中醛类含量较高的结果有相似性,暗示发酵阶段通氧条件可能促进了脂肪酸氧化路径[24]。

如图 2a 所示,酯类物质占比在发酵阶段达到峰值(21.76%),但干燥后急剧下降(3.57%)。相对含量呈波动变化,发酵阶段出现最高值,干燥后降至最低。发酵阶段酯类含量的显著升高,可能源于发酵过程中酸醇之间的非酶促酯化反应增强。然而,干燥阶段的高温处理导致大量酯类(尤其低沸点酯)挥发损失,是造成其含量锐减的主要原因[18]。这种现象在红茶加工中普遍存在,如潘科等[28] 研究通氧发酵红茶也观察到发酵后酯类含量高,干燥后显著降低的趋势。

2.2.3　酮类物质的动态变化　酮类物质通常具有花果香和甜香的特征,其占比和相对含量在加工过程中呈现先升后降的动态(图 2a),揉捻阶段其绝对含量达到较高水平。β-紫罗兰酮、香叶基丙酮、α-紫罗兰酮和 β-大马士酮是主要的酮类化合物。β-紫罗兰酮(花香)揉捻达峰值,发酵下降,干燥微升,其波动反映了类胡萝卜素降解的复杂性:揉捻细胞破坏促进酶促降解(CCDs)[23,29],发酵阶段的氧化环境可能促进进一步转化或降解,干燥高温可能引发新的热降解[22]。香叶基丙酮(花香)和 α-紫罗兰酮(花香)相对含量分别在发酵和揉捻出现高点。β-大马士酮(果香)在加工中生成,是重要的高香物质(阈值极低),常由 β-胡萝卜素降解或糖苷水解产生[30]。

酮类(尤其紫罗兰酮类)是红茶特征花香的重要贡献者。杨霁虹等[9] 发现(E)-β-紫罗兰酮是区分‘祁门香’红茶的关键 VIP 化合物。底圩茶 β-紫罗兰酮相对含量在揉捻达到峰值,与揉捻破坏细胞释放类胡萝卜素并激活降解酶的过程吻合。β-大马士酮在干燥阶段的检出,可能与热降解或干燥过程中结合态前体的释放有关。

2.2.4　烷烃、烯烃及其它挥发性物质的动态变化　烷烃物质占比先升后降,可能源于脂肪酸脱羧或作为其他反应的副产物生成,后期可能因挥发或参与反应减少。

烯烃占比波动。α-罗勒烯、别罗勒烯在后期(干燥)含量显著,具有花香、草本香,是萜烯类物质(如芳樟醇)的衍生物或直接来自萜烯合成路径,其后期增加可能与热转化或特定前体释放有关。

其他物质占比揉捻阶段最高(12.12%),表明此阶段产生了种类复杂的其他类型挥发性化合物。

2.3　广南底圩茶红茶在加工过程中关键差异挥发性物质筛选

通过对底圩茶红茶在不同加工阶段的样本进行主成分分析(PCA)、聚类分析(HCA)以及正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)等多元统计方法揭示

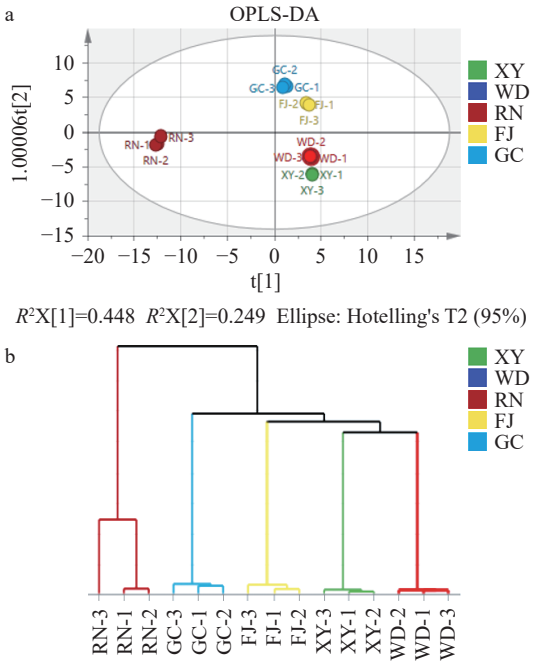


图 3　广南底圩红茶加工过程中挥发性成分主成分分析(a)和聚类分析(b)

Fig.3　Principal component analysis (a) and cluster analysis (b) of volatile components during the processing of Guangnan Dixu black tea

广南底圩红茶各加工阶段中挥发性物质的差异。如图 3a 所示，对检测到的 96 种挥发性物质进行了无监督的 PCA 分析，前两个主成分对总方差的解释率达到 62.7%，Q^2=0.984，说明该 PCA 模型预测能力较好。在 PCA 得分图中(图 3a)，各工序茶样得到良好的分离，揉捻样品分布距离其它样品较远，XY 和 WD 样品分布距离较近，FJ 和 GC 样品分布距离较近，说明两个工序之间挥发性物质较为相似，发生变化相对较小。由图 3b 聚类分析可知，揉捻被聚类到类群Ⅰ，XY、RN、FJ 和 GC 聚类到类群Ⅱ，该结果与 PCA 一致。

为揭示广南底圩茶红茶各加工阶段的差异挥发性物质，使用有监督的 OPLS-DA 方法对连续两个加工阶段，即 XY vs WD、WD vs RN、RN vs FJ 以及 FJ vs GC 的挥发性物质进行比较分析。由图 4 可知，在四对 OPLS-DA 分析中，各样品达到良好的分离，R^2X，R^2Y 以及 Q^2 都大于 0.9，且 200 次置换检验 Q^2 与 Y 轴的截距都小于 0，说明模型可靠，不存在过拟合现象。

变量投影重要性(Variable Important for the Projection，VIP)表示各香气物质的表达模式对各组样本分类判别的影响强度和解释能力，可以辅助标志性代谢物的筛选[31]，VIP 能够量化各个变量对分类的贡献度，从而筛选出重要的特征物质，一般认为 VIP>1 表示该变量具有重要作用，且 VIP 值越大，说明该变量在不同加工阶段广南底圩红茶样本间的差异越显著[32]。根据 VIP>1 与 P<0.05 的原则筛选广南底圩红茶各加工阶段的差异挥发性物质(图 5)可知，在所检测到的 96 种挥发性物质中共筛选出 VIP>1 的挥发性成分共有 47 种，涵盖了醛类、烷类、醇类、酯类等，包括 2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、苯乙醛、3-戊酮、1-癸醇、芳樟醇、顺式芳樟醇氧化物、(Z)-3-己烯-1-醇甲酸酯、柠檬醛、1-辛烯-3-醇、十二烷酸、α-萜品醇、十二烷等，可作为区分广南底圩红茶在不同加工阶段的标志物。

进一步用聚类分析热图直观地反映广南底圩红茶各加工阶段的变化(图 6)，47 种挥发性化合物存在显著差异，其中蓝色表示含量低，红色表示含量高。XY 中的某些成分含量显著富集，例如香叶醇、(Z)-3-己烯-1-醇甲酸酯、芳樟醇、十二烷酸，这些成分在后续加工阶段的浓度较低。在 WD 阶段，3-甲基丁醛、3-戊酮、(Z)-3-己烯醛、壬酸、α-萜品醇等化合物的浓度较其他阶段更高。RN 阶段的某些成分含量明显升高，如柠檬醛、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸甲酯、别罗勒烯等。FJ 过程中，某些成分如壬醛、水杨酸甲酯、苯乙醛、对甲酚的含量明显升高。在 GC 阶段，(Z)-3-壬烯-1-醇、(Z)-丁酸 3-己烯酯、庚醛、α-罗勒烯、(E)-芳樟醇氧化物(吡喃)、(E)-2-己烯醛、苯

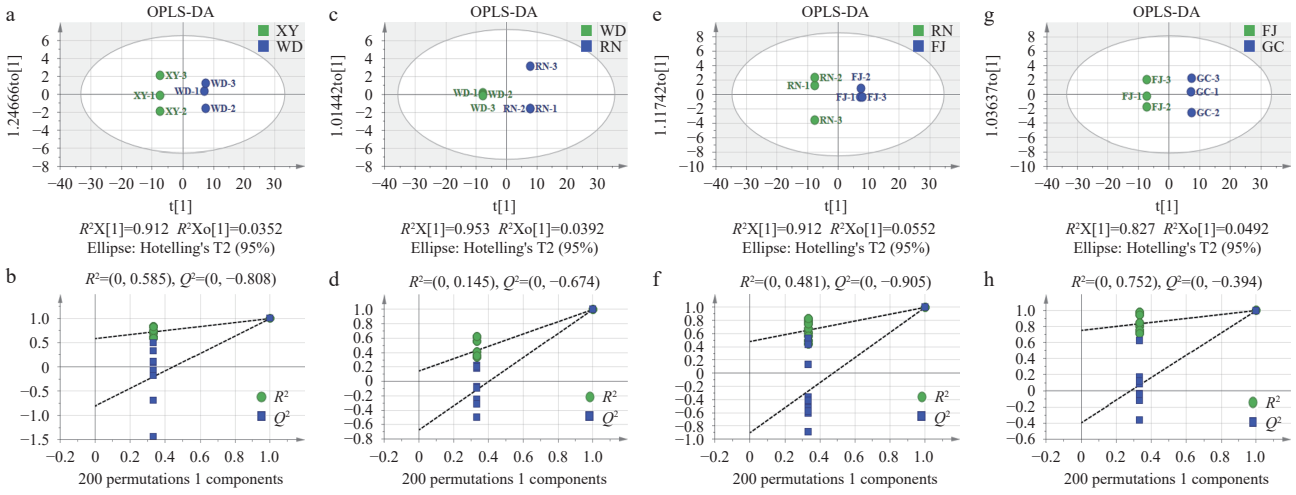


图 4　广南底圩红茶不同加工阶段的 OPLS-DA 分析

Fig.4　OPLS-DA analysis of different processing stages of Guangnan Dixu black tea

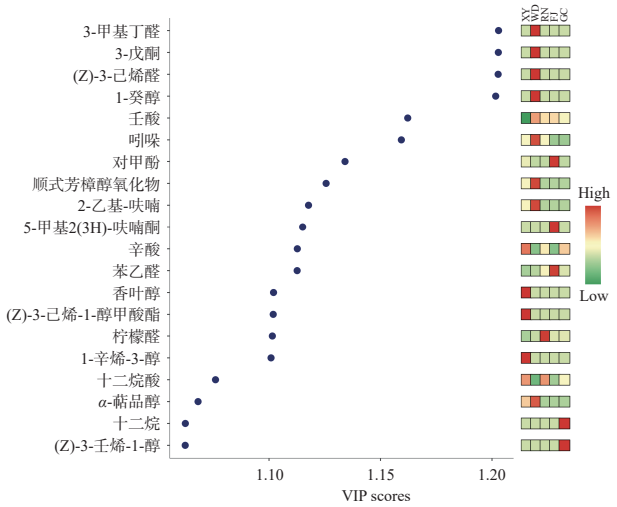


图 5　广南底圩红茶各加工阶段的差异挥发性物质（前 20 种）

Fig.5　Differences in volatile compounds during different processing stages of Guangnan Dixu black tea (top 20)

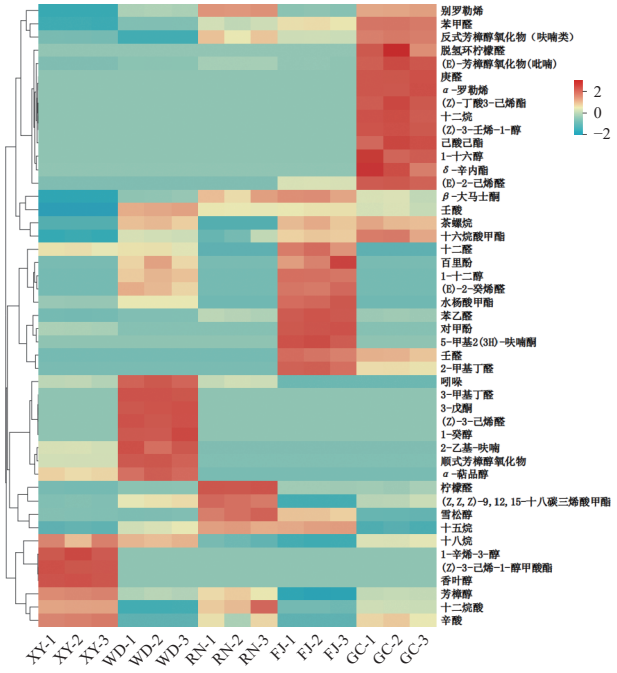


图 6　广南底圩红茶各加工阶段关键差异性挥发性成分热图

Fig.6　Thermal map of key differential volatile components in different processing stages of Guangnan Dixu black tea

甲醛、反式芳樟醇氧化物（呋喃类）的含量较其他阶段更高。

2.4　广南底圩红茶不同加工阶段关键香气 OAV 分析

为剖析广南底圩红茶不同加工阶段关键香气的变化规律，分别对 XY、WD、RN、FJ 和 GC 茶样的挥发性成分进行 OAV 分析。通过文献资料[33−39]，查询 47 种差异挥发性物质的阈值与香气描述，共有 23 种挥发性物质 OAV>1，如表 2 所示，这些挥发性物质则为广南底圩红茶加工过程中的关键差异挥发性物质，对广南底圩红茶香气品质的形成起关键作用。

OAV 值越大，说明该挥发性物质对样品香气的影响就越大。当 OAV>10 时，该化合物被认为对红茶的整体香气有重要贡献。以 OAV>10 为筛选条件进行筛选，在 GC 的样品中分析得出符合条件的挥发性物质有 2-甲基丁醛、庚醛、苯乙醛、反式芳樟醇氧化物（呋喃类）、壬醛、芳樟醇、(Z)-3-壬烯-1-醇、(E)-芳樟醇氧化物(吡喃)、苯甲醛 9 种，可以认为这 9 种关键差异挥发性物质是广南底圩茶红茶的关键呈香物质。其中，2-甲基丁醛、壬醛、芳樟醇、(Z)-3-壬烯-1-醇、苯甲醛 OAV>100，说明对广南底圩红茶的花香、甜香、果香的形成具有重要作用。

云南红茶（如滇红）通常以其浓强鲜爽、花果香（尤其是蜜香）显著而著称。其关键香气物质常包括高含量的芳樟醇及其氧化物（提供花香）、香叶醇（玫瑰香、蜜香）、苯甲醇、苯乙醇（甜香、花香），以及一些具有焦糖香、甜香的吡嗪类、呋喃类物质[40]。郭丽等[24] 在研究云南紫娟红茶时发现雪松醇（OAV 高）是其特征香气成分之一，赋予木质香，这与本研究在 RN 和 FJ 阶段检测到高 OAV 的雪松醇有相似之处。然而，本研究发现广南底圩红茶干茶中香叶醇（OAV 仅 XY 阶段高）贡献度较低，而壬醛（OAV 高达 283.38）、(Z)-3-壬烯-1-醇（OAV 高达 289.91）、2-甲基丁醛（OAV 109.89）的含量及其 OAV 贡献尤为突出。特别是 (Z)-3-壬烯-1-醇（强烈的绿叶香、草香）在 GC 中极高的 OAV（289.91），以及壬醛（花香、脂香、柠檬香）和 (E)-2-己烯醛（清新青草香，OAV 在 GC 阶段为 2.18）的存在，共同赋予了底圩红茶一种清新、鲜活的青草气息与浓郁花香、脂香交织的独特香韵，这与典型滇红更偏向醇厚花果蜜香的风格存在差异。这种差异可能源于底圩乡独特的半野生茶树种质资源[1]、特定的加工工艺参数（如发酵时间、温度控制）以及地域环境因素的综合影响。

2.5　关键特征芳香化合物的代谢途径

茶叶加工过程中香气特性的变化受到多种因素的影响。本研究鉴定的 9 个关键特征香气成分可分为醛类和醇类，主要由脂肪酸氧化途径，萜类代谢途径和氨基酸代谢途径共同作用生成。酯类挥发性成分主要具有花果香、木香、蜡香和乳香等风味[40]。对广南底圩红茶香气有着较为重要的贡献，其关键香气中有 5 种物质都是醛类。这些物质主要通过脂肪氧化酶作用后合成，如 (Z)-3-壬烯-1-醇代谢途径：由亚麻酸通过脂氧合酶（LOX）途径生成氢过氧化物，随后还原生成 (Z)-3-壬烯-1-醇[41]；庚醛代谢途径：通常由长链脂肪酸（如亚油酸或亚麻酸）通过 β-氧化途径生成[42]；壬醛代谢途径：通常由长链脂肪酸（如油酸或亚麻酸）通过脂氧合酶（LOX）途径生成[43]。苯乙醛代谢途径：苯丙氨酸通过脱氨生成苯丙酮酸，随后脱羧生成苯乙醛；2-甲基丁醛代谢途径：亮氨酸通过转氨作用生成 α-酮异己酸，随后脱羧生成 2-甲基丁醛；苯甲醛代谢途径：苯丙氨酸通过脱氨生成苯丙酮酸，随后氧化生成苯甲醛。醇类化合物具有特殊的花

表 2　广南底圩红茶各加工阶段差异性挥发物质 OAV 分析

Table 2　Analysis of differential aroma active values (OAV) in different processing stages of Guangnan Dixu black tea

挥发性物质	香气类型	阈值(μg/kg)[32−38]	OAV				
			XY	WD	RN	FJ	GC
2-甲基丁醛	青草香[32]	1	−	−	−	227.42	109.89
3-甲基丁醛	青草香	1	−	334.79	−	−	−
(E)-2-己烯醛	清新	190	−	−	−	0.75	2.18
(Z)-3-己烯醛	清新[33]	190	−	0.32	−	−	−
(Z)-3-己烯-1-醇甲酸酯	果香、花香[34]	12.1	8.53	−	−	−	−
庚醛	杏仁香[35]	3	−	−	−	−	25.30
1-辛烯-3-醇	蘑菇香	1	28.54	−	−	−	−
苯乙醛	清香、玫瑰、花香、巧克力	4	33.75	39.83	61.18	146.71	51.60
对甲酚	药味	55	0.49	−	−	3.62	−
顺式芳樟醇氧化物	木香、花香[36]	100	0.58	1.85	−	−	−
反式芳樟醇氧化物(呋喃类)	桉叶油素、樟脑	6	11.86	−	40.29	29.44	57.90
壬醛	花香、脂香、绿植香、柠檬样香[37]	1.1	−	−	−	408.95	283.38
芳樟醇	花香、甜香、木质香	6	239.78	158.12	194.70	73.61	166.02
(Z)-3-壬烯-1-醇	绿叶香、草香	0.209	−	−	−	−	289.91
(E)-芳樟醇氧化物(吡喃)	花香、木香	6	−	3.17	8.74	4.21	57.15
水杨酸甲酯	薄荷，冬青	40	5.77	16.29	−	34.62	−
香叶醇	玫瑰香、甜香、蜜香[38]	7.5	66.05	−	−	−	−
(E)-2-癸烯醛	绿植香、脂香	0.4	−	8.35	−	12.68	−
柠檬醛	柠檬香	30	1.36	−	−	−	−
吲哚	麝香	140	0.02	0.05	0.02	−	−
己酸己酯	豆香	1	−	−	−	−	3.85
十二醛	脂香	1.1	5.12	5.05	−	8.55	−
苯甲醛	杏仁香	3	36.85	76.05	113.61	133.87	190.37
雪松醇	温和的雪松木香气	0.5	31.26	27.28	192.46	126.21	6.60

香、果香和木香[1]，在关键的香气成分中有 4 种醇类物质，其中以反式芳樟醇氧化物和(E)-芳樟醇氧化物具有愉悦的果香、花香、脂香、芳香的植物醇[44]。其中反式芳樟醇氧化物由萜类化合物氧化后在酶(如细胞色素 P450)的作用下氧化生成芳樟醇氧化物[45]；而芳樟醇是由萜类通过甲羟戊酸(MVA)途径或甲基赤藓糖醇磷酸(MEP)途径生成香叶基二磷酸(GPP)，随后环化生成芳樟醇[46]；芳樟醇在酶的作用下又会氧化生成(E)-芳樟醇氧化物[47]；通过这些不同香气成分的变化，茶叶的风味特征发生了显著的转变，这一变化受到了微生物代谢、酶促氧化和湿热等多重因素的共同影响。未来的研究将进一步探讨这些关键香气成分在加工过程中的具体作用机制以及它们对茶叶质量和风味发展的影响。

2.6　广南底圩红茶感官评审

广南底圩红茶干茶(图 7a)条索紧结匀整，色泽乌润显金毫，锋苗秀丽。其形态特征表明揉捻工艺得当，细胞破碎率适中，利于后续发酵中酶促氧化反应的充分进行。冲泡后汤色橙红明亮(图 7b)，清澈透亮无沉淀。香气类型丰富且层次分明：以甜花香(芳樟醇、苯乙醛贡献)、清新青草香((Z)-3-壬烯-1-醇主导)为核心；伴随果香(壬醛、反式芳樟醇氧化物)及微弱木质香(雪松醇残留)；鲜爽度高，无闷酵杂气，印证发酵工艺控温控湿得当。入口醇厚鲜爽，收敛性适中，回甘持久。其鲜爽感与醛类物质(如 2-甲基丁醛、庚醛)的高 OAV 值密切相关，甜感则源于苯甲醛的杏仁甜香及糖苷降解产物。叶底嫩匀柔软，呈铜红色(图 7c)，触手有弹性，表明发酵程度均匀，无红梗红叶现象。

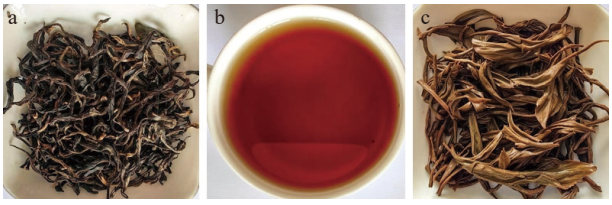


图 7　广南底圩红茶评审结果

Fig.7　Evaluation results of Guangnan Dixu black tea

3　结论

香气是评价广南底圩红茶品质的核心指标，本研究系统揭示了广南底圩红茶加工过程中挥发性成分的动态演变规律及其关键呈香物质。利用 HS-SPME-GC-MS 技术，研究覆盖广南底圩红茶加工全程(鲜叶→萎凋→揉捻→发酵→干燥)，共鉴定出 96 种挥发性物质。多元统计分析表明，挥发性成分的种类和含量在揉捻阶段发生了最显著变化，这与细胞结构破坏、酶促氧化及香气前体释放密切相关。结合香气活度值(OAV)分析，确定干茶中 OAV> 10 的 9 种关键香气化合物分别为：2-甲基丁醛、庚

醛、苯乙醛、反式-呋喃型芳樟醇氧化物、壬醛、芳樟醇、(Z)-3-壬烯-1-醇、(E)-吡喃型芳樟醇氧化物和苯甲醛。其中,2-甲基丁醛、壬醛、芳樟醇、(Z)-3-壬烯-1-醇和苯甲醛(OAV>100)对广南底圩红茶特征性的花香、甜香、果香及青草香形成贡献尤为突出。广南底圩红茶关键香气物质主要来源于以下三条代谢途径的协同作用:脂肪酸氧化途径:如(Z)-3-壬烯-1-醇、庚醛、壬醛。萜类代谢途径:如芳樟醇及其氧化物。氨基酸 Strecker 降解途径:如 2-甲基丁醛、苯乙醛、苯甲醛。同时,筛选出的 9 种关键香气化合物可作为广南底圩红茶香气品质的客观化学评价指标。本研究揭示了底圩红茶香气的化学成分及其变化,尚存在初烘阶段未分析等不足,今后研究应加强揉捻、发酵、干燥等关键环节设计多因素实验,优化工艺参数(如温湿度、时间),以进一步提升底圩红茶的感官品质。

© 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] 查旻昱, 吴悠, 张梁. 茶叶中挥发性香气物质研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(13): 4298−4303. [ZHA Minyu, WU You, ZHANG Liang. Research advances on volatile aroma compounds of tea[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2020, 11(13): 4298−4303.]

[2] 孙振杰, 王梦馨, 崔林, 等. 普洱茶香气成分研究进展[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(1): 13−19. [SUN Zhenjie, WANG Mengxin, CUI Lin, et al. Research progress on aroma components in Pu'er tea[J]. Journal of Tea Communication, 2020, 47(1): 13−19.]

[3] 叶伟胜, 胡健梁. 茶叶香气成分及检测技术研究进展[J]. 农业与技术, 2018, 38(5): 34−35. [YE Weisheng, HU Jianliang. Research progress of tea aroma components and detection technology [J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(5): 34−35.]

[4] 梁大艳. 广南茶树资源及利用[J]. 中国茶叶, 2018, 40(7): 35−37. [LIANG Dayan. Tea tree resources in Guangnan and its utilization[J]. China Tea, 2018, 40(7): 35−37.]

[5] 陈红惠, 李霖娜, 聂秋月. 广南底圩茶黄酮提取工艺研究[J]. 文山学院学报, 2018, 31(6): 23−26. [CHEN Honghui, LI Linna, NIE Qiuyue. Study on the processing condition of extracting flavonoids from dixu tea of Guangnan[J]. Journal of Wenshan Teachers College, 2018, 31(6): 23−26.]

[6] 王宝怡, 王培强, 李晓晗, 等. 基于电子鼻技术对不同季节山东绿茶香气的分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 284−289,259. [WANG Baoyi, WANG Peiqiang, LI Xiaohan, et al. Analysis of aroma of Shandong green tea in different seasons based on electronic nose technology[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 284−289,259.]

[7] 岳翠男, 秦丹丹, 李文金, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 鉴定浮梁红茶关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 251−258. [YUE Cuinan, QIN Dandan, LI Wenjin, et al. Identification of key aroma components in Fuliang black tea based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 251−258.]

[8] 马敬宜, 姚衡斌, 赵仁亮. 基于 HS-SPME/GC-MS 和 OAV 对春季信阳红茶关键呈香化合物分析[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(14): 189−198. [MA Jingyi, YAO Hengbin, ZHAO Renliang. Identification of key aroma compounds in spring Xinyang black tea based on HS-SPME/GC-MS and OAV[J]. Food Research and Development, 2022, 43(14): 189−198.]

[9] 杨霁虹, 周汉琛, 刘亚芹, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析黄山地区不同茶树品种红茶香气的差异[J]. 食品科学, 2022, 43(16): 235−241. [YANG Jihong, ZHOU Hanchen, LIU Yaqin, et al. Differences in aroma components of black tea processed from different tea cultivars in Huangshan by using headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and odor activity value[J]. Food Science, 2022, 43(16): 235−241.]

[10] SU Dan, HE Jiaojiao, ZHOU Yanzhu, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131587.

[11] LI Xingfeng, NING Yawei, LIU Dou, et al. Metabolic mechanism of phenyllactic acid naturally occurring in Chinese pickles[J]. Food Chemistry, 2015, 186: 265−270.

[12] YANG D S, LEE K S, KAYS S J. Characterization and discrimination of premium-quality, waxy, and black-pigmented rice based on odor-active compounds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(15): 2595−2601.

[13] ZHU Y F, CHEN J, CHEN X J, et al. Use of relative odor activity value (ROAV) to link aroma profiles to volatile compous: application to fresh a dried eel (M*uraenesox cinereus*)[J]. Int J Food Prop, 2020, 23(1): 2257-2270.

[14] WANG Jinjin, OUYANG Wen, ZHU Xizhe, 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.

[15] YANG Yanqin, XIE Jialing, WANG Qiwei, et al. Understanding the dynamic changes of volatile and non-volatile metabolites in black tea during processing by integrated volatolomics and UHPLC-HRMS analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 432: 137124.

[16] JIA Jiangming, ZHANG Chenan, YUAN Bin, et al. Development and process parameter optimization with an integrated test bench for rolling and forming strips of oolong tea[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(12): e13901.

[17] OZDEMIR F, TONTUL I, BALCI-TORUN F, et al. Effect of rolling methods and storage on volatile constituents of Turkish black tea[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2017, 32(5): 362−375.

[18] POLAT A, ŞAT İ G, ILGAZ Ş. Comparison of black tea volatiles depending on the grades and different drying temperatures [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(7): e13653.

[19] ZHOU Ying, ZENG Lanting, GUI Jiadong, et al. Functional characterizations of *β*-glucosidases involved in aroma compound formation in tea (*Camellia sinensis*)[J]. Food Research International, 2017, 96: 206−214.

[20] IJIMA Y, OGAWA K, WATANABE N, et al. Characterization of *β*-primeverosidase, being concerned with alcoholic aroma formation in tea leaves to be processed into black tea, and preliminary observations on its substrate specificity[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(5): 1712−1718.

[21] 魏志文, 李大祥, 张华艳, 等. 红绿茶加工工艺对茶鲜叶香气和糖苷类香气前体的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 109−112. [WEI Zhiwen, LI Daxiang, ZHANG Huayan, et al. Ef-

fects of processing techniques on aroma and glycosidic aroma precursors in fresh tea leaves[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(11): 109−112.]
[22] 李志芬. β-胡萝卜素的降解工艺及机理研究[D]. 郑州：郑州大学, 2013. [LI Zhifen. Studies on the degradation technology of β-carotene and the mechanism of degradation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.]
[23] 刘飞, 王云, 张厅, 等. 红茶加工过程香气变化研究进展[J]. 茶叶科学, 2018, 38(1): 9−19. [LIU Fei, WANG Yun, ZHANG Ting, et al. Review on aroma change during black tea processing[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(1): 9−19.]
[24] 郭丽, 彭群华, 赵锋, 等. 不同等级新九曲红梅茶的风味化学特征[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 215−220. [GUO Li, PENG Qunhua, ZHAO Feng, et al. Flavor chemistry characteristics of new jiuqu Hongmei tea of different grade levels[J]. Food Science, 2021, 42(4): 215−220.]
[25] HO C T, ZHENG Xin, LI Shiming. Tea aroma formation[J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9−27.
[26] MOSBLECH A, FEUSSNER I, HEILMANN I. Oxylipins: Structurally diverse metabolites from fatty acid oxidation[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(6): 511−517.
[27] 张娅楠, 欧伊伶, 覃丽, 等. 红茶中香气物质的形成及工艺对其影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(11): 351−357. [ZHANG Yanan, OU Yiling, QIN Li, et al. Research progress on the formation of aroma substances and its influence of processes in black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(11): 351−357.]
[28] 潘科, 沈强, 申东, 等. 红茶通氧发酵过程中发酵叶相变化分析[J]. 食品科学, 2014, 35(15): 198−201. [PAN Ke, SHEN Qiang, SHEN Dong, et al. Changes in sensory and physico-chemical characteristics of tea leaves during aerobic fermentation for black tea[J]. Food Science, 2014, 35(15): 198−201.]
[29] WALTER M H, STRACK D. Carotenoids and their cleavage products: Biosynthesis and functions[J]. Natural Product Reports, 2011, 28(4): 663−692.
[30] BOUVIER F, SUIRE C, MUTTERER J, et al. Oxidative remodeling of chromoplast carotenoids: Identification of the carotenoid dioxygenase CsCCD and CsZCD genes involved in *Crocus* secondary metabolite biogenesis[J]. The Plant Cell, 2003, 15(1): 47−62.
[31] LI S H, ZHAO W, LIU S Y, et al. Aroma characteristics of foxtail m illet varieties from different ecological regions by analysis of SDE-GC-MS combined with OPLSDA[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(13): 2586−2596.
[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. [YIN Hongxu, YANG Yanqin, YAO Yuefeng, et al. Discrimination of different characteristics of chestnut-like green tea based on gas chromatography-mass spectrometry and multivariate statistical data analysis[J]. Food Science, 2019, 40(4): 192−198.]
[33] SQUARA S, CARATTI A, FINA A, et al. Artificial Intelligence decision-making tools based on comprehensive two-dimensional gas chromatography data: The challenge of quantitative volatilomics in food quality assessment[J]. Journal of Chromatography. A, 2023, 1700: 464041.
[34] 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.
[35] GUO Xiangyang, HO C T, SCHWAB W, et al. Aroma profiles of green tea made with fresh tea leaves plucked in summer[J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130328.
[36] GUO Xiangyang, HO C T, WAN Xiaochun, et al. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128230.
[37] LIU Jie, WAN Peng, XIE Caifeng, et al. Key aroma-active compounds in brown sugar and their influence on sweetness[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128826.
[38] WANG Yadong, ZENG Hong, QIU Sizhe, et al. Identification of key aroma compounds and core functional microorganisms associated with aroma formation for *Monascus*-fermented cheese [J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137401.
[39] NIE Congning, GAO Yuan, DU Xiao, et al. Characterization of the effect of cis-3-hexen-1-ol on green tea aroma[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 15506.
[40] 彭云, 李果, 刘学艳, 等. 不同产地红茶香气品质的 SPME/GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 237−244. [PENG Yun, LI Guo, LIU Xueyan, et al. SPME/GC-MS analysis of aroma quality of black tea from different producing areas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 237−244.]
[41] NI L, SONG Z, MA X, et al. Biosynthesis and biotransformation of green leaf volatiles in plants: Insights into the lipoxygenase pathway[J]. Frontiers in Plant Science. 2022, 13(89): 42-53.
[42] YANG K, FU M, ZHANG M, et al. Decoding lipid oxidation and short-chain aldehyde formation in oilseeds: A metabolomic approach[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 199: 07450.
[43] HUANG N, MINAMIKAWA T, KOBAYASHI K, et al. Lipoxygenase-mediated production of volatile aldehydes and oxylipins: A system review[J]. Food Chemistry, 2023, 404(13): 45−62.
[44] 张杏民, 陈宏宇, 王超, 等. 茯砖茶独特香气形成的物质基础及评价方法研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 296−305. [ZHANG Xingmin, CHEN Hongyu, WANG Chao, et al. Research progress on the material basis and evaluation methods for the unique aroma of fu brick tea[J]. Food Science, 2023, 44(3): 296−305.]
[45] YUAN J, BIELOWKA A, WILSON J, et al. Cytochrome P450-mediated oxidation of monoterpenoid alcohols in plant specialized metabolism[J]. 7Phytochemistry, 2022, 198(11): 31−57.
[46] CHEN F, LIU L, YU P, et al. Advances in terpenoid biosynthetic pathways and engineering in plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13(8): 275−290.
[47] CHEN K, XU L, WANG Y, et al. Unraveling the enzymatic oxidation of terpene alcohols: Structural and functional insights[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2022, 119(9): 2415−2430.