张娜, 张志伟, 曲奕卓, 等. 基于 GC-E-Nose 和 HS-SPME-GC-MS 技术分析沙棘叶绿茶加工过程中挥发性物质的动态变化规律[J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 55−65. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2026010391

ZHANG Na, ZHANG Zhiwei, QU Yizhuo, et al. Analysis of the Dynamic Change Patterns of Volatile Compounds in Sea Buckthorn Leaf Green Tea during Processing Based on GC-E-Nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 55−65. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2026010391

·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）·

基于 GC-E-Nose 和 HS-SPME-GC-MS 技术分析沙棘叶绿茶加工过程中挥发性物质的动态变化规律

张　娜[1], 张志伟[1,*], 曲奕卓[2], 陈志玺[3]

（1.天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津市食品生物技术重点实验室, 天津 300134;
2.烟台绿萃食品科技有限公司, 山东烟台 264000;
3.华池县甘农生物科技有限公司, 甘肃庆阳 745000）

摘　要: 为探究沙棘叶绿茶加工过程中挥发性成分的动态变化规律，采用气相色谱-电子鼻技术（gas chromatography-electronic nose，GC-E-Nose）和顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用技术（headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry，HS-SPME-GC-MS），结合偏最小二乘判别分析（partial least squares discrimination analysis，PLS-DA）、正交偏最小二乘法判别分析（orthogonal partial least squares discrimination analysis，OPLS-DA）方法，对沙棘叶加工中鲜叶（XY）、蒸青（ZQ）、揉捻（RN）、炒青（CQ）、增香（ZX）及成品茶（CP）6 个阶段的挥发性物质的动态变化进行定性、相对定量分析。结果表明，不同加工阶段茶叶香气有显著差异，在上述 6 种样品中共鉴定出 70 种挥发性成分，涵盖醇类、醛类等 8 大类，其中醛类、醇类、烯烃类为核心优势类别。加工过程中，挥发性成分呈现显著阶段性演变：醛类从鲜叶的 28.24% 持续攀升至成品茶的 58.64%，成为占比最高类别；醇类、酯类全程大幅下降，烯烃类在揉捻阶段骤升至鲜叶的 5 倍。香气类型呈现“绿叶香消退、花香果香富集”特征，成品茶形成以花香（37.09%）、果香（23.48%）为核心的复合香气。HS-SPME-GC-MS 的 OPLS-DA 模型（R^2X=0.945，R^2Y=0.982，Q^2=0.960）鉴定出 22 种关键挥发性化合物，其中壬醛含量最高，在不同加工环节催生特异性优势成分，蒸青促进 (Z)-2-己烯-1-醇生成，揉捻促进异松油烯释放。综上，蒸青前会发生酶促反应并在后续过程中富集香气成分，揉捻、增香则通过细胞破损、热降解等机制调控香气形成。本研究阐明了挥发性物质的复杂变化，为沙棘叶绿茶工艺优化及品质提升提供理论依据。

关键词: 沙棘叶, 绿茶, 加工过程, 挥发性物质, 顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用技术

中图分类号: TS272.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0055−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2026010391　　本文网刊:

Analysis of the Dynamic Change Patterns of Volatile Compounds in Sea Buckthorn Leaf Green Tea during Processing Based on GC-E-Nose and HS-SPME-GC-MS

ZHANG Na[1], ZHANG Zhiwei[1,*], QU Yizhuo[2], CHEN Zhixi[3]

（1.Tianjin Key Laboratory of Food Biotechnology, School of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China;

收稿日期: 2026−02−01

基金项目: 中央引导地方科技发展资金（23ZYCGSN00380）。

作者简介: 张娜（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: m13963653531@163.com。

*** 通信作者:** 张志伟（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏, E-mail: zzw5301@163.com。

2.Yantai Green Extract Food Technology Co., Ltd.,Yantai 264000, China;
3.Huachi County Gannong Biotechnology Co., Ltd., Qingyang 745000, China)

Abstract: The dynamic variation patterns of volatile components during the processing of sea buckthorn leaf green tea were investigated using gas chromatography-electronic nose (GC-E-Nose) and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), combined with partial least squares discrimination analysis (PLS-DA) and orthogonal PLS-DA (OPLS-DA). Qualitative and relative quantitative analyses of volatile substances were performed across six processing stages of sea buckthorn leaves. These were fresh leaves (XY), steam fixation (ZQ), rolling (RN), pan-firing (CQ), aroma enhancement (ZX), and finished tea (CP). The results showed that there were significant differences in the tea aroma profiles among the different processing stages. A total of 70 volatile components were identified in six samples. These covered eight major categories, including alcohols and aldehydes, of which aldehydes, alcohols, and olefins were the dominant core categories. During processing, the volatile components showed strong stage-specific evolution. The relative contents of the aldehydes continuously increased from 28.24% in fresh leaves to 58.64% in the finished tea and became the most abundant category. In contrast, alcohols and esters decreased sharply throughout the entire process and olefins increased to five times that of fresh leaves at the rolling stage. The aroma profile showed a characteristic trend of "green leaf aroma fading, floral and fruity aromas enriching", with the finished tea having a composite aroma dominated by floral (37.09%) and fruity (23.48%) notes. The OPLS-DA model based on HS-SPME-GC-MS (R^2X=0.945, R^2Y=0.982, Q^2=0.960) identified 22 key volatile compounds, of which nonanal content was the highest. The different processing procedures led to the formation of specific dominant components: Steam fixation facilitated the accumulation of (Z)-2-hexen-1-ol, whereas rolling promoted the release of terpinolene. This study revealed that enzymatic reactions occurred prior to steam fixation. These enriched the aroma components in subsequent processing, which then regulated aroma formation via mechanisms such as thermal degradation and cell disruption. These results reveal the complex dynamic changes in volatile compounds and provide a theoretical basis for sea buckthorn leaf green tea process optimization and quality improvement.

Key words: sea buckthorn leaves; green tea; processing; volatile components; headspace solid-phase microextraction and gas phase chromatography-mass spectrometry

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)是一种多年生落叶灌木,隶属于胡颓子科下的沙棘属,有诸如醋柳、酸刺、黄酸刺等俗称,在中国和欧洲都有自然分布[1]。中国西北地区及高原山区的沙棘资源尤为丰富。作为富含黄酮类、多酚类、多糖、氨基酸等多种营养与生物活性成分的天然原料[2],沙棘叶的开发利用具有重要的经济与生态价值。然而在沙棘果成熟前,沙棘林未能产生直接经济效益。若能够有效开发并利用沙棘叶资源,不仅有助于激发种植者及关联企业对于沙棘林建设与管理的热情,增加其经济收益,同时也有利于推动生态环境的改善与发展。因此,沙棘的多功能性使其在多个领域具有极高的开发利用价值,受到越来越多的关注与研究[3]。2013 年沙棘叶被正式认定为新型食品资源[4],其在食品加工领域的深度开发与应用得到了显著推动。

随着消费者对天然功能性饮品的需求升级,药食同源原料与传统茶饮的融合成为饮品创新的重要方向。沙棘叶作为富含黄酮类、多酚等活性成分的天然原料,具有低咖啡因、高营养的独特优势,与绿茶的茶多酚、儿茶素形成成分互补[5],不仅解决了传统绿茶的刺激性痛点,更通过口感调和形成“清香+微酸+回甘”的复合风味,使沙棘叶绿茶成为兼具健康属性与饮用体验的差异化产品。其加工工艺与绿茶高度兼容,原料供应稳定,已逐步契合办公、养生等多元消费场景,但目前关于该产品的研究多集中于配方优势与市场潜力,对加工过程中核心风味物质的组分尚未明确。而挥发性物质是决定茶饮风味品质与消费者接受度的关键因素[6],沙棘叶的草本特征香气与绿茶的鲜爽清香在杀青、揉捻、干燥等加工环节中可能发生复杂的转化、合成或降解,直接影响最终产品的风味协调性[7−10]。GC-E-Nose 技术能够快速捕捉样品的整体风味轮廓,HS-SPME-GC-MS 技术凭借高灵敏度与高分离度的优势[11],成为挥发性代谢物定性定量分析的核心手段,两者结合可实现“风味整体评价”与“成分精准识别”的有机统一,为解析加工过程中风味物质的变化机制提供了技术支撑。

本研究以沙棘叶绿茶加工过程为研究对象,采用 GC-E-Nose 结合 HS-SPME-GC-MS 技术,系统分析沙棘叶绿茶加工各阶段(鲜叶、蒸青、揉捻、炒青、增香、成品茶)中挥发性物质的种类、含量及风味轮廓的动态变化特征,揭示沙棘叶与绿茶融合加工中风味物质的形成与转化规律,明确影响产品风味品质的关键工段,为优化沙棘叶绿茶加工工艺、提升产品风味稳定性与市场竞争力提供理论依据,同时为功能性草本茶饮的风味调控研究提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘中华沙棘’叶片　采摘自甘肃华池县 7 月上旬。

TG-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 μm×0.25 mm)、TSQ 8000 Duo/Evo 型三重四极杆气相色谱质谱联用仪(配有 Xcalibur 数据处理系统)　美国 Thermo

Fisher Scientific 公司；DVB/CAR/PDMS-SPME 萃取头、SPME 手动进样手柄　德国 Sigma 公司；HWS24 电热恒温水浴锅　上海一恒科技有限公司；FW-100 高速粉碎机　天津泰斯特有限公司；Heracles Ⅱ全自动电子气味分析仪　法国 Alpha MOS 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品的前处理　工艺流程：采摘鲜叶→蒸青→揉捻→炒青→增香→成品茶，每个工序结束后立即取样，根据取样节点不同，样品分别标记为 XY（鲜叶）、ZQ（蒸青）、RN（揉捻）、CQ（炒青）、ZX（增香）、CP（成品茶）。

加工工艺参数：鲜叶：采摘新梢顶部 4~6 片的成熟叶进行清洗，摊开自然晾干；蒸青：微波 105 ℃ 蒸 45 s；揉捻：茶叶温度下降到 60 ℃ 手工逐步加压揉捻 50 min；炒青：放入炒锅内 180 ℃ 翻炒 10 min；增香：放入炒锅内 150 ℃ 增香 20 min；成品茶：将增香后的茶叶放入烘干机 100 ℃ 烘干 2 h，共 6 个样本，各 3 次生物学重复取样，取样后立即于−80 ℃ 条件下保存。将冷冻的样品破碎研磨后，过 25 目、600 μm 筛待测。

1.2.2　GC-E-Nose 分析　将 0.5 g 样品密封在 20 mL 玻璃瓶中，放置在 GC-E-Nose 的样品托盘上，在 80 ℃ 孵化温度下培养 20 min。随后，在 200 ℃ 和 10 kPa 压力下注入 4000 μL 顶空气体。挥发性化合物通过内嵌式气味浓缩器在 40 ℃ 温度下捕集 42 s。色谱柱升温程序：从初始温度 50 ℃ 开始，持续 5 s，然后以 0.5 ℃/s 的速率从 50 ℃ 上升到 150 ℃，最后以 3 ℃/s 的速率从 150 ℃ 上升到 250 ℃，维持 20 s。每个样品进行三次重复分析。

1.2.3　HS-SPME-GC-MS 分析

1.2.3.1　前处理　采用顶空固相微萃取方法（headspace solid phase microextraction，HS-SPME）富集沙棘叶绿茶加工过程中的挥发性成分。取茶样 1.5 g，置于 20 mL 顶空瓶中，在 60 ℃ 的水浴锅中平衡 30 min，平衡完成后插入已老化的萃取针，于顶空瓶上方顶空吸附（萃取温度 60 ℃，萃取时间60 min），后将萃取针在 GC 进样口进样解析（解析时间 3.5 min，解析温度 250 ℃）。

1.2.3.2　GC 条件　色谱柱：TG-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 μm×0.25 mm）；高纯氦气（纯度 99.999%），流速 1 mL/min，不分流进样；进样口温度为 250 ℃；升温程序：60 ℃ 保持 1 min，以 10 ℃/min升温至 230 ℃，保持 10 min，以 40 ℃/min 升温至 300 ℃。

1.2.3.3　MS 条件　电子轰击离子源（EI）；电子能量 70 eV，离子源温度 300 ℃；传输线温度 280 ℃；采用全扫描模式；质量扫描范围 m/z 50~400。每个茶叶样品进行三次实验。

1.2.3.4　挥发性物质定性及相对定量分析　挥发性物质处理由 Xcalibur 软件系统进行定性分析，遵循相似性超过 80% 的指导原则，将获得的质谱与 NIST 14 文库中的质谱进行比较，并用 TGSC（The Good Scents Company Information System）查询其香气。用面积归一化法对茶叶样品中挥发性化合物进行相对定量分析。

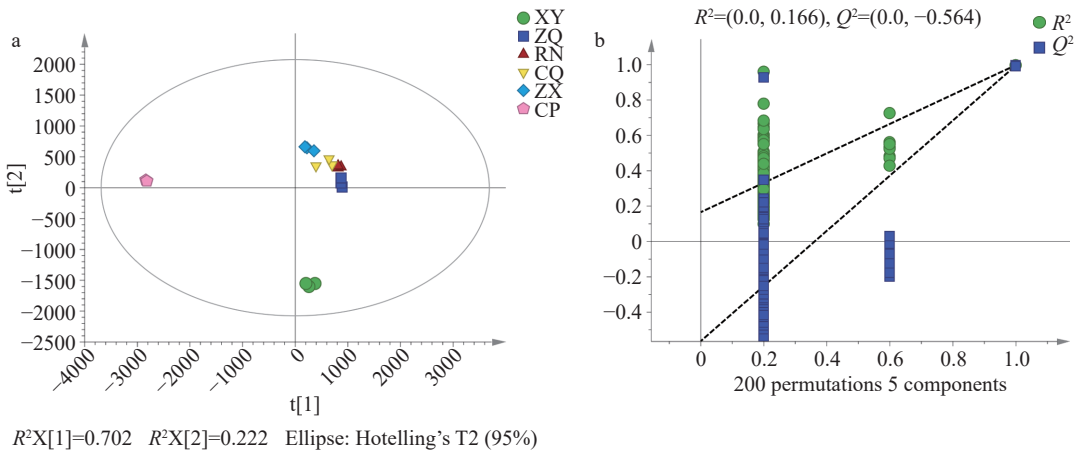
1.3　数据处理

所有实验样本均进行三次重复运行，结果以平均值±标准差表示。数据分析采用 PLS-DA 和 OPLS-DA 方法，SIMCA-P 14.1 软件处理。组间显著性分析采用 SPSS Statistics 20.0 软件进行单因素方差分析（ANOVA）。动态变化轨迹使用 Origin 9.1 绘图，热图通过 TBtools v2.0 完成。

2　结果与分析

2.1　GC-E-Nose 分析

图 1a 为 GC-E-Nose 检测数据的 PLS-DA 得分图（R^2X=0.992，R^2Y=0.947，Q^2=0.913），直观呈现了沙棘叶绿茶不同加工阶段样品的风味轮廓聚类特征，各加工阶段的样品在得分空间中呈现明显的分组聚



R^2X[1]=0.702　R^2X[2]=0.222　Ellipse: Hotelling's T2 (95%)

图 1　GC-E-Nose 测定挥发性成分的多元统计分析

Fig.1　Multivariate statistical analysis of volatile components determined by GC-E-Nose

注：a：PLS-DA 评分图；b：200 次排列试验交叉验证图。

集趋势，其中鲜叶单独分布于得分图底部区域，蒸青、揉捻、炒青等中间加工阶段样品集中在图中区域，而成品茶则分布于得分图左侧区域，表明不同加工阶段的沙棘叶绿茶挥发性风味轮廓差异显著，PLS-DA 模型可有效区分各加工环节的风味特征差异。替换试验参数（R^2=0.166，Q^2=−0.564）进一步证实了该模型在没有过拟合的情况下的可行性（图 1b）。综上，GC-E-Nose 结合 PLS-DA 的分析结果表明：沙棘叶绿茶加工各阶段的风味整体轮廓具有显著特异性，体现了加工工艺对沙棘叶绿茶风味特征的定向调控作用。

2.2 HS-SPME-GC-MS 分析沙棘叶绿茶加工过程中的挥发性成分

采用 HS-SPME 法富集香气，气相色谱质谱联用法对 6 个加工过程（图 2a）的沙棘叶绿茶的挥发性化合物进行了分析[12]，通过文库检索和标准认证共鉴定出 70 种挥发性化合物。这些化合物被分为 8 类，包括醇类（21 种）、醛类（13 种）、烯烃类（13 种）、烷烃类（11 种）、酯类（6 种）、酮类（3 种）、杂环化合物（2 种）、硫化物（1 种）。其中醛类（47.04%）、醇类（27.44%）和烯烃类（7.20%）所占比例较高（图 2b）。在醇类化合物中，(Z)-3-己烯-1-醇与(E)-3-己烯-1-醇在鲜叶中相对含量分别高达 24.16%、10.41%，显著高于其他各阶段，是鲜叶具有独特绿叶清香的主要贡献者。在醛类化合物中，壬醛在增香阶段相对含量高达 40.88%，呈极显著优势，是增香阶段呈现浓郁花香、脂香、醛香等香气的主要物质基础。烯烃类中的异松油烯在揉捻阶段首次出现，相对含量高达 7.86%，使揉捻阶段呈现清新的草本香气；β-石竹烯和 α-草烯相对含量在各个阶段都具有显著差异。挥发性化合物在不同加工阶段表现出不同的差异（表 1）。

在整个加工阶段观察到挥发性化合物的动态变化，如图 2c 所示。在加工过程中，醛类、醇类和烯烃类是加工过程中的主要化合物。醛类从鲜叶阶段的 28.24% 持续上升，经蒸青、炒青工序后较鲜叶翻倍，揉捻阶段略有回落，增香及成品茶阶段继续攀升，最终成品占比达 58.64%（鲜叶的 2 倍以上），杀青和增香是其积累关键节点，推测与醇类氧化、挥发性醛类保留相关。醇类和酯类的相对含量全程大幅下降，醇类在鲜叶阶段占比最高（52.80%），蒸青后骤降，成品茶仅为鲜叶的 32%，酯类从鲜叶的 10.57% 持续下降，成品占比也是鲜叶的 32%，分别推测与醇类氧化挥发、酯类水解挥发相关。烯烃类在鲜叶和蒸青阶段占比仅 3.93%~5.13%，揉捻工序骤升至 19.91%（鲜叶的 5 倍），炒青后快速回落，增香及成品茶维持在 3%~4%，揉捻破坏细胞结构是其释放关键；烷烃

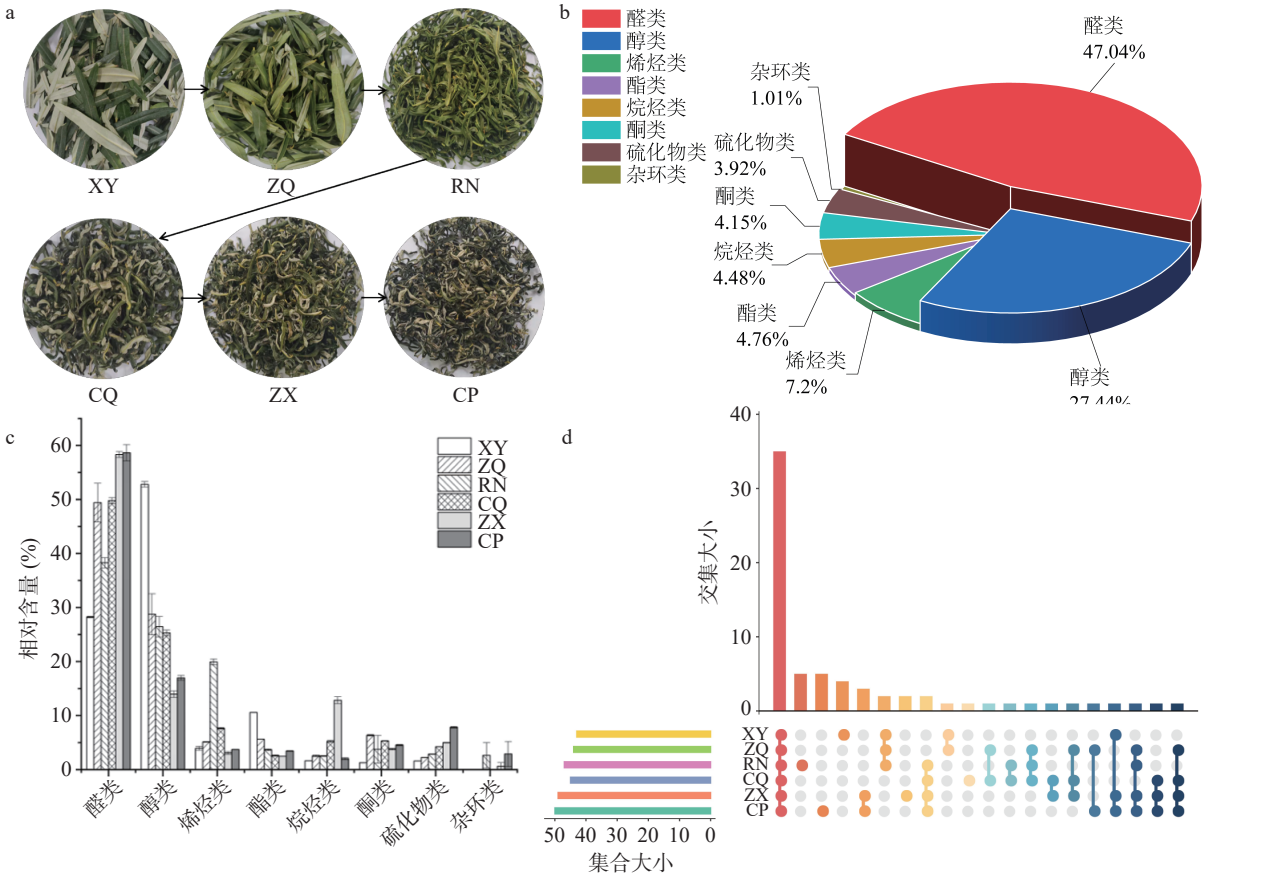


图 2 沙棘叶绿茶加工过程中挥发性化合物分析

Fig.2 Analysis of volatile compound profiles during the processing of sea buckthorn leaf green tea

注：a：6 个沙棘叶绿茶样品加工过程；b：8 种类别中化合物相对含量比例；c：整个加工过程中 8 种类别化合物的动态变化；d：加工过程中挥发性物质共有与特有种类 UpSet 图分析。

表 1　沙棘叶绿茶加工过程中挥发性成分的动态变化

Table 1　Dynamic changes in volatile components during the processing of sea buckthorn leaf green tea

保留时间（min）	名称	CAS	相对含量(%)					
			XY	ZQ	RN	CQ	ZX	CP
	醇类							
2.39	(E)-2-戊烯-1-醇	1576-96-1	1.11±0.01^{b}	1.64±0.02^{a}	1.05±0.05^{c}	0.96±0.01^{d}	0.84±0.01^{e}	0.73±0.01^{f}
2.42	顺式-4-环戊烯-1,3-二醇	29783-26-4	–	2.89±2.55^{a}	1.50±1.46^{ab}	0.36±0.51^{b}	–	–
2.44	(E)-2-己烯-1-醇	928-95-0	2.18±0.00^{b}	1.26±2.19^{b}	1.94±1.68^{b}	0.79±0.70^{b}	1.29±0.01^{b}	5.53±0.04^{a}
3.34	(Z)-2-己烯-1-醇	928-94-9	2.45±0.01^{b}	5.99±3.52^{a}	1.16±0.00^{b}	1.32±0.01^{b}	0.75±0.01^{b}	0.55±0.06^{b}
4.02	(Z)-3-己烯-1-醇	544-12-7	24.16±0.28^{a}	2.55±0.00^{c}	2.20±0.00^{d}	2.79±0.13^{b}	2.12±0.03^{d}	1.85±0.07^{e}
4.05	(E)-3-己烯-1-醇	928-97-2	10.41±0.06^{a}	3.30±0.00^{b}	2.77±0.00^{c}	2.55±0.03^{d}	2.22±0.14^{e}	1.56±0.02^{f}
4.18	2,4-己二烯-1-醇	111-28-4	1.20±0.00^{d}	3.56±0.00^{a}	2.03±0.01^{b}	1.60±0.12^{c}	0.17±0.14^{e}	0.25±0.01^{e}
5.85	(Z)-3-癸烯-1-醇	10340-22-4	2.62±0.17	–	–	–	–	–
6.29	紫苏醇	536-59-4	–	–	–	–	–	1.02±0.88
6.31	异蒲勒醇	89-79-2	0.44±0.02^{bc}	0.68±0.08^{b}	1.29±0.22^{a}	0.72±0.01^{b}	0.23±0.05^{c}	0.51±0.18^{bc}
6.41	二氢香芹醇	619-01-2	0.21±0.08^{a}	0.42±0.37^{a}	0.35±0.13^{a}	0.35±0.05^{a}	0.29±0.01^{a}	0.22±0.01^{a}
6.74	3-(苄氧基甲基)己-5-烯-1,2-二醇	/	2.01±0.02	–	–	–	–	–
6.75	反式-4-侧柏醇	17699-16-0	–	–	0.10±0.00	–	–	–
6.97	3,7-二甲基-1-辛醇	106-21-8	–	–	–	0.28±0.02^{b}	1.21±0.01^{a}	–
7.18	芳樟醇	78-70-6	3.33±0.17^{b}	2.76±0.02^{c}	4.58±0.15^{a}	2.43±0.03^{d}	1.21±0.01^{e}	0.97±0.02^{f}
7.63	丁辛醇	3913/2/8	0.11±0.02^{d}	0.88±0.01^{b}	2.15±0.04^{a}	0.12±0.01^{d}	0.11±0.00^{d}	0.19±0.02^{c}
7.64	反式-2-壬烯-1-醇	31502-14-4	–	0.71±0.01^{c}	–	0.25±0.03^{d}	1.81±0.12^{a}	1.18±0.02^{b}
8.00	2-己基癸醇	2425-77-6	0.43±0.01^{d}	1.43±0.05^{b}	0.74±0.03^{c}	1.64±0.03^{a}	0.18±0.01^{e}	0.15±0.02^{e}
9.19	(E)-2-十三烯醇	74962-98-4	–	–	2.21±0.02^{a}	1.81±0.01^{b}	0.28±0.01^{d}	0.35±0.01^{c}
8.31	(E)-2-癸烯-1-醇	18409-18-2	0.76±0.06^{b}	0.14±0.01^{c}	0.11±0.01^{c}	3.14±0.12^{a}	0.24±0.42^{c}	0.20±0.02^{c}
11.41	橙花叔醇	142-50-7	0.19±0.33^{c}	0.78±0.01^{b}	1.41±0.01^{a}	1.21±0.02^{a}	0.90±0.00^{b}	0.68±0.00^{b}
	醛类							
2.28	己醛	66-25-1	1.43±0.01^{c}	1.88±0.01^{a}	1.54±0.01^{b}	1.06±0.03^{d}	0.88±0.01^{f}	0.95±0.01^{e}
2.54	3-甲基丁醛	590-86-3	–	–	1.58±0.00^{b}	0.46±0.48^{c}	0.49±0.02^{c}	3.54±0.02^{a}
4.12	(E)-2-壬烯醛	18829-56-6	0.47±0.04^{a}	0.67±0.00^{a}	0.63±0.00^{a}	0.71±0.00^{a}	0.53±0.02^{a}	0.44±0.57^{a}
4.20	(E)-2-己烯醛	6728-26-3	1.26±0.12^{d}	5.61±0.11^{a}	2.63±0.02^{b}	1.83±0.00^{c}	0.29±0.25^{e}	0.34±0.01^{e}
4.52	庚醛	111-71-7	0.65±0.02^{e}	2.66±0.02^{a}	1.59±0.12^{b}	1.03±0.02^{c}	0.89±0.01^{d}	0.34±0.02^{f}
5.90	辛醛	124-13-0	11.43±0.12^{a}	5.05±3.63^{b}	6.33±1.73^{b}	10.71±0.58^{a}	10.57±0.06^{a}	9.83±0.05^{a}
6.78	苯乙醛	122-78-1	–	0.58±0.51^{b}	–	–	–	2.75±0.01^{a}
7.37	壬醛	124-19-6	10.26±0.12^{f}	28.56±0.60^{c}	17.88±0.21^{e}	27.15±0.32^{d}	40.88±0.31^{a}	29.78±0.27^{b}
7.91	十二醛	112-54-9	1.95±0.07^{a}	0.79±0.03^{d}	1.62±0.12^{b}	0.98±0.04^{c}	0.49±0.03^{e}	0.42±0.00^{f}
8.87	癸醛	112-31-2	–	3.14±0.01^{b}	2.97±0.01^{c}	–	2.82±0.01^{d}	4.07±0.03^{a}
9.16	*β*-环柠檬醛	432-25-7	–	–	–	–	–	2.66±0.03
9.67	2,6,6-三甲基-1-环己烯基-1-乙醛	472-66-2	0.13±0.00^{a}	0.12±0.02^{a}	–	–	–	–
10.73	(Z)-7-十六碳烯醛	56797-40-1	–	–	0.26±0.00	–	–	–
	烯烃类							
4.93	*α*-蒎烯	80-56-8	0.15±0.02^{e}	1.64±0.02^{b}	4.54±0.03^{a}	1.58±0.23^{b}	1.21±0.01^{c}	1.00±0.06^{d}
5.72	反式氧化柠檬烯	4959-35-7	–	–	2.53±2.26	–	–	–
6.52	(Z)-*β*-罗勒烯	3338-55-4	–	–	2.21±0.05	–	–	–
7.16	异松油烯	586-62-9	–	–	7.86±0.33^{a}	1.35±0.02^{b}	–	–
11.29	椰脂烯	3856-25-5	0.85±0.02^{b}	0.81±0.05^{b}	0.98±0.08^{a}	0.52±0.02^{c}	0.16±0.00^{d}	0.14±0.00^{d}
11.42	*β*-降冰片烯	5208-59-3	0.38±0.33^{a}	–	–	–	0.29±0.25^{ab}	0.31±0.02^{ab}
11.75	*α*-古芸烯	489-40-7	0.20±0.02^{d}	0.42±0.01^{a}	0.35±0.01^{b}	0.19±0.01^{d}	0.23±0.00^{c}	0.18±0.02^{d}
11.90	*β*-石竹烯	87-44-5	0.30±0.01^{e}	1.14±0.08^{c}	1.47±0.01^{a}	1.24±0.01^{b}	0.50±0.00^{d}	0.16±0.01^{f}
12.34	*α*-草烯	6753-98-6	0.96±0.05^{a}	0.10±0.00^{f}	0.26±0.02^{d}	0.29±0.02^{c}	0.16±0.00^{e}	0.91±0.04^{b}
12.44	香树烯	489-39-4	0.13±0.01^{b}	0.12±0.00^{c}	0.16±0.01^{a}	–	–	–
12.77	*γ*-莎草烯	515-17-3	–	–	–	0.22±0.01	–	–
12.87	*α*-依兰烯	10208-80-7	0.67±0.03^{b}	0.69±0.00^{b}	1.08±0.06^{a}	1.03±0.05^{a}	0.33±0.01^{c}	0.15±0.02^{d}
13.15	*β*-卡丁烯	523-47-7	0.21±0.01^{c}	0.17±0.00^{d}	0.36±0.02^{a}	0.29±0.01^{b}	0.17±0.02^{d}	0.27±0.01^{b}
	烷烃类							
6.59	6-甲基十八烷	10544-96-4	–	0.08±0.14^{a}	–	0.11±0.01^{a}	–	–

续表 1

保留时间（min）	名称	CAS	相对含量(%)					
			XY	ZQ	RN	CQ	ZX	CP
6.60	十一烷	112-21-4	–	–	–	–	5.73±0.51	–
7.05	2,6,10-三甲基十二烷	3891-98-3	–	0.91±0.01^{c}	–	1.12±0.01^{b}	1.30±0.02^{a}	–
8.14	2-甲基十一烷	7045-71-8	–	–	–	–	0.40±0.05	–
8.66	十二烷	112-40-3	0.85±0.02^{c}	0.81±0.01^{d}	1.26±0.01^{b}	1.55±0.02^{a}	0.44±0.02^{c}	0.28±0.02^{f}
9.44	十四烷	629-59-4	–	–	–	–	2.10±0.06^{a}	0.40±0.00^{b}
9.91	十五烷	629-62-9	–	–	–	–	0.80±0.00^{a}	0.13±0.12^{b}
10.07	壬烷	629-92-5	0.21±0.01^{c}	0.24±0.00^{c}	0.25±0.01^{c}	0.82±0.12^{b}	1.03±0.06^{a}	0.22±0.01^{c}
10.43	2,6,10-三甲基十四烷	14905-56-7	–	–	–	–	–	0.21±0.00
11.01	3-甲基十三烷	6418-41-3	0.14±0.01^{c}	0.13±0.00^{cd}	0.50±0.02^{a}	0.40±0.02^{b}	0.12±0.00^{d}	0.10±0.01^{e}
12.19	2,6,10-三甲基十三烷	3891-99-4	0.40±0.01^{d}	0.34±0.01^{e}	0.40±0.02^{d}	0.61±0.01^{b}	0.81±0.03^{a}	0.55±0.02^{c}
	酯类							
4.46	己酸苯乙酯	6290-37-5	1.04±0.00^{e}	1.46±0.01^{c}	1.13±0.01^{d}	2.16±0.12^{b}	2.23±0.02^{b}	2.54±0.04^{a}
6.27	(S,E)-2,5-二甲基-4-乙烯基己-2,5-二烯-1-基乙酸酯	20384-05-8	–	–	2.29±0.25	–	–	–
6.97	二十烷酸苯甲酯	77509-04-7	0.14±0.01	–	–	–	–	–
9.18	[(Z)-己-3-烯基]2-甲基丁酸酯	53398-85-9	9.14±0.02^{a}	4.11±0.04^{b}	0.12±0.02^{c}	–	–	–
11.43	异戊酸香叶酯	109-20-6	–	–	–	–	–	0.30±0.12
12.35	橙花醇基乙酸酯	2306-78-7	–	–	–	0.11±0.00^{c}	0.20±0.01^{b}	0.39±0.01^{a}
	酮类							
5.71	6-甲基-5-庚烯-2-酮	110-93-0	0.15±0.01^{c}	5.56±0.12^{a}	2.92±2.53^{b}	4.05±0.21^{ab}	3.20±0.14^{b}	3.75±0.01^{ab}
8.54	3,5-壬二烯-2-酮	41628-40-4	0.46±0.02	–	–	–	–	–
12.70	(E)-β-紫罗兰酮	79-77-6	0.61±0.02^{c}	0.73±0.02^{a}	0.71±0.01^{a}	0.64±0.01^{b}	0.56±0.03^{d}	0.51±0.01^{e}
	杂环类							
2.40	1,6-脱水-2,4-二脱氧-β-D-核糖-己吡喃糖	14059-74-6	–	–	–	–	0.60±0.65^{b}	2.70±2.22^{a}
11.04	脱氢芳紫罗兰	30364-38-6	–	–	–	–	–	0.37±0.00
	硫化物类							
1.80	二甲硫醚	75-18-3	1.55±0.01^{f}	2.21±0.01^{e}	2.76±0.01^{d}	3.71±0.01^{c}	4.94±0.03^{b}	7.35±0.03^{a}
合计			97.71±0.51^{a}	99.28±0.48^{a}	95.65±1.94^{b}	88.25±0.93^{d}	99.17±0.52^{a}	93.99±1.91^{c}

注: 不同小写字母表示具有显著性差异(P<0.05), “–”代表该物质未检出, “/”代表该物质暂无专属的CAS号。

类在前期占比低(1.63%~2.53%), 炒青后升至 5.22%, 增香工序骤升至 12.83%(鲜叶的 8 倍), 成品茶则快速回落至 2.01%, 推测加热促进生成但成品中部分挥发。酮类鲜叶占比仅 1.25%, 蒸青后升至 6.34%(全程峰值), 后续各工序略有波动, 成品茶维持在 4.53%(鲜叶的 3.6 倍), 杀青是其生成关键节点, 推测为醇类、烯烃类氧化转化所致。在每个加工阶段都检测到一种硫化物(二甲硫醚), 其在加工过程中持续上升, 从鲜叶的 1.55% 增至成品茶的 7.35%(鲜叶的 4.7 倍)。据报道, 二甲基硫化物呈现出一种煮熟的玉米般的香气, 主要是通过高温加热使 S-甲基蛋氨酸降解生成[13]。在化合物类别水平上, 醇类、醛类是各加工阶段共有的优势香气类别, 也是茶叶各加工阶段中均最丰富的两个类别, 两者总相对含量在鲜叶阶段达 81.04%(醛类 28.24%、醇类 52.80%); 其中醛类在成品茶阶段相对含量升至 58.64%, 成为占比最高的香气类别。分析图 2d 发现, 鲜叶、蒸青、揉捻、炒青、增香及成品茶阶段分别检测出 43、44、47、45、48、50 种香气化合物, 共有香气化合物为 35 种。其中鲜叶、揉捻、成品茶阶段分别特有香气化合物数量为 4((Z)-3-癸烯-1-醇、3-(苄氧基甲基)己-5-烯-1,2-二醇、二十烷酸苯甲酯、3,5-壬二烯-2-酮)、5(反式-4-侧柏醇、(Z)-7-十六碳烯醛、反式氧化柠檬烯、(Z)-β-罗勒烯、(S,E)-2,5-二甲基-4-乙烯基己-2,5-二烯-1-基乙酸酯)、5(紫苏醇、β-环柠檬醛、2,6,10-三甲基十四烷、异戊酸香叶酯、脱氢芳紫罗兰)。

2.3 沙棘叶绿茶茶香形成过程解析

将鉴定出来的 70 种挥发性化合物结合文献分析, 将其分为 12 种香气类型[14], 如绿叶香、花香、果香、木质香、化学味等(图 3a 和图 3b)[15]。花香、绿叶香和水果香是样品中挥发性化合物的三种主要气味, 在 12 种不同类别的气味中, 它们分别占总挥发性化合物的 33.67%、24.52% 和 16%(图 3a)。鲜叶阶段以绿叶香为绝对核心(占比 51.88%), 是鲜叶天然标志性香气, 随着加工推进, 绿叶香持续回落, 成品茶阶段仅占 15.81%, 是鲜叶阶段的 1/3, 完成鲜叶特征的消退。花香逐步富集, 从鲜叶的 15.80% 升至增香阶段峰值 47.58%, 成品茶阶段仍保持 37.09%。果香整体呈现上升趋势, 从鲜叶 14.08% 增至成品茶 23.48%(图 3b)。

如图 3c 所示, 关键加工环节的香气特殊波动, 在揉捻过程中, 草本香从蒸青的 1.65% 骤升至 12.82%,

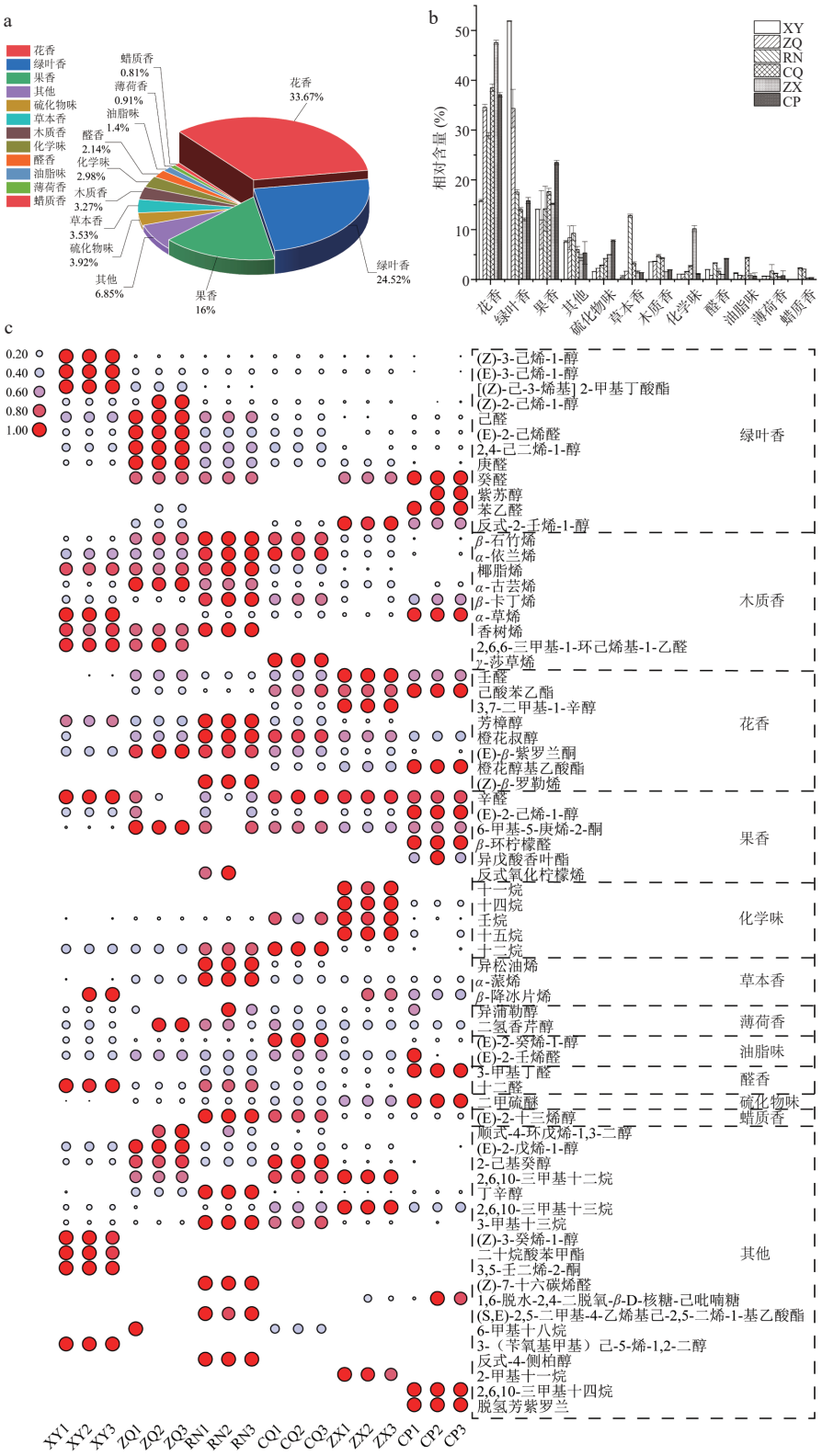


图 3　沙棘叶绿茶加工过程香气谱

Fig.3　Aroma profiles during the processing of sea buckthorn leaf green tea

注：a：12 种香气类型；b：加工过程中 12 种香气类型化合物的动态变化；c：不同香气分类下加工过程中挥发性成分热图。

揉捻的机械作用破坏了鲜叶细胞结构，促使草本型挥发物大量释放；蜡质香首次显著上升，从 0% 增至 2.28%，细胞破损后蜡质类成分参与香气构成，揉捻阶段是机械作用驱动香气释放的核心环节[16−17]。在增香环节，花香达峰值 47.58%，增香的热作用促进了萜烯类、醛类等花香型挥发物的富集，是花香主导的关键环节[18]；化学味从炒青的 2.69% 飙升至 10.19%（短暂热分解副产物），成品茶回落至 1.10%。在炒青环节，油脂味升至 4.36%（热作用促发脂类物质挥发），后续环节回落至 1% 以下[19−20]。加工过程中，硫化物味持续积累，从鲜叶的 1.62% 逐步升至成品茶的 7.68%，成为成品茶的次要辅助香气。最终成品茶

的香气层次结构为花香(37.09%)+果香(23.48%)构成核心风味;绿叶香(15.81%)+醛香(4.21%)+硫化物味(7.82%)保留鲜叶清新感,补充特殊柔和气息;木质香、草本香等(占比≤2%)丰富香气层次感。

2.4 多元统计分析

OPLS-DA 是偏最小二乘回归和正交信号处理的融合,是一种用于对多变量数据进行分类、增强模型可解释性和预测性的统计方法。在本研究中,采用 OPLS-DA 分析了沙棘叶绿茶在不同加工阶段挥发性成分的差异。OPLS-DA 模型参数(R^2X=0.945, R^2Y=0.982, Q^2=0.960)具有较强的解释和预测能力。如图 4a 所示,6 个加工阶段之间存在明显的差异,其中蒸青、炒青和增香阶段的影响最为显著。替换试验参数(R^2=0.196, Q^2=−0.847)进一步证实了

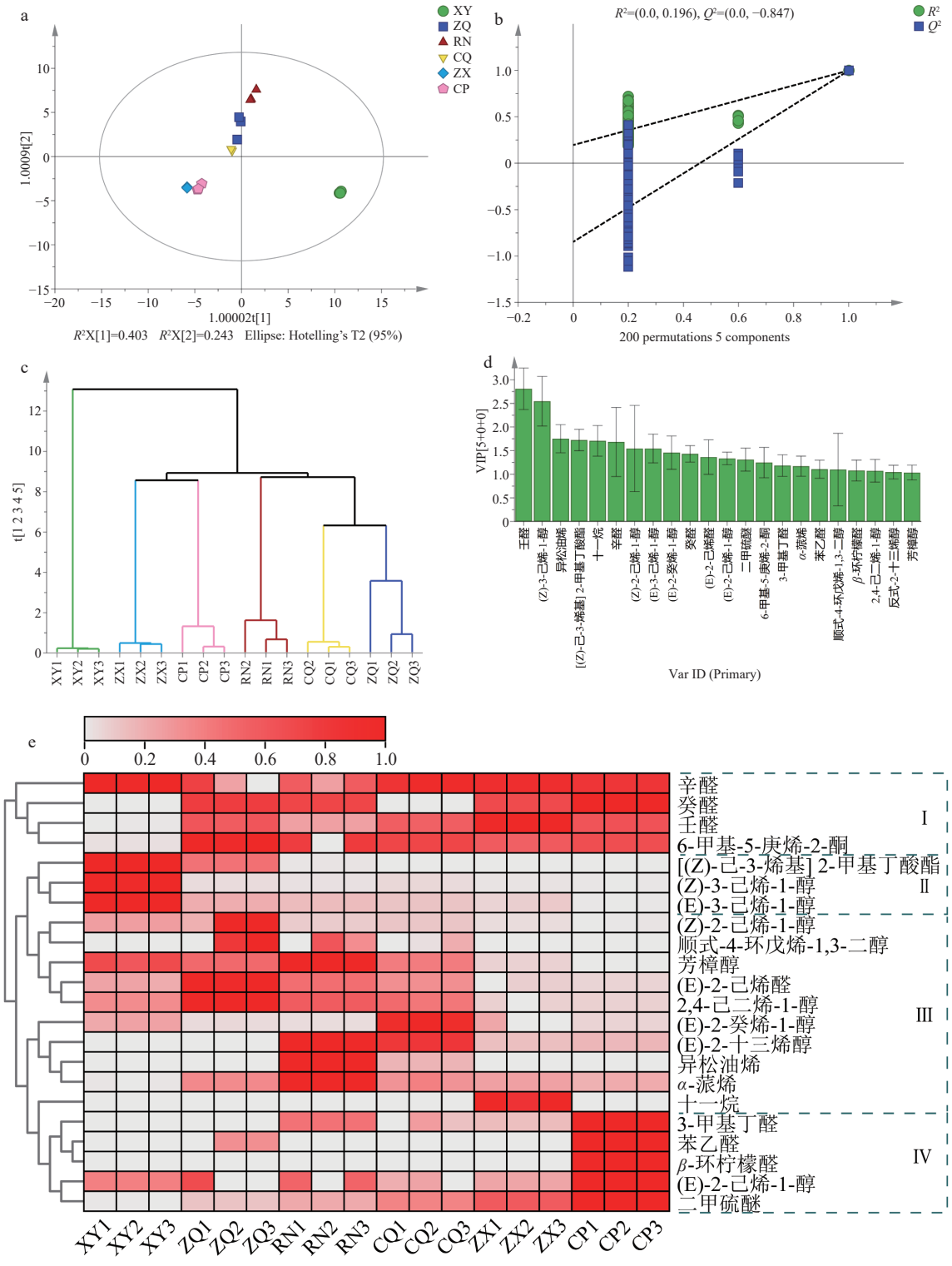


图 4 挥发性成分的多元统计分析

Fig.4 Multivariate statistical analysis of volatile components

注:a:OPLS-DA 评分图;b:200 次排列试验交叉验证图;c:6 个加工过程中挥发性成分聚类图;d:VIP>1 的关键鉴别化合物;e:基于 VIP>1 构建的热图可视化,P<0.05。

该模型在没有过拟合的情况下的可行性(图 4b)。沙棘叶绿茶不同加工阶段的层次聚类树展示了各加工阶段的特征相似性，如图 4c 所示，可以看出鲜叶阶段自身聚类距离极近，说明鲜叶的特征稳定且独立；增香与成品茶的分支紧密聚合，说明增香工序后，成品茶的特征变化很小，两者相似度最高；揉捻阶段的分支介于“鲜叶/增香-成品茶”与“炒青/蒸青”之间，其特征是加工过渡阶段的中间状态；蒸青阶段的分支位于聚类树最末端，也能说明蒸青阶段的特征与其他加工阶段的差异最显著。

在投影中的变量重要性(VIP 值)可以用来衡量单个变量对 OPLS-DA 模型的贡献。根据投影 VIP> 1 和 P<0.05 的变量重要性，共鉴定出 22 种区分六种加工过程的关键挥发性化合物(图 4d)[21]。图 4e 可以直观地显示它们在不同加工阶段的变化，颜色的深浅代表含量的高低。这些挥发物大致可分为四类：第一类 I 从鲜叶到成品茶阶段整体呈现波动增加趋势(如辛醛、癸醛、壬醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮)，这类化合物在鲜叶阶段相对含量相对较低，随加工进程推进含量上下波动，但最终在成品茶阶段含量高于或约等于鲜叶水平。第二类Ⅱ从鲜叶到成品茶阶段整体呈现下降趋势，可以在(Z)-3-己烯基-2-甲基丁酸酯、(Z)-3-己烯-1-醇、(E)-3-己烯-1-醇中观察到，鲜叶阶段含量最高，中间加工环节含量回落，后续保持低水平。第三类Ⅲ在整个加工过程中呈现先上升后下降趋势，在鲜叶和成品茶阶段含量都较低。不同的是化合物在不同的阶段达到峰值，如芳樟醇、(E)-2-十三烯-1-醇、异松油烯、α-蒎烯，在揉捻阶段含量最高；(E)-2-癸烯-1-醇在炒青阶段含量最高；(Z)-2-己烯-1-醇、(E)-2-己烯醛、2,4-己二烯-1-醇是在蒸青阶段含量最高，后续加工过程含量持续降低，保持较低水平。第四类Ⅳ在加工进程中呈现大幅上升趋势(3-甲基丁醛、苯乙醛、β-环柠檬醛、(E)-2-己烯-1-醇、二甲基硫醚)，其在鲜叶阶段含量极低，加工过程中含量稍有增多，但是在成品茶阶段含量大幅上升，达到峰值。结果表明，通过气相色谱-质谱结合多元统计分析，成功地鉴定和区分了沙棘叶绿茶不同加工阶段的挥发性化合物，清晰展现了各类化合物的含量动态变化规律。

壬醛是所有化合物中相对含量最高的，占比为 26.86%，具有玫瑰香、柑橘香、脂香等[22]，属于花香的香气类型，沙棘叶中富含的 C18 不饱和脂肪酸为全加工流程提供了壬醛的前体[23−25]，并在加工中逐步富集，在增香阶段达到峰值，是整个加工过程中壬醛含量的 26.46%。(Z)-3-己烯-1-醇、(E)-3-己烯-1-醇和辛醛在鲜叶中浓度最高[26]。(Z)-3-己烯-1-醇提供青草和绿叶的香气，(E)-3-己烯-1-醇提供绿叶香、花香、油脂香等，两者都属于绿色香型，通常是通过沙棘叶中脂肪酸酶促代谢天然合成、并在加工破损细胞后大量释放的绿叶香特征挥发物。辛醛具有柑橘香、橙皮香、绿叶香、草本香、清新香等，属于果香型化合物，它的产生分为沙棘鲜叶天然生物合成和绿茶加工过程中的酶促、热促生成两个阶段。(Z)-2-己烯-1-醇具有绿叶香、绿豆香、草本香和水仙香等香气特征，(E)-2-己烯醛表现出绿叶香、香蕉香、脂肪香和干酪香，二者均为典型的绿叶香型挥发物。它们均由 α-亚麻酸经脂氧合酶、氢过氧化物裂解酶催化的酶促反应生成，其中(E)-2-己烯醛是该通路的直接裂解产物。二者在蒸青阶段含量最高，这是由于蒸青过程的高温可快速钝化脂氧合酶与氢过氧化物裂解酶，使前期形成的挥发性物质得以保留并富集[27]。芳樟醇和异松油烯不断富集，在揉捻阶段含量最高。芳樟醇[28−30]表现出柑橘香、花香、甜香、玫瑰木香和蓝莓香气味，属于花香型化合物，是在芳樟醇合成酶的催化作用下，由香叶基二磷酸经骨架重排与水解合成而来[31−32]。异松油烯表现出清新香、木质香、甜香和柑橘香，属于草本香型，是异松油烯合酶催化底物香叶基二磷酸生成[33]。二者在揉捻阶段达到峰值，这是因为揉捻通过机械力破坏叶细胞结构，促使前期已合成并储存于细胞内的芳樟醇和异松油烯充分释放，最终表现为含量显著升高[25]。(E)-2-癸烯-1-醇是具有清新空气香、柑橘香、玫瑰香和朗姆酒香等香气的脂肪香型的化合物，在炒青阶段含量最高，是由炒青时细胞剧烈破损、高温热降解、瞬时氧化等反应的协同作用效果产生的[34]。在成品茶中，3-甲基丁醛、苯乙醛、β-环柠檬醛的含量不断富集达到加工全程峰值，三者分别通过不同反应机制积累形成：3-甲基丁醛主要源于加工过程中的酶促反应，是具有温和香、洁净香、水润香型、柑橘皮香和脂肪香的蜡香型；苯乙醛由氧化反应生成，是具有绿叶香、甜香、花香、蜂蜜香和可可香的绿叶香型[33,35]；β-环柠檬醛则经热降解反应富集，是具有热带香、藏红花香、草本香、洁净香、甜香和烟草香的热带香型[36]。三者的高含量共同赋予了沙棘叶绿茶层次丰富、协调统一且兼具清新感与温润感的高端复合香气，具体可概括为：以“洁净感”为基底，融合清甜花香、热带鲜活气息与珍贵香韵，叠加醇厚甜润与柔和脂感，兼具自然草本特质与温润质感，整体香气立体饱满、余韵悠长。

3　结论

本研究通过 SPME-GC-MS、GC-E-Nose 结合多元统计分析，系统探究了沙棘叶绿茶加工过程中挥发性成分的动态变化特征，共鉴定出 70 种挥发性化合物，涵盖醇类、醛类等 8 类，其中醛类、醇类、烯烃类为核心类别。加工过程中，挥发性成分呈现显著阶段性变化：醛类从鲜叶的 28.24% 持续攀升至成品茶的 58.64%，成为占比最高的类别；醇类、酯类则全程大幅下降，分别降至鲜叶含量的 32%；烯烃类在揉捻阶段骤升至鲜叶的 5 倍，后快速回落。香气类型演变呈现“绿叶香消退、花香果香富集”的规律，鲜叶以绿叶香为主(51.88%)，成品茶形成以花香(37.09%)、果

香(23.48%)为核心,辅以硫香、醛香的复合香气特征。不同加工环节催生特征优势化合物,蒸青富集(Z)-2-己烯-1-醇,揉捻促进异松油烯释放,炒青推动(E)-2-癸烯-1-醇生成,成品茶中 3-甲基丁醛等含量达峰值。OPLS-DA 模型验证了各加工阶段挥发性成分的显著差异,研究揭示,蒸青前会发生酶促反应并在后续过程中富集香气成分,揉捻、增香则通过细胞破损、热降解等机制共同调控沙棘叶绿茶香气的形成与优化。

© 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] 焦岩, 常影, 刘井权. 沙棘黄酮提取与分离技术研究综述[J]. 食品工业, 2012, 33(8): 115−118. [JIAO Yan, CHANG Ying, LIU Jingquan. The extraction and separation techniques summary of seabuckthorn flavone[J]. The Food Industry, 2012, 33(8): 115−118.]

[2] 任梦梦, 徐旭彤, 晋程妮, 等. 沙棘叶的活性成分、生物功能及应用研究进展[J/OL]. 现代食品科技, 2025-09-12. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.0918. [REN Mengmeng, XU Xutong, JIN Chengni, et al. Research progress on active components, biological functions and applications of seabuckthorn leaves [J/OL]. Modern Food Science and Technology, 2025-09-12. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.0918.]

[3] 任苏北. 沙棘种子育苗技术分析[J]. 北京农业, 2015(2): 34−35. [REN Subei. Analysis of seed seedling raising technology of *Hippophae rhamnoides* L[J]. Beijing Agriculture, 2015(2): 34−35.]

[4] 明悦. 《全国沙棘资源本底调查报告》发布[J]. 绿色中国, 2022(13): 58−59. [MING Yue. "National seabuckthorn resources background investigation report" released[J]. Green China, 2022(13): 58−59.]

[5] WANG Ningning, WEN Xiufeng, GAO Yan, et al. Identification and characterization of the bioactive polyphenols and volatile compounds in sea buckthorn leaves tea together with antioxidant and *α*-glucosidase inhibitory activities[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 890486.

[6] YANG Yanqin, XIE Jialing, WANG Qiwei, et al. Volatolomics-assisted characterization of the key odorants in green off-flavor black tea and their dynamic changes during processing[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101432.

[7] 方东升. 信阳毛尖绿茶加工过程中香气与滋味物质变化规律[D]. 信阳: 信阳师范大学, 2025. [FANG Dongsheng. Study on the changes in aromatic and taste substances during Xinyang Maojian green tea processing[D]. Xinyang: Xinyang Normal University, 2025.]

[8] 陈盛相, 徐志颖, 杨雪, 等. 不同杀青方式对'白牛早'绿茶风味品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(13): 274−282. [CHEN Shengxiang, XU Zhiying, YANG Xue, et al. Effects of different fixation methods on the flavor and quality of'Bainiuzao'green tea[J]. Food Science, 2025, 46(13): 274−282.]

[9] 李若云, 刘振平, 李翔宇, 等. 杜仲茶加工工艺研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 34−40. [LI Ruoyun, LIU Zhenping, LI Xiangyu, et al. Research progress on the processing technology of *Eucommia ulmoides* tea[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 34−40.]

[10] 胡源, 刘梦圆, 周秦羽, 等. 干燥工艺对红茶品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 191−200,232. [HU Yuan, LIU Mengyuan, ZHOU Qinyu, et al. Effect of different drying process on the quality of black tea[J]. Food and Machinery, 2021, 37(6): 191−200, 232.]

[11] WANG Qiwei, XIE Jialing, WANG Lilei, et al. Comprehensive investigation on the dynamic changes of volatile metabolites in fresh scent green tea during processing by GC-E-Nose, GC-MS, and GC×GC-TOFMS[J]. Food Research International, 2024, 187: 114330.

[12] 黄海, 张晓洲, 罗金龙, 等. 基于气味活度值法分析炒青绿茶与烘青绿茶的香气特征差异[J]. 贵州农业科学, 2025, 53(2): 112−119. [HUANG Hai, ZHANG Xiaozhou, LUO Jinlong, et al. Differences in aroma characteristics between stir-fried green tea and baked green tea based on odor activity value method[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2025, 53(2): 112−119.]

[13] 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.

[14] MA Bingsong, MA Cunqiang, ZHOU Binxing, et al. Revealing the formation of aged aroma in raw Pu-erh tea during the storage through comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled to time-of-flight mass spectrometry and molecular docking[J]. Current Research in Food Science, 2025, 10: 101038.

[15] LI Huanhuan, LUO Liyong, WANG Jie, et al. Lexicon development and quantitative descriptive analysis of Hunan fuzhuan brick tea infusion[J]. Food Research International, 2019, 120: 275−284.

[16] 辛董董, 李东霄, 张浩. 不同茶类制茶过程中的化学变化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(2): 216−224. [XIN Dongdong, LI Dongxiao, ZHANG Hao. Chemical changes of different kinds of tea with the processing[J]. Food Research and Development, 2020, 41(2): 216−224.]

[17] WANG Qiwei, SHI Daliang, HU Jiajing, et al. Unraveling the dynamic changes of volatile compounds during the rolling process of Congou black tea via GC-E-nose and GC-MS[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2024, 8: 1436542.

[18] 刘珍珍. 汉中绿茶加工过程中风味物质的形成与变化分析[D]. 汉中: 陕西理工大学, 2020. [LIU Zhenzhen. Analysis of the formation and change of flavor substances in the process of Hanzhong green tea[D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2020.]

[19] AO Xuan, MU Yihan, XIE Shuo, et al. Impact of UHT processing on volatile components and chemical composition of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) pulp: A prediction of the biochemical pathway underlying aroma compound formation[J]. Food Chemistry, 2022, 390: 133142.

[20] OUYANG Wen, YU Yaya, WANG Huajie, et al. Analysis of volatile metabolite variations in strip green tea during processing and effect of rubbing degree using untargeted and targeted metabolomics [J]. Food Research International, 2022, 162: 112099.

[21] YIN Peng, KONG Yashuai, LIU Panpan, et al. A critical review of key odorants in green tea: Identification and biochemical formation pathway[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 221−232.

[22] 于立志, 刘奇琳, 周聪麟. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术的武夷茶区 3 种茶叶籽油挥发性香气成分的比较分析

[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(6): 189−196. [YU Lizhi, LIU Qilin, ZHOU Conglin. Comparative analysis of volatile aroma components of three kinds of tea *Camellia seed* oil in Wuyi tea region based on electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(6): 189−196.]

[23] QIN Muxue, ZHOU Jingtao, LUO Qianqian, et al. The key aroma components of steamed green tea decoded by sensomics and their changes under different withering degree[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138176.

[24] 陈璐瑶, 张志刚, 邢国良, 等. 沙棘叶及其醇提冻干粉挥发性物质和关键营养成分分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 272−280. [CHEN Luyao, ZHANG Zhigang, XING Guoliang, et al. Analysis of volatile components and critical nutritional components of sea buckthorn leaves and alcohol-extracted freeze-dried powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 272−280.]

[25] 张悦, 邵晨阳, 吕海鹏, 等. 不同季节烘青绿茶中的挥发性成分与关键香气活性成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 213−221. [ZHANG Yue, SHAO Chenyang, LÜ Haipeng, et al. Comparative analysis of volatile components and key aroma-active components in baked green tea harvested in different seasons[J]. Food Science, 2024, 45(21): 213−221.]

[26] LAI Sanyan, YI Ning, YIN Shixin, et al. Biochemical characterization of CsCXEs: Carboxylesterase enhances the biosynthesis of green odor volatiles during tea processing[J]. Horticultural Plant Journal, 2025, 11(4): 1684−1698.

[27] 尤秋爽, 石亚丽, 朱荫, 等. 加工工艺对绿茶关键呈香成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 194−200. [YOU Qiushuang, SHI Yali, ZHU Yin, et al. Effect of different processing technologies on the key aroma-active compounds of green tea[J]. Food Science, 2023, 44(8): 194−200.]

[28] 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.

[29] CAI Minyu, HUANG Liyan, DONG Sashuang, et al. Enhancing the flavor profile of summer green tea via fermentation with *Aspergillus niger* RAF106[J]. Foods, 2023, 12(18): 3420.

[30] WANG Baoyi, QU Fengfeng, WANG Peiqiang, et al. Characterization analysis of flavor compounds in green teas at different drying temperature[J]. LWT, 2022, 161: 113394.

[31] HO C T, ZHENG Xin, LI Shiming. Tea aroma formation[J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9−27.

[32] ZHENG Yucheng, HU Qingcai, WU Zongjie, et al. Volatile metabolomics and coexpression network analyses provide insight into the formation of the characteristic cultivar aroma of oolong tea (*Camellia sinensis*)[J]. LWT, 2022, 164: 113666.

[33] 张山. 红茶加工过程中脂质的衍变及其对红茶香气的影响[D]. 昆明: 西南林业大学, 2024. [ZHANG Shan. Evolution of lipid profiles during black tea processing and their effects on the aroma of black tea[D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2024.]

[34] HU Yunfei, WANG Jialin, TANG Jun, et al. Study on dynamic changes in characteristic volatile compounds uncovers aroma development of Hainan Dayezhong (*Camellia sinensis* var. *assamica*) black tea[J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143578.

[35] HUA Jinjie, ZHU Xizhe, OUYANG Wen, et al. Non-target and target quantitative metabolomics with quantitative aroma evaluation reveal the influence mechanism of withering light quality on tea aroma and volatile metabolites evolution[J]. Food Research International, 2024, 192: 114773.

[36] WANG Xuan, YAN Sha, ZHAO Wen, et al. Comprehensive study of volatile compounds of rare *Leucosceptrum canum* Smith honey: Aroma profiling and characteristic compound screening via GC-MS and GC-MS/MS[J]. Food Research International, 2023, 169: 112799.