杨丽冉, 蒋宾, 彭康丽, 等. 基于代谢组学分析提香对川红工夫风味品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 403−413. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080251

YANG Liran, JIANG Bin, PENG Kangli, et al. Effect of Flavor Enhancement on the Flavor Quality of Sichuan Gongfu Black Tea Based on Metabolomics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 403−413. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080251

· 分析检测 ·

基于代谢组学分析提香对川红工夫风味品质的影响

杨丽冉[1], 蒋　宾[1,*], 彭康丽[1], 刘琨毅[1,2], 刘明丽[3], 焦文文[1], 罗学平[1], 成　洲[1,*]

（1.宜宾职业技术学院现代农业学院, 四川 宜宾 644003;
2.宜宾职业技术学院五粮液技术与食品工程学院, 四川 宜宾 644100;
3.宜宾市茶产业研究院, 四川 宜宾 644100）

摘　要: 为了探究提香对川红工夫风味品质及内质成分的影响，本研究以中茶 302 为原料开展提香制茶试验。通过感官定量描述分析（quantitative descriptive analysis，QDA）、超高效液相色谱-质谱法（ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry，UPLC-MS/MS）和气相色谱-质谱法（gas chromatography-mass spectrometry，GC-MS），结合多元统计分析探究提香对川红工夫品质的影响。结果表明，提香处理提高了川红工夫的甜香、花香和果香，以及甜味和鲜味等品质。代谢组学分析发现提香后共筛选得到气味活度值（odor activity values，OAV）大于 1 的 34 种关键香气物质，主要是香叶醇、（E）-2-癸醛、苯乙醛、壬醛、（E）-2-壬烯醛、邻伞花烃、（Z）-6-壬烯醛、（Z）-癸-2-烯醛、α-水芹烯、2-戊基呋喃和庚醛等。筛选到芦丁、木犀草素 7-木糖苷、表儿茶素没食子酸酯、对香豆酸、阿魏酸、L-谷氨酸和 L-茶氨酸等 74 种关键滋味物质。提香对黄酮类、酚酸类和氨基酸及其衍生物等的影响较大，对其他成分影响相对较小。Pearson 相关性分析表明，邻伞花烃、香叶醇、苯乙醛、庚醛、对伞花烃、反式-芳樟醇氧化物（呋喃型）、芳樟醇、（E）-2-辛烯醛和 α-紫罗兰酮等提高了提香川红工夫的花果香和甜香，L-谷氨酸、L-脯氨酸和 L-茶氨酸增加了提香红茶的鲜味和甜味，而木犀草素 7-木糖苷、表儿茶素、对香豆酸、阿魏酸、可可碱和原花青素等在提香后相对含量降低，可能是使得提香红茶苦涩味降低的重要原因。研究结果为工夫红茶品质提升提供理论基础和技术指导。

关键词: 提香, 川红工夫, 风味品质, 代谢组学
中图分类号: TS272.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0403−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080251
本文网刊:

Effect of Flavor Enhancement on the Flavor Quality of Sichuan Gongfu Black Tea Based on Metabolomics

YANG Liran[1], JIANG Bin[1,*], PENG Kangli[1], LIU Kunyi[1,2], LIU Mingli[3], JIAO Wenwen[1], LUO Xueping[1], CHENG Zhou[1,*]

（1.College of Modern Agriculture, Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China;
2.College of Wuliangye Technology and Food Engineering, Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644100, China;
3.Research Institute of Tea Industry of Yibin, Yibin 644100, China）

Abstract: This study investigates how a processing technique designed to improve sensory quality affects flavor attributes and the relative concentrations of volatile and non-volatile compounds in Sichuan Gongfu black tea. The tea cultivar

收稿日期: 2025−08−25
基金项目: 宜宾职业技术学院科研项目（ZRZD24-11, ZRYB24-08）; 宜宾市农业创新能力建设项目（2024NYCX012）。
作者简介: 杨丽冉（1996−）女, 硕士, 讲师, 研究方向: 茶叶功能成分化学与综合利用研究, E-mail: ylrybzy@126.com。
*** 通信作者:** 蒋宾（1993−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品发酵与微生物研究, E-mail: ybzynxy@126.com。
成洲（1972−）男, 硕士, 副教授, 研究方向: 茶叶加工与综合利用研究, E-mail: 15082612661@163.com。

"Zhongcha 302" was used in the experiments. The impact of the processing technique on the aroma and taste qualities of Sichuan Gongfu black tea was evaluated by quantitative descriptive analysis, ultra-high-performance liquid chromatography-mass spectrometry (UPLC-MS/MS), and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), combined with correlation analysis. The results showed that processing increased the sweet, floral, and fruity aromas, as well as the sweet and umami attributes of Sichuan Gongfu black tea. GC-MS analysis identified 34 key volatile compounds with odor activity values greater than 1, including geraniol, (E)-2-decenal, phenylacetaldehyde, nonanal, (E)-2-nonenal, o-cymene, (Z)-6-nonenal, (Z)-2-decenal, α-phellandrene, 2-pentylfuran, and heptanal. UPLC-MS/MS-based metabolomics identified 74 non-volatile compounds influenced by processing, including rutin, luteolin 7-xyloside, epicatechin gallate, p-coumaric acid, feruloyl-L-glutamic acid, and *L*-theanine. Tea processing altered the relative concentrations of several compounds, particularly flavonoids and phenolic acids, as well as amino acids (and their derivatives). Pearson correlation analysis showed that o-cymene, geraniol, phenylacetaldehyde, heptanal, p-cymene, trans-linalool oxide (furanoid), linalool, (E)-2-octenal, and α-ionone were associated with higher sensory scores for the floral, fruity, and sweet aroma attributes in the processed tea. The increased concentrations of L-glutamic acid, L-proline, and L-theanine were associated with greater umami and sweetness. In contrast, tea processing decreased the relative concentrations of luteolin 7-xyloside, epicatechin, p-coumaric acid, ferulic acid, theobromine, and proanthocyanidins, which might explain the reduced bitterness and astringency. These findings provide a theoretical basis and technical guidance for improving the quality of Gongfu black tea.

Key words: flavor enhancement; Sichuan Gongfu black tea; flavor quality; metabolomics

茶是世界三大无酒精饮料之一[1−2]。全发酵的红茶因内质汤色红明、香气甜香高浓、滋味浓醇的独特品质，以及具有预防心血管疾病、抗肥胖、降血压、降血糖和调节肠道菌群等功效，使其成为了最受欢迎的茶类，约占世界茶叶消费量的 75% 左右[3−5]。川红工夫是中国三大高香红茶之一，有甜香浓郁、滋味醇厚的品质特征，且独具特殊的“橘糖香”[3,6−7]。

川红工夫的加工工艺包括萎凋、揉捻、发酵、干燥和提香[3]。在这些步骤中，萎凋和提香对川红工夫的感官品质起着重要作用[4,8]。近期的研究主要集中在萎凋过程和不同萎凋方式对红茶的品质影响及形成机制方面[9−10]。提香能够促使茶叶中的内含物质发生熟化、异构化、氧化等作用，从而降低苦涩味物质含量，生成吡嗪、吡咯和糠醛等香气物质，提高红茶香气和滋味品质[11−12]。随着红茶市场的持续扩大和消费者对红茶品质要求的提高，新的提香技术已经出现，这也导致了红茶质量的变化。因此，有必要深入研究提香对川红工夫品质的影响，以保持其一贯的优良品质，提高市场竞争力。香气和滋味占红茶总体感官品质的 55%，是评定红茶品质高低的重要依据。红茶香气、滋味的高低与挥发性和非挥发性代谢物的含量和种类密切相关[3−5]。然而，关于提香对茶叶品质的影响研究主要在乌龙茶和绿茶上[13−15]，对红茶品质的影响研究相对缺乏。因此，采用各种风味分析方法开展提香对川红工夫品质的影响研究至关重要。

近年来，代谢组学技术由于其能够全面表征和量化茶叶中的小分子代谢产物，被广泛应用于茶叶品质和加工研究[3,16−18]。顶空固相微萃取（headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME）结合气相色谱-质谱联用技术（gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS）因其灵敏度高、操作方便、对高挥发性和低分子量芳香化合物具有快速萃取能力而被广泛应用于食品风味提取分析[4]。超高效液相色谱串联质谱（ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry, UPLC-MS/MS）能够准确定性定量茶叶中的非挥发性代谢物，为全面解析茶叶滋味物质构成提供了技术支撑。课题组前期通过感官评定和代谢组学技术研究发现在 80 ℃ 下提香 3 h 能够显著提高川红工夫的品质[19−20]，但未系统揭示提香对其风味品质成分的影响。因此，为探究提香工艺对风味特征的影响并鉴定提升风味品质的关键代谢物，本研究采用 HS-SPME/GC-MS、UPLC-MS/MS 及定量描述性分析（quantitative descriptive analysis, QDA）技术，结合多元统计分析，对比了川红工夫提香前与提香后的风味特征，为优化提香工艺以提升川红工夫风味品质提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

一芽二叶中茶 302 品种茶鲜叶　于 2025 年 3 月购自宜宾市江安竹都茶叶有限公司，按照川红工夫加工工艺加工制成红毛茶[20]，将红毛茶进行筛分、拣剔后得到未提香的川红工夫，并将其作为对照样品，将对照样品经茶叶烘焙机进行 80 ℃ 提香 3 h 后制成提香川红工夫；氯化钠　成都市科龙化工试剂厂；正己烷、甲醇、乙腈、甲酸等　上海根生生物科技有限公司。

YX-6CHZ-6C 茶叶烘焙机　安溪永兴机械有限公司；101A-2 电热鼓风恒温干燥箱　上海市崇明实验仪器厂；MM400 型球磨仪　上海仁器仪器仪表有限公司；8890-7000D GC-MS 仪、6945D LC/TQ UPLC-MS/MS 仪　美国安捷伦公司；MLG-50B 真空冷冻干燥机　无锡沃信仪器有限公司；DW-HL340 冰箱　中科美菱低温科技有限责任公司；HH-S28S 型数显恒温水浴锅　金坛市大地自动化仪器厂；

5424R 离心机、CentriVap 离心浓缩仪、VORTEX-5 涡旋混合器　杭州米欧仪器有限公司；KQ5200E 超声清洗仪　昆山市超声仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　感官品质定量描述分析　茶叶感官品质定量描述分析（QDA）由 6 名具备高级评茶员或以上资质的专业审评人员组成审评小组，按照国家标准 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》，参照课题组建立的方法对川红工夫的香气和滋味进行评价[19−21]。用花香、果香、甜香、蜜香和熟香来描述茶样香气特征，分别用不同浓度的芳樟醇、乙酸己酯、苯甲醛、苯乙醛和糠醛作为上述 5 种香气属性的参考。用甜味、鲜味、苦味、涩味、酸味、醇度和浓强度来描述滋味特征，用不同浓度的葡萄糖、茶氨酸、咖啡碱、芦丁和柠檬酸作为甜味等 5 种滋味属性的参考，而醇度和浓强度分别指茶汤口感柔和程度和茶汤入口浓及收敛性强度。此外，香气和滋味属性的强度从 0~6 进行评分，得分越高，强度越强，其中 0=无，1=非常弱，2=相当弱，3=相当强，4=强，5=很强，6=非常强。在评价红茶感官品质之前，对小组成员进行训练，以区分不同浓度的参考物质的香气和滋味强度特征。每个茶样由每个小组成员进行 3 次评估，每次评估间隔 5 min，以 6 名审评人员的 QDA 得分平均值作为茶样的最终得分，并绘制雷达图[21]。

1.2.2　挥发性代谢物检测　样品提取：精确称取经过液氮研磨、涡旋混合均匀的 0.5 g 红茶样品于顶空瓶中，加入 5 mL 饱和 NaCl 溶液和 20 μL（10 μg/mL）3-己酮-2,2,4,4-d4 内标溶液，在 60 ℃ 恒温条件下，振荡提取 5 min，待测，每个样品重复提取 3 次。

HS-SPME 萃取条件：萃取头在 250 ℃ 下老化 5 min 后插入样品顶空瓶中，顶空萃取 15 min，在 250 ℃ 下解吸 5 min 后进行 GC-MS 分离鉴定。

气相色谱条件：Agilent J&W 系列 DB-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）；程序升温：初始温度 40 ℃ 保持 3.5 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，再以 7 ℃/min 升至 180 ℃，最后以 25 ℃/min 升至 280 ℃，保持 5 min。柱流速 1.2 mL/min，进样口温度 250 ℃，不分流进样。

质谱条件：电子轰击离子源温度 230 ℃，四极杆温度 150 ℃，接口温度 280 ℃，电子能量 70 eV，参照国标（GB 23200.8-2016）进行定性定量离子扫描。将 GC-MS 检测得到的数据通过 NIST 标准谱库并且结合文献的标准谱图进行检索，保留相似度 80% 以上的香气物质，对香气组分进行定性。按面积归一法计算所检测到的各组分相对含量。

1.2.3　非挥发性代谢物检测　样品提取：川红工夫样品于真空冷冻干燥 63 h 后研磨至粉末状，称取 0.05 g 样品于 2 mL 离心管中，加入 1.2 mL 经−20 ℃ 预冷的 70% 甲醇水内标提取液，每 30 min 涡旋提取 30 s，重复 6 次。将提取液在 12000 r/min 下离心 3 min 后取上清经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后用于 UPLC-MS/MS 分析，每个样品重复提取 3 次。液相色谱和质谱条件参照林洁鑫等[22] 的方法进行。

UPLC 条件：SB-C_{18} 色谱柱（2.1 mm×100 mm，1.8 μm），流动相 A 为含 0.1% 甲酸的超纯水，流动相 B 为含 0.1% 甲酸的乙腈溶液。流速为 0.35 mL/min；柱温 40 ℃；进样量 4 μL。洗脱程序：0 min，95%A、5% B；0~9 min，95%~5%A、5%~95% B；9~10 min，5%A、95%B；10~11 min，5%~95%A、95%~5%B；11~14 min，95%A、5%B。

MS/MS 条件：电喷雾离子源温度和喷雾电压分别设置为 550 ℃ 和 5500 V（正离子模式）/−4500 V（负离子模式）；离子源气体Ⅰ、气体Ⅱ压力和气帘气压力分别设置为 50、60 和 25 psi，离子扫描为多反应监测模式。基于迈维代谢自建数据库对二级谱信息进行物质定性并去除同位素信号与重复信号。利用三重四极杆质谱（QQQ TRAP-MS/MS）的多反应监测（MRM）模式进行代谢物定量。获得不同处理的代谢物质谱分析数据后，对所有物质色谱峰进行峰面积积分，并对同一代谢物在不同样本中的质谱出峰进行积分校正。

1.3　数据处理

利用 SPSS 22.0 软件进行差异显著性分析，采用 SIMCA 14.1 软件对鉴定的代谢产物进行主成分分析（principal component analysis，PCA）和正交偏最小二乘法判别分析（orthogonal projections to latent structures discriminant analysis，OPLS-DA），根据 OPLS-DA 模型获得的变量重要性投影（variable importance in project，VIP）评分进行显著差异代谢物筛选，使用 Origin 8 软件作图。依据参考文献中各挥发性物质在水中的气味阈值对差异化合物的气味活度值（odor activity value，OAV）进行计算和分析[13,17,21]，根据 TGSC 数据库（http:// www. thegoodscentscompany.com/）对差异代谢物进行风味注释。

2　结果与分析

2.1　提香对川红工夫感官品质的影响

根据 1.2.1 的审评方法对提香和未提香川红工夫的滋味和香气特征进行 QDA[19−21]。由图 1 可知，提香后川红工夫的感官品质得到明显改善。香气方面，提香川红工夫表现为甜香带花果香，未提香则以甜香为主。具体来说，提香后川红工夫中甜香（5.32）和果香（5.15）的 QDA 得分显著高于未提香红茶（4.11 和 4.06），这可能与提香增强了美拉德反应和焦糖化作用有关[8,23]。此外，蜜香、花香和熟香品质得分也略高于未提香川红工夫。滋味方面，提香川红工夫为鲜甜、醇爽，而未提香为甜醇稍青。具体为，提香后的甜味（5.26）和鲜味（5.32）高于未提香红茶（4.23 和 4.46），而浓强度、苦味和涩味稍有降低，可能因为提香降低了红茶中苦涩味物质的含量，而提高了鲜甜味物质的含量[24]。

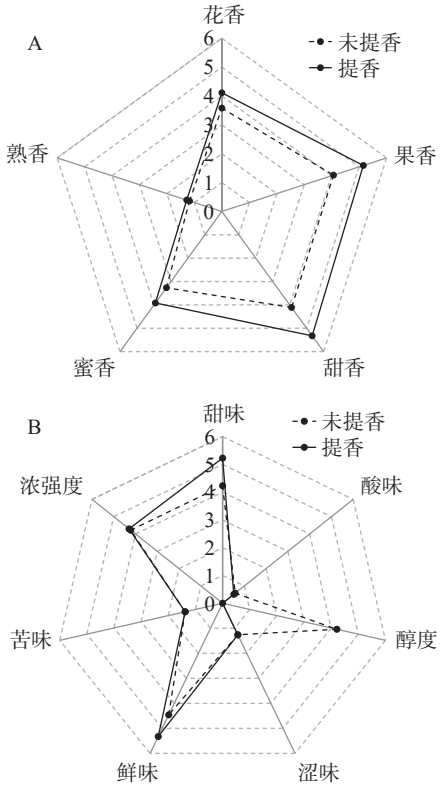


图 1　川红工夫感官品质 QDA 得分

Fig.1　QDA score of sensory quality of Sichuan Congou black tea

注: A 为香气特征差异; B 为滋味特征差异。

2.2　提香对川红工夫挥发性代谢物的影响

2.2.1　川红工夫香气成分及香气化合物组成　采用 GC-MS 对提香和未提香川红工夫的香气物质进行比较分析。如图 2A 所示, 共检测到 1182 种香气物质, 包括萜类 226 种、酯类 191 种、酮类 147 种、杂环化合物 136 种、醇类 102 种、醛类 96 种、烷烃类 67 种、酚类 53 种、酸类 46 种、芳烃类 36 种、胺类 33 种、含氮化合物 23 种、醚类 22 种及含硫化合物 4 种。其中, 萜类、酯类、酮类、杂环化合物、醇类和醛类是川红工夫主要的香气物质, 占香气物质总数的 75.98%, 其余 8 类香气物质的占比均低于 6%。检测出相对含量较高的香气物质有香叶醇、苯乙胺、顺式-二氢香芹酮、(+)-二氢香芹酮、顺式-氧化香芹酮、反式-氧化香芹酮、5-乙基-2-甲基吡啶、苯乙醛、2-己烯醛和苯甲醛等。由图 2B 可知, 提香后川红工夫的总香气物质相对含量显著高于未提香川红工夫 (P<0.05)。为了获得川红工夫中香气物质变化特征, 对未提香(图 1C)和提香(图 1D)川红工夫中香气物质的相对含量占比情况进行了分析, 发现提香处理会导致酯类、醇类、酸类和含氮化合物相对含量降低, 与前人研究结果基本一致[4]。

2.2.2　提香前后川红工夫差异香气物质的变化　为探究提香工艺对香气形成的影响, 以测定到的香气化合物相对含量建立 PCA 模型, 结果如图 3A 所示,

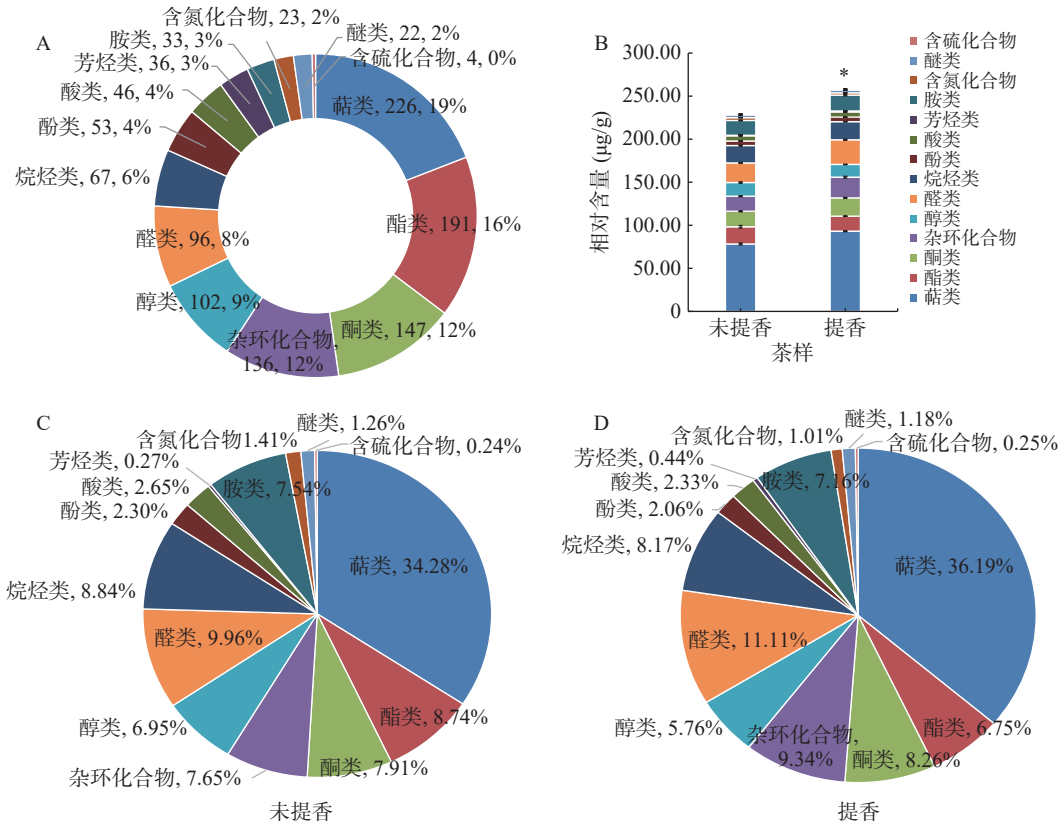


图 2　提香对川红工夫挥发性成分及挥发性化合物组成的影响

Fig.2　Effect of fragrance-enhancing on volatile profiles and composition of volatile compounds of Sichuan Congou black tea

注: A 为检测到的香气物质种类占比; B 为香气物质相对含量; C 和 D 分别为未提香和提香川红工夫各香气物质相对含量占比, *表示有显著性差异, P<0.05。

2 个主成分共提取到挥发性成分 79.1% 的信息，其中拟合参数为 R^2X=0.897、Q^2=0.509，且两组川红工夫得到较好分离，与 QDA 结果保持一致。为更加直观比较提香对川红工夫挥发性成分的影响，基于 1182 种香气物质构建 OPLS-DA 得分图，由图 3B 可知，提香与未提香川红工夫聚为 2 簇，说明提香工艺改变了川红工夫的香气特征。使用 VIP>1 和 P<0.05 进行差异香气物质筛选，共筛选得到水杨酸甲酯、芳樟醇、对-薄荷-1,5,8-三烯、(Z)-3-己烯醇、己醇、苯甲醛和苯乙醛 4-甲基-苯甲醇等 139 种香气差异化合物。这些香气物质进一步被划分为 33 种醛类、23 种杂环化合物、20 种萜类、19 种酯类、18 种酮类、7 种醇类、6 种烷烃、4 种胺类、3 种含氮化合物、2 种酸类、2 种酚类、1 种芳烃和 1 种醚类。

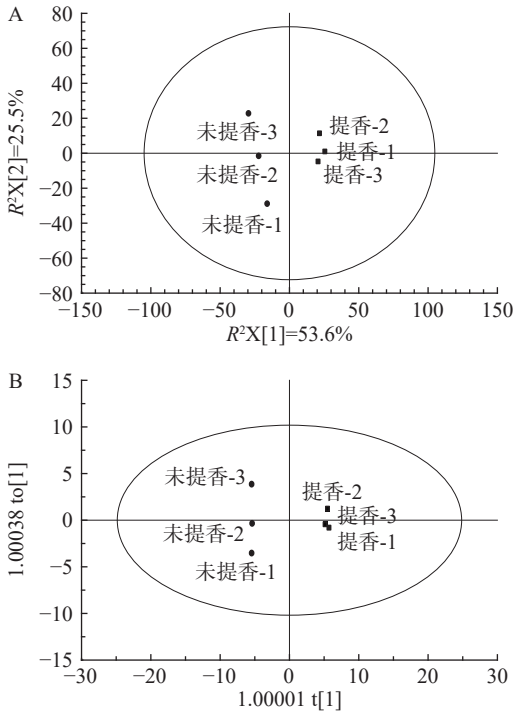


图 3　提香对川红工夫香气物质影响的统计分析

Fig.3　Statistical analysis of the effect of fragrance-enhancing on volatile compounds of Sichuan Congou black tea

注：A 为 PCA 图；B 为 OPLS-DA 图。

由图 4 可知，与未提香相比，提香后共有 86 种香气物质的相对含量显著升高(P<0.05)，主要包括香叶醇、2-己烯醛、苯乙醛、对伞花烃、糠醛、3-糠醛、邻伞花烃、2-戊基呋喃、2,5-二甲基吡嗪、反式-芳樟醇氧化物(呋喃型)、苯甲醛、芳樟醇、α-水芹烯、2-乙酰基吡咯、2-甲基吡嗪、庚醛和脱氢芳樟醇等。其中，香叶醇、(E)-2-己烯醛、2-己烯醛、苯乙醛、对伞花烃、糠醛和 3-糠醛的 VIP 值最大，均大于 4.0，推测这些香气物质对提香后川红工夫甜香和果香的形成具有重要贡献[3,19]。有 53 种香气物质在提香后显著降低(P<0.05)，主要包括(E)-2-己烯醛、(E)-2-癸醛、(E)-丙酸-2-己烯酯、3-甲基-3-戊烯-2-酮、(Z)-3-己烯醇、4-己烯-3-酮、(Z)-癸-2-烯醛、甲酸辛酯、1-辛烯-3-乙酸酯和 2-丙基吡啶等。其中(E)-2-癸醛、(E)-丙酸-2-己烯酯、3-甲基-3-戊烯-2-酮、(Z)-3-己烯醇、4-己烯-3-酮、(Z)-癸-2-烯醛的 VIP 值最大，均大于 2.5，推测这些降低的香气物质是使得提香后川红工夫青气降低的原因[19,23]。

2.2.3　关键香气物质的筛选　仅凭香气物质的相对含量不足以判定它们对川红工夫整体香气的贡献程度。因此，本研究引入香气阈值和气味活度值(OAV)来计算对整体香气有贡献的具体香气物质。研究表明，当化合物的 OAV 大于 1 时，即被认为具有关键风味特征[21,25]。基于此，通过文献和数据库查询上述差异香气物质的阈值并计算其 OAV，共筛选出 34 种 OAV>1 的关键香气物质。根据表 1 中的香气描述，这些关键香气物质被分类为青草气、花香、果香、甜香、柑橘香和熟香类化合物。OAV 前十的香气物质分别是香叶醇、(E)-2-癸醛、(Z)-癸-2-烯醛、苯乙醛、壬醛、(E)-2-壬烯醛、邻伞花烃、(Z)-6-壬烯醛、2-戊基呋喃和庚醛，且其 OAV 在未提香中均大于 15，在提香红茶中均大于 125。除 2-己烯醛和(2-甲基丙基)吡嗪外，具有青草气特征的香气物质(E)-2-癸醛、(Z)-癸-2-烯醛、(E)-2-己烯醛、(Z)-3-己烯醇、(E)-2-辛烯醛、2-丙基吡啶和 1-辛烯-3-乙酸酯在提香中的 OAV 均显著低于未提香川红工夫，表明提香处理降低了川红工夫中的青草气。

香叶醇具有较高的 OAV 和较低的气味阈值(7.5 μg/kg)，被认为是赋予红茶花香的关键香气物质之一[26−27]。具有花香特征的苯乙醛、壬醛、对伞花烃、芳樟醇、反式芳樟醇氧化物(呋喃型)、α-紫罗兰酮和脱氢芳樟醇，以及具有果香和柑橘香的邻伞花烃、(Z)-6-壬烯醛、2-戊基呋喃、庚醛、α-水芹烯、6-甲基-5-庚烯-2-酮和(Z)-己酸-3-己烯酯的 OAV 在提香后也显著提高。这些结果总体上与图 1A 所示的 QDA 结果相符。综上结果表明，提香工艺提升了川红工夫的甜香、花香与果香，而降低了青草气，从而提高了川红工夫的香气品质，与前人研究结果一致[19,26]。

2.3　提香对川红工夫非挥发性代谢物的影响

2.3.1　提香与未提香川红工夫红茶代谢轮廓的差异　为了全面对川红工夫红中的代谢物进行表征，采用基于 UPLC-QTOF-MS 的广泛靶向代谢组学技术分析了提香与未提香红茶的滋味代谢产物差异。结果表明，在提香与未提香红茶中共鉴定出 13 类 3546 种代谢物，如图 5A 所示，其中包括黄酮类 742 种、其他类 593 种、酚酸类 452 种、生物碱 362 种、氨基酸及其衍生物 355 种、脂质 273 种、萜类 232 种、有机酸 160 种、木脂素和香豆素 147 种、核苷酸及其衍生物 98 种、鞣质 83 种、醌类 37 种、甾体 12 种。由图 5B 可知，提香中的代谢物相对含量低于未提香川红工夫，表明提香工艺可造成川红工夫中滋味物质

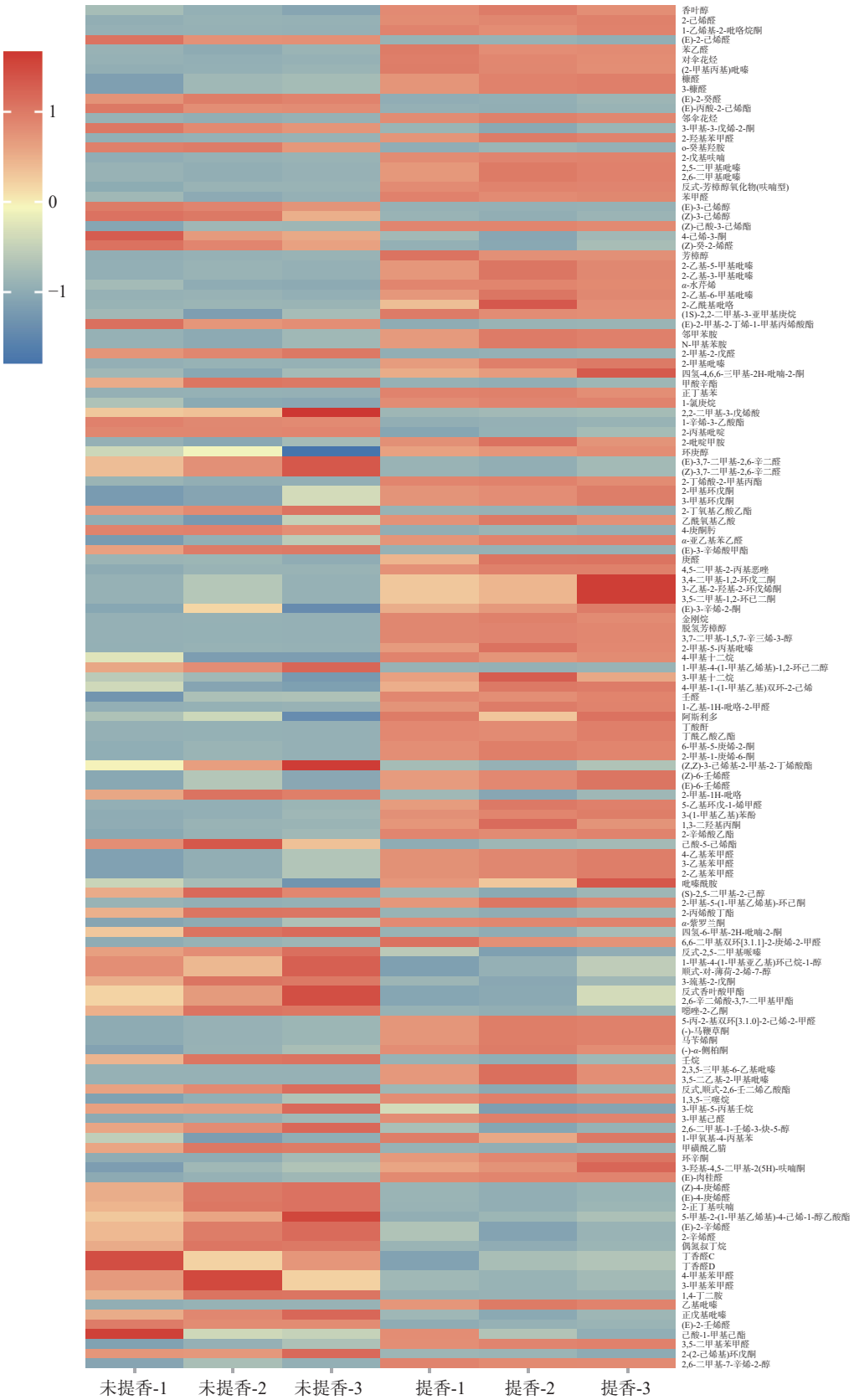


图 4　差异香气物质相对含量热图

Fig.4　Heat-map of the relative contents of key differential volatile compounds

的转化。具体地，与未提香相比，提香使得对茶汤苦涩味有重要贡献的黄酮、酚酸类、生物碱和鞣质的相对含量降低，同时也使得对酸味有促进作用的有机酸降低。此外，提香可能促进了茶叶中蛋白质的水解[12,24]，使氨基酸及其衍生物的相对含量显著升高。

以检测到的 3456 种代谢物为 X 变量，以 2 种加工工艺为 Y 变量，进行 OPLS-DA。由图 5C 可知，提香与未提香川红工夫在第一主成分上呈现差异，得到了很好地区分，且该模型具有较强的累积解释度和预测能力（R^2X=0.735，R^2Y=1，Q^2=0.994）。对

表 1　提香和未提香川红工夫中 OAV>1 的关键香气物质浓度与气味特征描述

Table 1　Concentration and odor description of aroma-active compounds (OAV>1) in the Sichuan Congou black tea produced fragrance-enhancing and not fragrance-enhancing

香气成分	香气描述	VIP值	阈值（μg/kg）	OAV	
				未提香	提香
香叶醇	花香	15.34	7.5[3]	3041.62	4773.42
2-己烯醛	青草气	6.97	30[16]	17.62	106.66
(E)-2-己烯醛	青草气	5.14	17[16]	162.92	77
苯乙醛	花香	4.91	4[16]	468.51	802.25
对伞花烃	花香	4.71	11.4[3]	14.19	121.67
(2-甲基丙基)吡嗪	青草气	4.43	400[16]	1.06	3.77
糠醛	熟香	4.21	770[3]	0.23	1.5
(E)-2-癸醛	青草气	4.03	0.4[16]	4397.3	3154.46
邻伞花烃	果香、柑橘香	3.82	5.01[3]	32.29	192.02
2-戊基呋喃	果香	3.39	5.8[16]	35.81	144.96
反式芳樟醇氧化物（呋喃型）	花香	3.14	190[3]	1.69	4.53
苯甲醛	甜香、杏仁香	3.04	350[3]	3.74	5.2
(E)-3-己烯醇	清香	3.00	110[16]	10.6	15.11
(Z)-3-己烯醇	青草气	2.88	13[16]	125.07	89.12
(Z)-己酸-3-己烯酯	果香	2.87	781[27]	0.67	1.25
(Z)-癸-2-烯醛	青草气	2.82	0.4[16]	4223.45	3110.77
芳樟醇	花香、果香	2.80	6[3]	17.85	90.7
2-乙基-5-甲基吡嗪	熟香	2.76	16[16]	0.42	26.66
2-乙基-3-甲基吡嗪	熟香		8.6[16]	0.78	49.59
α-水芹烯	果香	2.76	36[27]	4.96	16.66
2-乙基-6-甲基吡嗪	熟香	2.75	40[16]	0.24	10.66
2-甲基吡嗪	熟香	2.46	60[16]	1.17	6.72
1-辛烯-3-乙酸酯	青草气	2.21	90[16]	4.32	1.34
2-丙基吡啶	青草气	2.20	11[27]	36.3	11.91
(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二醛	柑橘香、果香	2.10	28[27]	21.54	12.39
α-亚乙基苯乙醛	甜香	2.00	500[16]	0.61	1.05
庚醛	柑橘香、脂香	1.97	2.8[3]	52.28	129.13
脱氢芳樟醇	花香	1.92	110[16]	0.08	1.92
壬醛	花香	1.87	1.1[3]	305.86	484.81
6-甲基-5-庚烯-2-酮	果香	1.65	50[16]	1.98	4.95
(Z)-6-壬烯醛	果香	1.57	1[18]	17.49	154.54
α-紫罗兰酮	花香	1.38	76[16]	0.66	2.06
(E)-2-辛烯醛	青草气	1.05	3[18]	60.21	39.19
(E)-2-壬烯醛	清香	1.01	0.08[18]	1054.09	347.69

注：阈值上标的数值代表参考文献来源。

模型进行 200 次置换检验，截距分别为 R^2=(0.0, 0.964)，Q^2=(0.0, −0.278)（图 4D），表明模型未过拟合，结果稳定可靠。上述结果表明，提香加工后川红工夫中的内质成分含量发生了显著变化。

2.3.2　关键差异代谢物分析　为阐明提香前后川红工夫滋味差异相关的关键变量，以 P<0.05 和 VIP>1 为界限，筛选出 74 种与滋味相关的关键差异物质，包括 24 种黄酮、22 种酚酸类、13 种氨基酸及其衍生物、5 种鞣质、4 种生物碱、3 种核苷酸及其衍生物、2 种萜类和 1 种有机酸。对筛选得到的 74 种化合物进行热图分析，结果如图 6 所示。

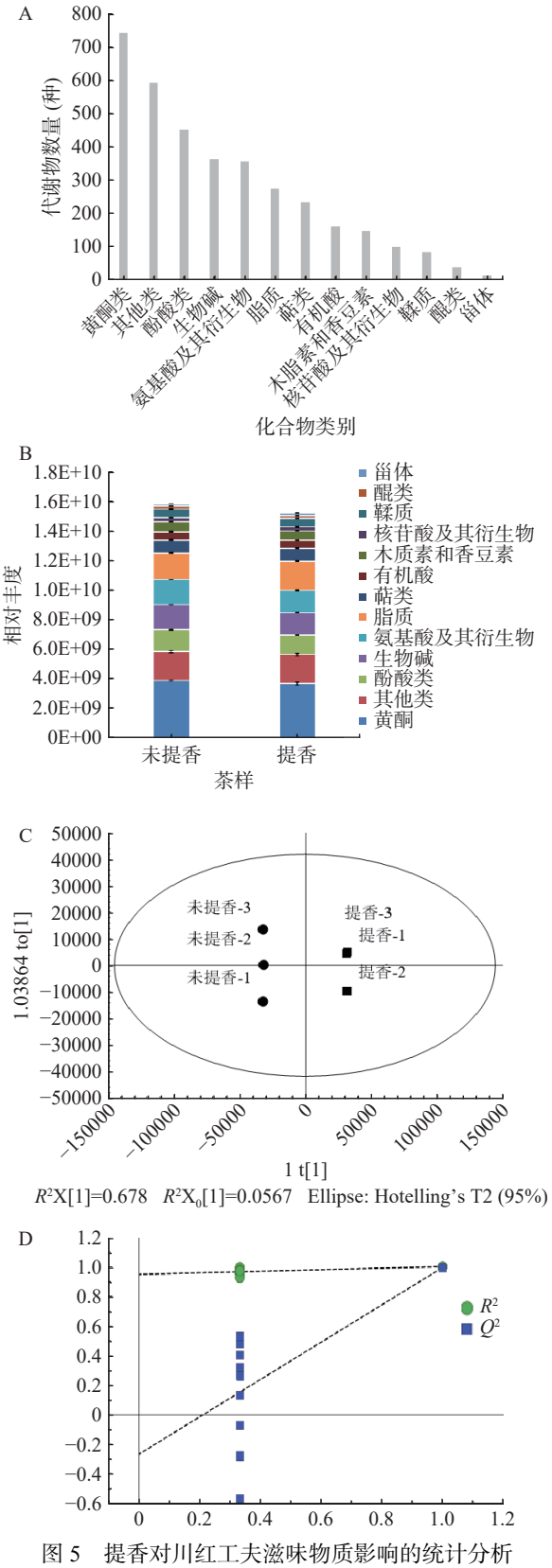


图 5　提香对川红工夫滋味物质影响的统计分析

Fig.5　Statistical analysis of the effect of fragrance-enhancing on no-volatile compounds of Sichuan Congou black tea

注：A 为代谢物数量柱形图；B 为代谢物相对含量；C 为 OPLS-DA 图；D 为置换检验图。

黄酮类是茶叶中重要的多酚类化合物之一，其在茶叶中主要以糖苷形式存在，是影响茶汤色泽和滋味的重要因子。此外，由于其具有较低的味觉阈值

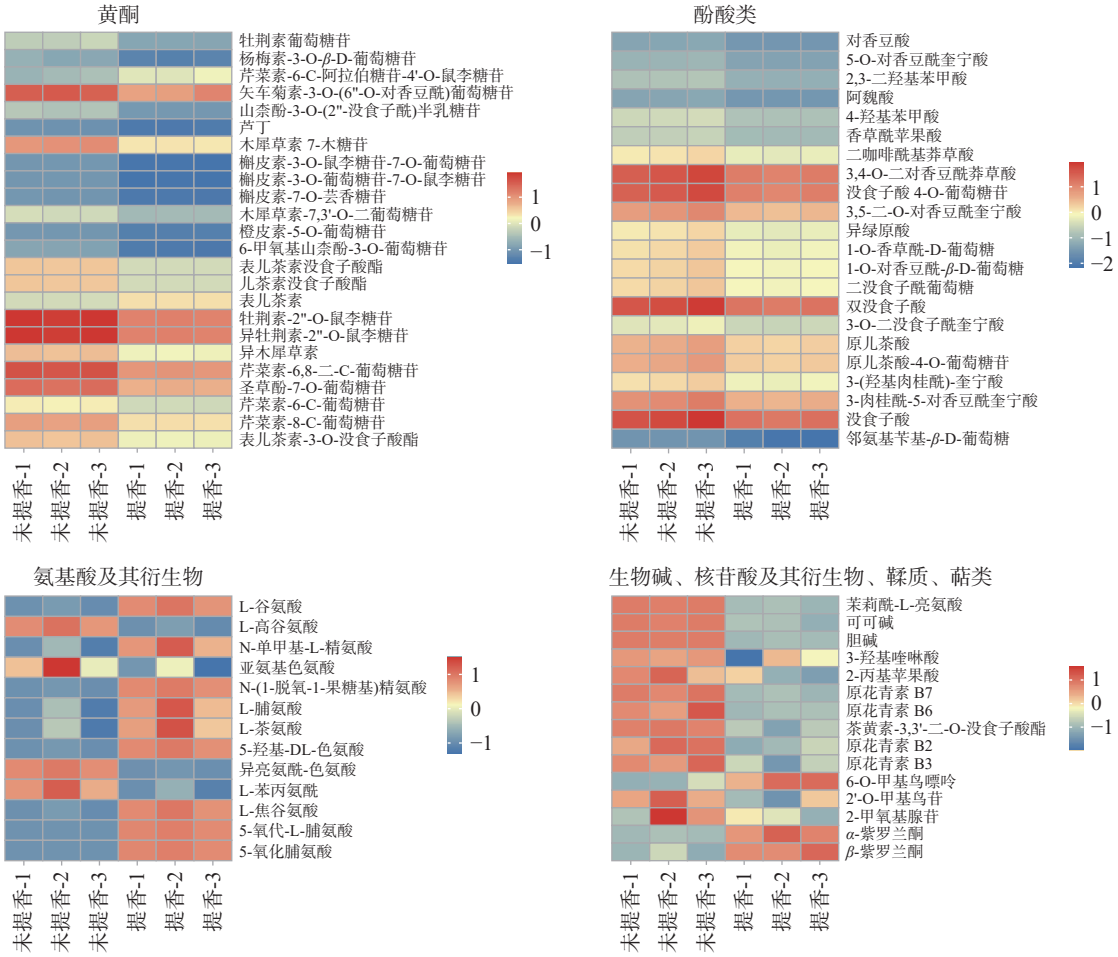


图 6　不同工艺制得川红工夫红茶中关键差异代谢物相对含量变化热图

Fig.6　Heat-map of the contents of key differential metabolites in Sichuan Congou black teas treated by different processes

(0.00115~19.80 μmol/L)而被认为是茶汤苦涩味的重要成分，而且能增强汤中咖啡因的苦味特征[28−30]。提香后，川红工夫中的牡荆素葡萄糖苷、杨梅素-3-O-β-D-葡萄糖苷、芦丁、木犀草素 7-木糖苷、槲皮素-7-O-芸香糖苷、表儿茶素没食子酸酯、表儿茶素-3-O-没食子酸酯和山柰酚-3-O-(2"-没食子酰)半乳糖苷等 22 种黄酮类化合物的相对含量显著降低(P<0.05)，可能是因为在提香过程中，黄酮苷类物质的热不稳定性，导致糖苷键发生断裂[28,31]。酚酸也是茶汤中具有涩味和酸味的化合物，因为它们具有高度的水溶性[29,32−33]。本研究发现，包括对香豆酸、阿魏酸、原儿茶酸和没食子酸，以及多种酚酸葡萄糖苷的相对含量在提香后显著降低(P<0.05)，与 QDA 发现提香后川红工夫中的酸味降低相对应。

氨基酸是与茶叶品质呈正相关的代谢物，也是红茶茶汤鲜味和甜味的重要来源[29,32]。此外，前人研究发现，优质绿茶鲜味高低的关键在于谷氨酸、天冬氨酸和茶氨酸等呈鲜味氨基酸的含量[34]。如图 6 所示，提香后川红工夫中 L-谷氨酸和 L-茶氨酸的相对含量显著升高(P<0.05)，而一些差异的氨基酸及其衍生物(亚氨基色氨酸、异亮氨酰-色氨酸、L-苯丙氨酰、L-高谷氨酸)的相对含量在提香后显著降低(P<0.05)。在茶叶生产加工过程中，蛋白质降解产生了游离氨基酸，同时游离氨基酸发生了氧化降解[35]，推测不同氨基酸化合物的变化差异与提香时氨基酸积累和消耗速率的不同有关。

茶叶中的生物碱主要包括咖啡碱、茶叶碱和可可碱，以咖啡碱的含量最高，与茶汤的苦味密切相关[33]。本研究发现，提香后 4 种生物碱的相对含量显著降低(P<0.05)，表明提香可以在一定程度上降低川红工夫的苦味，对改善品质有促进作用。有机酸是茶汤酸味的贡献者，其对茶汤甜醇滋味有抑制作用[29,36]。本研究发现 2-丙基苹果酸在提香后的相对含量显著降低(P<0.05)，有利于川红工夫茶汤滋味品质的形成。原花青素已被确认为是一类会造成茶汤具有苦涩和收敛口感的代谢产物[28]，提香后原花青素 B2、原花青素 B3、原花青素 B6 和原花青素 B7 的相对含量均呈不同程度降低。此外，α-紫罗兰酮和 β-紫罗兰酮是两种具有花香特性的芳香物质[3,16]。提香后，两者的相对含量均显著升高(P<0.05)。

2.4　关键差异代谢物与感官特性的相关分析

茶叶的风味品质源于多种代谢物化合物之间复杂的相互作用。为进一步探究提香后川红工夫中香气和滋味特征与差异代谢物之间的相关性，根据前人研究结果，分别对 19 种香气物质和 24 种滋味物质与 QDA 的 Pearson 相关性进行分析，结果如图 7 所

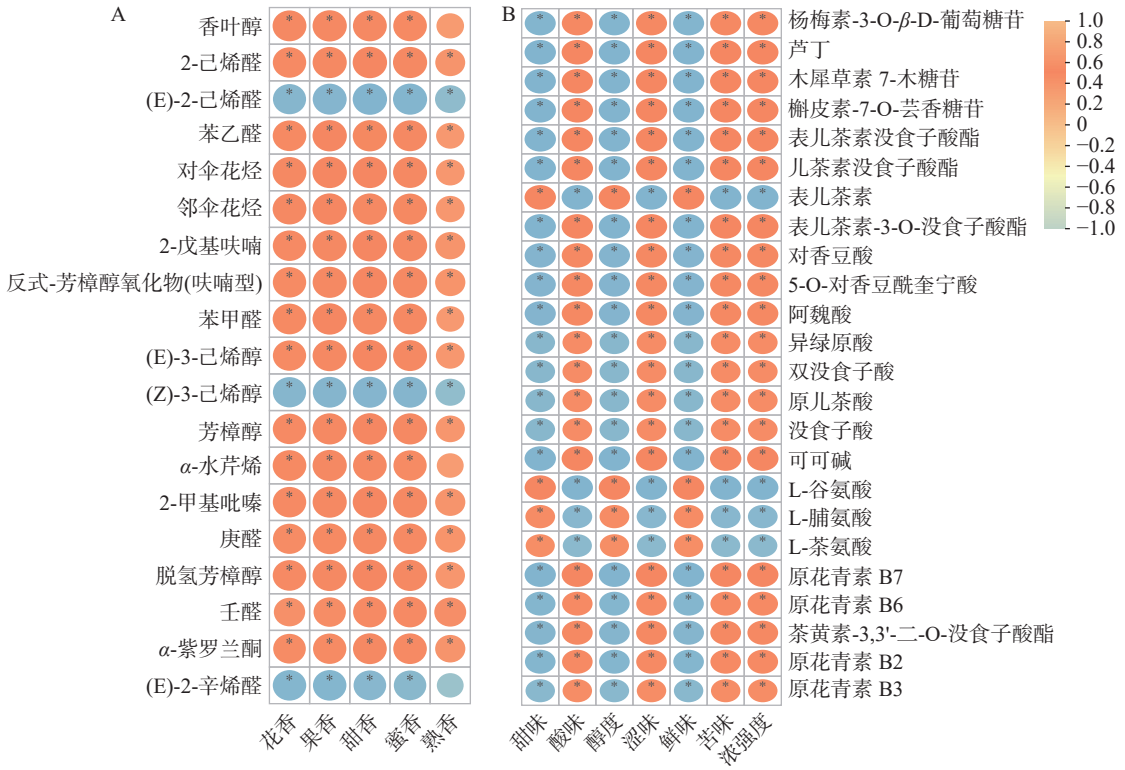


图 7　川红工夫中关键差异代谢物与感官指标的相关性矩阵分析

Fig.7　Correlation matrix analysis between key differential metabolites and sensory indicators of Sichuan Congou black tea

注：图中红色表示正相关，蓝色表示负相关，“*”表示显著相关（$P<0.05$）。

示。由图 7A 可知，邻伞花烃、香叶醇、苯乙醛、对伞花烃、反式-芳樟醇氧化物（呋喃型）、芳樟醇、α-水芹烯、庚醛、脱氢芳樟醇和 α-紫罗兰酮均与花香呈显著正相关（$P<0.05$），研究发现，上述物质均能够在一定程度上提高祁门红茶和信阳红茶的花香品质[17,27]。香叶醇、苯乙醛、对伞花烃、邻伞花烃、脱氢芳樟醇、壬醛和 α-水芹烯参与形成了果香，这些物质大都被报道为花香和果香，推测可能是因为香气物质的相互作用参与了川红工夫香气的形成[3]。（E）-2-己烯醛、（Z）-3-己烯醇和（E）-2-辛烯醛与香气物质呈负相关。此外，香叶醇和 α-水芹烯与熟香呈正相关，但相关性不显著（$P>0.05$）。通过上述分析可以发现，同一个香气物质会与多种香气属性存在相关性，说明工夫红茶香气品质特征不仅取决于香气成分的种类和含量，还和香气物质间的相互作用密切相关[18]。

甜味是工夫红茶滋味最典型的特征，由图 7B 可知，除表儿茶素、L-谷氨酸、L-脯氨酸和 L-茶氨酸与甜味呈显著正相关外，其余物质均与甜味呈显著负相关，与苦味和涩味呈显著正相关（$P<0.05$）。表儿茶素对茶汤的回甘生津具有促进作用[32]。已有研究表明杨梅素-3-O-β-D-葡萄糖苷、芦丁、木犀草素 7-木糖苷、槲皮素-7-O-芸香糖苷等黄酮及其糖苷类物质由于其具有较低的阈值而对茶汤的苦味具有增强作用[18]。而表儿茶素没食子酸酯、儿茶素没食子酸酯、表儿茶素-3-O-没食子酸酯等酯型儿茶素，原花青素 B2、原花青素 B7 等花青素类以及原儿茶酸和没食子酸等酚酸类与苦味和涩味呈显著正相关（$P<0.05$），且提香后相对含量降低，可能是造成提香后川红工夫苦涩味降低的原因[18,32]。酸味与对香豆酸、5-O-对香豆酰奎宁酸和阿魏酸呈显著正相关（$P<0.05$），其在未提香红茶中的相对含量较高。浓强度是红茶滋味对口腔刺激程度的表现形式之一，与苦味和滋味直接相关，分析发现其与代谢物的相关性与苦味和涩味相一致。醇度与表儿茶素、L-谷氨酸、L-脯氨酸和 L-茶氨酸呈显著正相关（$P<0.05$）。此外，一种感官特性与多种代谢物存在显著相关性，而且同一种物质与多种香气和滋味特性也同样存在显著相关性。可能是因为代谢物具有协同或拮抗效应，共同决定了川红工夫的品质特征。总之，上述 19 种香气物质和 24 种滋味物质是造成提香后川红工夫品质提高的重要原因，而这些代谢物的相互作对川红工夫风味形成的影响还需进一步开展研究。

3　结论

本研究通过 QDA、代谢物学技术，结合多元统计分析比较了提香对川红工夫感官品质以及代谢物的影响。结果表明，提香处理提高了川红工夫的甜香、果香、蜜香、花香，以及甜味和鲜味品质，而降低了浓强度、苦味和涩味。提香后共筛选得到 13 类 139 种差异香气化合物，进一步通过 OAV 分析，得到香叶醇、（E）-2-癸醛、（Z）-癸-2-烯醛、苯乙醛、壬醛、（E）-2-壬烯醛、邻伞花烃、（Z）-6-壬烯醛、2-戊基呋喃和庚醛等 34 种 OAV>1 的关键香气物质。提香主要增加了香叶醇、苯乙醛、邻伞花烃、2-戊基呋喃等具有花果香物质的相对含量，降低了具有青草气

的 2-己烯醛、(E)-2-癸醛、(Z)-3-己烯醇和(E)-2-辛烯醛等香气物质的相对含量。此外，提香对黄酮、酚酸类、氨基酸及其衍生物、鞣质和生物碱等具有苦涩味和鲜爽味的滋味成分影响较大。主要是使具有涩味的牡荆素葡萄糖苷、杨梅素-3-O-β-D-葡萄糖苷、芦丁、木犀草素 7-木糖苷、槲皮素-7-O-芸香糖苷、表儿茶素没食子酸酯和原花青素，苦味的可可碱、胆碱，涩味和酸味的对香豆酸、阿魏酸、原儿茶酸、没食子酸和 2-丙基苹果酸的相对含量显著降低，而提高了具有鲜味特征的 L-谷氨酸和 L-茶氨酸等相对含量。综上，提香提高了川红工夫的感官品质，研究结果可为川红工夫品质提升和精准化加工提供理论指导。相关性分析发现代谢物之间存在明显的相互作用，未来需要更多研究来确认这些物质对茶叶感官品质的影响。

© 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] BAHORUN T, LUXIMON-RAMMA A, GUNNESS T K, et al. Black tea reduces uric acid and C-reactive protein levels in humans susceptible to cardiovascular diseases[J]. Toxicology, 2010, 278(1): 68−74.

[2] ZHANG H, QI R L, MINE Y. The impact of oolong and black tea polyphenols on human health[J]. Food Bioscience, 2019, 29: 55−61.

[3] JIANG Bin, YANG Liran, LUO Xueping, et al. Aroma formation and dynamic changes during Sichuan black tea processing by GC-MS-based metabolomics[J]. Fermentation, 2023, 9(7): 686.

[4] MA Jinqing, WANG Yujie, LI Junyao, et al. Aroma formation mechanism by the drying step during Congou black tea processing: Analyses by HP-SPME and SAFE with GC-MS[J]. LWT, 2024, 198: 116019.

[5] HUA Jinjie, OUYANG Wen, ZHU Xizhe, et al. Objective quantification technique and widely targeted metabolomic reveal the effect of drying temperature on sensory attributes and related non-volatile metabolites of black tea[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138154.

[6] 刘飞, 王嘉, 黄藩, 等. 四川工夫红茶品质分析及风味轮的构建[J]. 西南农业学报, 2021, 34(5): 1001−1007. [LIU Fei, WANG Jia, HUANG Fan, et al. Quality analysis and flavor wheel establishment of Sichuan congou black tea[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(5): 1001−1007.]

[7] 张翔, 王聪明, 聂枞宁, 等. 川红和祁红香气特征分析及成分比较[J]. 热带作物学报, 2020, 41(7): 1440−1449. [ZHANG Xiang, WANG Congming, NIE Zongning, et al. Comparison of volatile components and aroma characterization in Sichuan black tea and Qimen black tea[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(7): 1440−1449.]

[8] ZHOU H C, XU Y J, WU Q, et al. Identification and comparison of nonvolatile profiles of the four Keemun black tea types[J]. Beverage Plant Research, 2024, 4: e036.

[9] LI Yuchuan, HE Chang, YU Xinlei, et al. Study on improving aroma quality of summer-autumn black tea by red-light irradiation during withering[J]. LWT, 2022, 154: 112597.

[10] FANG Xin, LIU Yanan, XIAO Jingyi, et al. GC-MS and LC-MS/MS metabolomics revealed dynamic changes of volatile and non-volatile compounds during withering process of black tea[J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135396.

[11] 杨彩霞, 王瑶, 汪艳蛟, 等. 不同烘焙条件下成品滇红茶香气及化学成分的变化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(9): 242−251. [YANG Caixia, WANG Yao, WANG Yanjiao, et al. Changes in aromatic and functional components of finished Yunnan black tea roasted under different conditions[J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(9): 242−251.]

[12] QIU F F, ZENG W C, QU F F. Effect of aroma enhancement methods on the quality of Congou black tea[J]. Food Science, 2019, 40(11): 82−87.

[13] GUO X Y, HO C T, WAN X C, et al. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128230.

[14] ZENG L, JIN S, FU Y Q, et al. A targeted and untargeted metabolomics analysis of 'Oriental Beauty' oolong tea during processing[J]. Beverage Plant Research, 2022, 2(1): 1−10.

[15] FENG W Z, ZHOU H, XION Z C, et al. Exploring the effect of different tea varieties on the quality of Lu'an Guapian tea based on metabolomics and molecular sensory[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101534.

[16] YUE Chuan, CAO Hongli, ZHANG Shaorong, et al. Aroma characteristics of Wuyi rock tea prepared from 16 different tea plant varieties[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100586.

[17] HOU Zhiwei, WANG Yujie, XU Shanshan, et al. Effects of dynamic and static withering technology on volatile and nonvolatile components of Keemun black tea using GC-MS and HPLC combined with chemometrics[J]. LWT, 2020, 130: 109547.

[18] YANG Liran, LUO Xueping, WANG Qi, et al. Exploring the effect of different tea varieties on the quality of Sichuan Congou black tea based on metabolomic analysis and sensory science[J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 12: 1587413.

[19] JIANG Bin, LUO Xueping, YAN Jingna, et al. Investigation of the effect of fragrance-enhancing temperature on the taste and aroma of black tea from the cultivar *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze cv. Huangjinya using metabolomics and sensory histology techniques[J]. Fermentation, 2024, 10(10): 520.

[20] 杨丽冉, 闫敬娜, 罗学平, 等. 不同提香时间对黄金芽红茶品质的影响研究[J]. 湖南农业科学, 2025(1): 71−76. [YANG Liran, YAN Jingna, LUO Xueping, et al. Effect of fragrance enhancing time on the quality of black tea from *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze cv. 'Huangjinya'[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2025(1): 71−76.]

[21] 蒋宾, 罗学平, 刘琨毅, 等. 不同产地工夫红茶风味品质比较研究[J]. 食品科技, 2024, 49(11): 56−65. [JIANG Bin, LUO Xueping, LIU Kunyi, et al. Analysis of the quality differences of congou black tea from different origin[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(11): 56−65.]

[22] 林洁鑫, 颜廷宇, 邵淑贤, 等. 基于 UPLC-MS/MS 的不同产地金观音红茶代谢组学分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 162−168. [LIN Jiexin, YAN Tingyu, SHAO Shuxian, et al. Metabolomic analysis of Jinguanyin black tea from different origins based on UPLC-MS/MS[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(15): 162−168.]

[23] HO C T, ZHENG X, LI S M. Tea aroma formation[J]. Food Science and Human Wellness, 2015, 4(1): 9−27.

［24］ 刘素强, 杨娟, 袁林颖, 等. 烘焙提香条件对红茶感官品质及主要生化成分的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(4): 1301−1306. ［LIU Suqiang, YANG Juan, YUAN Linying, et al. Effect of baking and aroma-improving conditions on the black tea sensory quality and major biochemical components[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2015, 6(4): 1301−1306.］

［25］ 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.］

［26］ YANG Yanqin, CHEN Jiayu, JIANG Yongwen, et al. Aroma dynamic characteristics during the drying process of green tea by gas phase electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. LWT, 2022, 154: 112691.

［27］ YAO Hengbin, SU Hui, MA Jingyi, et al. Widely targeted volatileomics analysis reveals the typical aroma formation of Xinyang black tea during fermentation[J]. Food Research International, 2023, 164: 112387.

［28］ SHAN X, DENG Y, NIU L, et al. The influence of fixation temperature on Longjing tea taste profile and the underlying non-volatile mmetabolites changes unraveled by combined analyses of metabolomics and e-tongue[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115560.

［29］ 吴仕敏, 余勤艳, 朱佳依, 等. 基于电子舌和代谢组学分析揉捻转速对工夫红茶品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 301−310. ［WU Shimin, YU Qinyan, ZHU Jiayi, et al. Analysis of the effect of rolling speed on the congou black tea quality using electronic tongue and metabolomics[J]. Food Science, 2023, 44(6): 301−310.］

［30］ WANG Huajie, HUA Jinjie, YU Qinyan, et al. Widely targeted metabolomic analysis reveals dynamic changes in non-volatile and volatile metabolites during green tea processing[J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130131.

［31］ LIU Fei, TU Zheng, CHEN Lin, et al. Analysis of metabolites in green tea during the roasting process using non-targeted metabolomics[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(1): 213−220.

［32］ ZHANG L, CAO Q Q, GRANATO D, et al. Association between chemistry and taste of tea: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101: 139−149.

［33］ YE Jianhui, YE Ying, YIN Junfeng, et al. Bitterness and astringency of tea leaves and products: Formation mechanism and reducing strategies[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 130−143.

［34］ XUE Jinjin, LIU Panpan, GUO Guiyi, et al. Profiling of dynamic changes in non-volatile metabolites of Shaken black tea during the manufacturing process using targeted and non-targeted metabolomics analysis[J]. LWT, 2022, 156: 113010.

［35］ ZHAI X T, ZHANG L, GRANVOGL M, et al. Flavor of tea (*Camellia sinensis*): A review on odorants and analytical techniques[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(5): 3867−3909.

［36］ YU Fei, CHEN Cong, CHEN Shuna, et al. Dynamic changes and mechanisms of organic acids during black tea manufacturing process[J]. Food Control, 2022, 132: 108535.