杨丽冉, 蒋宾, 成洲, 等. 基于代谢组学比较不同干燥方式下川红工夫茶的滋味差异 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 45−54. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025120025

YANG Liran, JIANG Bin, CHENG Zhou, et al. Comparison of Taste Differences in Sichuan Gongou Black Tea Prepared with Different Drying Methods Using Metabolomics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 45−54. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025120025

·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）·

基于代谢组学比较不同干燥方式下川红工夫茶的滋味差异

杨丽冉[1], 蒋　宾[1,*], 成　洲[1], 罗学平[1], 焦文文[1], 彭康丽[1], 刘明丽[2], 闫敬娜[1,*]
（1.宜宾职业技术学院现代农业学院, 四川 宜宾 644003;
2.宜宾市茶产业研究院, 四川 宜宾 644100）

摘　要: 为了比较干燥方式对川红工夫茶滋味的影响，基于定量描述分析、高效液相色谱法和超高效液相色谱-质谱法，结合多元统计分析热风干燥的金曲、理条机干燥的金针和双锅曲毫机干燥的香螺川红工夫茶滋味差异。结果表明：金曲滋味的甜度和鲜爽度更高，感官得分为 91.96 分；而香螺的茶汤偏暗，苦涩味和酸味较高，得分最低，仅为 88.97 分。金针的品质介于两者之间。金曲的游离氨基酸含量为 4.34%，显著高于金针和香螺（$P<0.05$），其中茶氨酸相对含量分别是金针和香螺的 1.41 和 1.48 倍。金曲的酚氨比为 1.76，低于金针的 2.32 和香螺的 2.39。香螺的茶褐素含量为 3.24%，显著高于金针和金曲（$P<0.05$），茶黄素在金曲中最高，达 0.26%。香螺中的儿茶素总量分别比金曲和金针高 30.34% 和 4.83%。代谢组学和相关性分析表明，金曲中的 L-天冬酰胺、L-茶氨酸和 L-谷氨酸等氨基酸的相对含量较高，增加了茶汤的鲜爽味。而香螺中酯型儿茶素和黄酮类化合物的高保留率和较低氨基酸含量提高了其苦涩味、降低了鲜爽度，同时苹果酸和富马酸也增强了香螺茶汤的酸度。综上，热风干燥制成的金曲滋味品质高于其他两种红茶。该研究结果为川红工夫茶工艺优化和品质提高提供了理论依据。

关键词: 川红工夫茶, 干燥方式, 滋味品质, 代谢组学, 多元统计分析
中图分类号: TS272.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0045−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025120025
本文网刊:

Comparison of Taste Differences in Sichuan Gongou Black Tea Prepared with Different Drying Methods Using Metabolomics

YANG Liran[1], JIANG Bin[1,*], CHENG Zhou[1], LUO Xueping[1], JIAO Wenwen[1], PENG Kangli[1], LIU Mingli[2], YAN Jingna[1,*]
（1.College of Modern Agriculture, Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China;
2.Research Institute of Tea Industry of Yibin, Yibin 644100, China）

Abstract: To compare the effects of drying methods on the taste of Sichuan Congou black tea. In this study, quantitative descriptive analysis, high-performance liquid chromatography, and ultra-high-performance liquid chromatography-mass spectrometry combined with multivariate statistical analysis were employed to investigate taste differences among teas produced using different drying methods: Jinqu (hot-air drying), Jinzhen (carding machine drying), and Xiangluo (double-pan roasting drying). Results indicated that Jinqu exhibited a sweeter, fresher taste and achieved the highest sensory score (91.96). In contrast, Xiangluo had a darker liquor, higher bitterness and sourness, and the lowest sensory score (88.97).

收稿日期: 2025−12−03
基金项目: 宜宾市科技项目（2025MZ031）; 宜宾职业技术学院科研项目（24ZRZD-11）。
作者简介: 杨丽冉（1996−）女, 硕士, 讲师, 研究方向: 茶叶加工与综合利用研究, 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。
闫敬娜（1990−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 茶叶功能成分化学与综合利用研究, E-mail: yan1202na@163.com。

Jinzhen displayed intermediate sensory characteristics. The free amino acid content of Jinqu (4.34%) was significantly higher than that of Jinzhen and Xiangluo (P<0.05), with its theanine content being 1.41 and 1.48 times higher, respectively. Additionally, the phenol-to-amino ratio in Jinqu (1.76) was lower than that in Jinzhen (2.32) and Xiangluo (2.39). The theabrownin content of Xiangluo (3.24%) was significantly higher than that of Jinzhen and Jinqu (P<0.05), whereas Jinqu had the highest theaflavin (0.26%). The total catechin content in Xiangluo exceeded that of Jinqu and Jinzhen by 30.34% and 4.83%, respectively. Metabolomics and Pearson correlation analyses showed that elevated relative contents of amino acids (L-asparagine, L-theanine, and L-glutamic acid) in Jinqu notably enhanced its freshness. In contrast, Xiangluo contained higher levels of ester catechins and flavonoids but lower amino acids, thus increasing bitterness and reducing freshness. Moreover, malic and fumaric acids contributed to increased acidity in Xiangluo tea liquor. In conclusion, Jinqu tea produced by hot-air drying exhibited superior flavor quality compared with teas produced by the other two drying methods. These findings provide a theoretical basis for optimizing processing techniques and enhancing Sichuan Congou black tea quality.

Key words: Sichuan Congou black tea; drying methods; taste quality; metabolomics; multivariate statistical analysis

茶是一种采摘于茶树新梢，按照特定工艺加工制成的无酒精饮料[1−2]。因含有茶多酚、氨基酸、咖啡碱、茶多糖和微量元素等多种成分，使茶具有抗氧化、降血脂、降血糖和预防心血管疾病等诸多功效[3−5]。在中国，根据加工工艺的不同，茶叶被分成绿茶、黄茶、黑茶、白茶、红茶和乌龙茶，又根据发酵程度的不同，将茶叶分为不发酵茶、轻微发酵茶、半发酵茶和全发酵茶，红茶属于全发酵茶[6−7]。中国茶叶流通协会统计发现，截至 2024 年底，红茶产量占中国茶叶总产量的 14.58%，占国际茶叶贸易量的 80% 左右[8−9]。

适宜的生长环境促使四川红茶成为中国三大高香红茶之一[10]。川红工夫茶以其独特的风味、浓郁的香气和深厚的文化底蕴，在国内外茶叶市场中享有盛誉[11]。红茶的质量评价指标包括外形、汤色、香气、滋味和叶底，其中，滋味占红茶感官品质的 30%，与非挥发性代谢物的含量和组成直接相关[11]。咖啡碱、游离氨基酸、儿茶素、黄酮及其衍生物等与红茶滋味和色泽密切相关[12−13]。这些化合物直接或间接地影响红茶的酸味、苦味、涩味、甜味、醇度和鲜爽味[1]。

红茶的品质不仅依赖于原料和产地环境的优劣，更与加工工艺密切相关[7]。萎凋通过控制水分蒸发和酶的活性，影响茶叶中多酚类、多糖和蛋白质等物质的氧化降解[14]；揉捻破坏细胞结构，促进茶汁的释放和酶与底物的接触，进而影响发酵过程[15]；发酵是红茶加工的关键环节，决定了红茶的色泽、香气和滋味[16]；而干燥是红茶生产中的重要工序，对挥发性和非挥发性代谢物的形成和积累有着显著影响[17]。Liu 等[12] 研究发现，组合热风和烘焙干燥提高了红茶中表没食子儿茶素、茶黄素以及鲜爽味和甜味氨基酸的含量，而降低了酯型儿茶素、咖啡碱、黄酮及其糖苷的含量。Lan 等[18] 研究表明热风干燥提高了祁门红茶的甜香和花果香，降低了青草气，提高了红茶的品质。鲁倩等[19] 研究发现采用理条机等炒干方式的滇红茶具有明显的焦糖香，但品质低于晒干和烘干。而 Xu 等[20] 比较了四种干燥方式加工形成的祁门红茶品质差异，发现采用双锅曲毫机加工形成的香螺外形乌黑油润，较热风和理条机干燥体积明显减小，节约了包装成本。此外，产地是影响红茶品质高低的关键因素之一，以往研究得出的结论不一定适用于川红工夫茶。

近年来，消费者对高品质红茶的需求不断增加，制茶技术亟需创新和优化。随着分析技术的不断进步，利用现代分析方法对茶叶中的滋味物质进行全面分析，已成为研究茶叶品质的重要手段。本研究结合感官评价、分光光度法、高效液相色谱法（High performance liquid chromatography，HPLC）和基于超高效液相色谱串联质谱（Ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry，UPLC-MS/MS）的广泛靶向代谢组学技术，首次系统比较了川红工夫茶在三种工业化常用干燥设备（热风烘焙机、理条机、双锅曲毫机）下的滋味和代谢物差异，为川红工夫茶干燥方式选择和品质提升提供参考。

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 4 月购自宜宾市江安竹都茶叶有限公司；没食子酸、儿茶素、黄酮、咖啡碱等标准品（纯度≥99%）　成都曼思特生物科技有限公司；氨基酸标准品（纯度≥99%）　美国安捷伦公司；甲醇、乙腈　色谱级，赛默飞世尔科技（中国）有限公司；其他试剂均为国产分析纯。

756CRT 型紫外可见分光光度计　上海菁华科技仪器有限公司；101A-2 电热鼓风恒温干燥箱　上海市崇明实验仪器厂；YX-6CHZ-6C 茶叶烘焙机、YX-6CCGQ-50 茶叶双锅曲毫机　安溪永兴机械有限公司；6CL-1580 茶叶多功能理条机　松阳县振跃茶叶机械有限公司；LC-16 型高效液相色谱仪　岛津仪器（苏州）有限公司；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；MU-G02-0448 恒温金属混匀仪　杭州米欧仪器有限公司；Biomek

i5 自动化工作站　贝克曼库尔特有限公司；6945D LC/TQ UPLC-MS/MS 仪　美国安捷伦公司；Hypersil BDS C18 色谱柱　大连依利特分析仪器有限公司；Agela AA952505-0 venusil AA 色谱柱　天津博纳艾杰尔科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　川红工夫茶制备　鲜叶在 25~28 ℃ 下室内自然萎凋 22 h，采用轻压 10 min，重压 25 min，轻压 10 min 的方式进行揉捻，将揉捻叶置于 30 ℃，相对湿度为 95% 的发酵箱内发酵 4.5 h，其间每隔 1.5 h 翻拌一次，发酵完成时叶色为黄红色。发酵叶在 100 ℃ 茶叶烘焙机上边烘边搓团做形至九成干后摊凉 2 h，再用 80 ℃ 茶叶提香机提香 1.5 h，最后通过筛分、分选、拣剔等精制后得到金曲川红工夫茶。发酵叶在 215 ℃ 的茶叶多功能理条机上干燥 35 min 至九成干后摊凉 2 h，80 ℃ 提香 1.5 h 后精制得到金针川红工夫茶。发酵叶在 185 ℃ 的茶叶双锅曲毫机上干燥 35 min 至九成干后摊凉 2 h，80 ℃ 提香 1.5 h 后精制得到香螺川红工夫茶。

1.2.2　感官品质定量描述分析　茶叶感官品质及定量描述分析（quantitative description analysis，QDA）由 7 名年龄在 28~40 岁（3 名男性，4 名女性）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，参照国家标准 GB/T 23776-2018《茶叶感官审评方法》开展感官审评，以 6 名审评人员评分的平均分作为最终得分。根据课题组建立的方法对川红工夫茶的滋味进行评价，并且采用甜味、鲜爽味、苦味、涩味和酸味来描述滋味特征[21−22]，具体评价方法如表 1 所示。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滋味强度特征。每个茶样进行 3 次评分，每次评分间隔 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。

表 1　川红工夫茶感官审评表

Table 1　Sensory evaluation form for Sichuan Congou black tea

感官属性	参考物质	评分依据
甜味	葡萄糖	从0到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
鲜味	茶氨酸	
苦味	咖啡碱	
涩味	芦丁	
酸味	柠檬酸	

1.2.3　常规成分测定　根据 GB/T 8313-2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》测定茶多酚含量；根据 GB/T 8314-2013《茶 游离氨基酸总量的测定》测定游离氨基酸含量；根据 GB/T 8305-2013 测定茶叶水浸出物含量。

采用 HPLC 测定儿茶素、咖啡碱含量和氨基酸组分含量，儿茶素和咖啡碱的分析条件为：Hypersil BDS C_{18} 色谱柱（150 mm×4.6 mm，3 μm），流动相 A 为 0.261% 磷酸，5% 乙腈（V∶V）；流动相 B 为 0.261% 磷酸，80% 甲醇；检测波长：278、370 nm，柱温 43 ℃。氨基酸分析条件为：Agela AA952505-0 venusil AA 色谱柱（250 mm×4.6 mm，5 μm），流动相 A 为 0.016 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH8.2），流动相 B 为甲醇-乙腈-水溶液（4.5∶4.5∶1，V∶V∶V），洗脱梯度与课题组前期建立的方法相一致[23−24]。

1.2.4　非挥发性代谢物检测　将川红工夫茶样品用真空冷冻干燥机冷冻干燥 63 h 后用研磨仪研磨至粉末状，准确称取 0.05 g 磨碎样品于 2 mL 离心管中，加入 1200 μL 经−20 ℃ 预冷的浓度为 250 μg/mL 的内标提取液，每 30 min 涡旋提取 30 s，重复 6 次。12000 r/min 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考前人方法进行[23,25]。

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；0~9 min，95%~5% A；9~10 min，5% A；10~11 min，5%~95% A；11~14 min，95% A。

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 psi 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 26.0 软件进行差异显著性分析，采用 SIMCA 14.1 软件进行主成分分析（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）和层次聚类分析（Hierarchical clustering analysis，HCA），根据 OPLS-DA 模型获得变量重要性投影（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。采用迈维代谢在线云工具进行相关性网络图分析。

2　结果与分析

2.1　不同干燥方式川红工夫茶的感官品质差异

根据国家标准和审评小组制定的评价方法和程序，对不同干燥方式下川红工夫茶的感官品质进行分析，结果如表 2 和图 1 所示。由表 2 可知，3 种工艺川红工夫茶的感官审评得分由高到低为金曲

表 2 不同干燥方式川红工夫茶的感官审评结果

Table 2 Sensory evaluation results of Sichuan Congou black tea samples based on different drying methods

茶样	外形		汤色		香气		滋味		叶底		总评分
	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	评语	得分	
金曲	条索卷紧, 乌润, 金毫显	92.31±0.34^{a}	红亮	91.26±0.27^{a}	甜香浓郁, 持久	91.68±0.18^{a}	鲜、甜醇	92.36±0.42^{a}	红匀, 柔软	91.32±0.22^{a}	91.96±0.54^{a}
金针	挺直, 乌较润, 有金毫	88.26±0.19^{c}	红亮	90.42±0.39^{a}	焦糖香显, 持久	89.96±0.23^{a}	甜醇	91.88±0.25^{a}	红匀, 柔软	90.38±0.29^{a}	90.20±0.41^{a}
香螺	卷曲如螺, 乌润有金毫	90.24±0.26^{b}	红, 较亮	87.56±0.45^{b}	焦糖香、带酸气, 较持久	88.63±0.36^{b}	较甜醇、稍酸	88.82±0.41^{b}	红匀, 稍暗, 柔软	88.49±0.44^{b}	88.97±0.37^{b}

注: 同列不同小写字母代表差异显著(P<0.05), 相同代表差异不显著(P>0.05); 表3同。

(91.96)>金针(90.20)>香螺(88.97)。干燥方法对川红工夫茶感官品质的影响主要体现在滋味和香气上, 热风干燥制成的金曲香气甜香浓郁, 金针的香气为焦糖香显, 而香螺香气表现为焦糖香、带酸气。滋味方面, 金曲为鲜、甜醇, 金针为甜醇, 而香螺为较甜醇、稍酸。此外, 金曲的滋味得分最高, 为 92.36, 高于金针的 91.88 分和香螺的 88.82 分。此外, 金曲和金针的叶底红匀, 汤色红亮, 而香螺的叶底和汤色均偏暗(图 1A)。造成上述结果的原因可能是烘干的干燥速率快, 有利于甜香物质的形成, 理条机干燥时茶叶与槽壁长时间接触, 这种热传导方式促进了美拉德反应的进行, 而双锅曲毫机的通风效果差, 长时间的高湿高热条件下, 促进果胶酸等有机酸物质的形成, 使红茶呈现出酸馊气, 与前人研究结果相一致[19]。

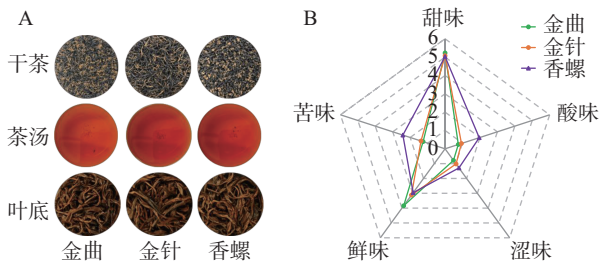


图 1 不同干燥方式川红工夫茶感官审评差异

Fig.1 Difference of sensory evaluation of Sichuan Congou black tea samples based on different drying methods

注: A. 干茶、茶汤和叶底差异; B. QDA 分析结果。

干燥方式对茶汤的滋味有显著影响, 为了弥补传统感官审评中由于人为因素带来的误差, 根据课题组前期建立的 QDA 分析方法, 采用甜味、鲜爽味、苦味、涩味和酸味对不同干燥方式川红工夫茶的滋味品质进一步分析, 结果如图 1B 所示。虽然 3 种干燥方式样品的涩味和甜味相似, 但它们的苦味、鲜味和酸味却有显著差异。金曲的茶汤最突出的味觉是甜味和鲜爽味, 金针最突出的味觉是甜味和微涩味, 而香螺最突出的味觉是甜味和微涩味, 同时伴有酸味。先前的研究也表明炒干红茶有强烈的苦涩味[17]。3 种干燥方式茶汤的甜味强度均超过 5, 金曲茶汤的甜味最高(5.23), 鲜味最高的是金曲(3.84), 最低的是香螺(2.96)。最高和最低的苦味分别是香螺(2.42)和金曲(1.26)。酸味最高的是香螺(1.96), 最低的是金曲(0.76)。前人研究表明采用理条机和滚筒干燥有利于保留红茶中呈苦涩味的黄酮及其糖苷和酚酸, 而热风干燥有利于氨基酸和糖的保留, 与本研究结果相一致[22−23]。

2.2 不同干燥方式常规成分差异

水浸出物是川红工夫茶中的可溶性成分, 含量高低直接影响红茶的浓度和风味。其主要由茶多酚、游离氨基酸和茶色素组成[1,22]。由表 3 可知, 香螺中的水浸出物含量为 34.34%, 显著高于其他两种红茶(P<0.05), 可能是与香螺长时间在双锅曲毫机上炒制做形增加了细胞破碎有关, 也是造成香螺醇度较高的原因。茶多酚是茶汤苦涩味和保健功效的重要贡献者[1], 其在金针中的含量最高, 达 7.67%, 但在三种茶中差异不显著(P>0.05)。游离氨基酸可以提高红茶滋味的鲜爽度, 降低苦涩味物质对口腔的刺激[1,26], 由表 3 可知, 金曲中的游离氨基酸含量达 4.34%, 显著高于其他两种红茶(P<0.05)。酚氨比是红茶茶汤鲜爽度的衡量指标之一, 酚氨比值越低, 说明茶汤越柔和、越鲜爽[22]。统计分析发现金曲中的酚氨比最低, 仅为 1.76, 与感官审评和 QDA 分析结果相一致。川红工夫茶汤颜色差异的主要原因在于其茶汤中茶黄素、茶红素和茶褐素的含量。研究认为, 较高的茶黄素和茶红素含量, 以及较低的茶褐素含量是红茶茶汤品质较高的原因[17]。本研究中, 金曲中茶黄素和茶红素含量分别为 0.26% 和 2.32%, 显著高于金针和香螺(P<0.05), 二者在香螺中的含量均最低。此外, 茶褐素是导致红茶滋味寡淡、浓强度降低和茶汤偏暗

表 3 不同干燥方式川红工夫茶常规成分差异

Table 3 Difference of normal chemical compounds of Sichuan Congou black tea samples based on different drying methods

样品	水浸出物(%)	茶多酚(%)	游离氨基酸(%)	酚氨比	茶黄素(%)	茶红素(%)	茶褐素(%)
金曲	28.83±0.06^{c}	7.62±0.29^{a}	4.34±0.04^{a}	1.76	0.26±0.01^{a}	2.32±0.08^{a}	2.19±0.01^{c}
金针	31.47±0.70^{b}	7.67±0.57^{a}	3.31±0.06^{b}	2.32	0.17±0.01^{b}	2.05±0.15^{b}	2.58±0.04^{b}
香螺	34.34±0.44^{a}	7.57±0.22^{a}	3.17±0.05^{c}	2.39	0.15±0.01^{b}	1.92±0.16^{b}	3.24±0.03^{a}

的原因，其含量与红茶品质呈负相关[22]。香螺中的茶褐素含量为 3.24%，显著高于金针和金曲（P<0.05），在金曲中的含量最低，仅为 2.19%。香螺的相对低温长时干燥未能及时钝化多酚氧化酶和过氧化物酶的活性，进一步促进了发酵过程，增加了红茶中茶褐素的生成，降低了茶汤的醇度和红亮度。因此，生产上可以适当缩短发酵时间来改善香螺的品质。

2.3　不同干燥方式儿茶素、黄酮组分和咖啡碱差异

儿茶素、黄酮类和咖啡碱是影响茶汤风味强度的关键化学成分，也是茶汤苦涩味的主要呈味物质[1,22]。由表 4 可知，本研究采用 HPLC 共检测到 8 种儿茶素单体，包括四种酯型儿茶素：儿茶素没食子酸酯（catechin gallate, CG）、表儿茶素没食子酸酯（epicatechin gallate, ECG）、没食子儿茶素没食子酸酯（gallocatechin gallate, GCG）和表没食子儿茶素没食子酸酯（epigallocatechin gallate, EGCG），以及四种非酯型儿茶素：儿茶素（catechin, C）、表儿茶素（epicatechin, EC）、没食子儿茶素（gallocatechin, GC）和表没食子儿茶素（epigallocatechin, EGC）。酯型儿茶素（如 EGCG 和 ECG）具有强烈的苦涩感，而非酯型儿茶素（如 EGC 和 EC）则苦味较轻，具有回甘的特征[17]。如图 2 所示，川红工夫茶中的非酯型儿茶素含量高于酯型儿茶素含量，且香螺的酯型和非酯型儿茶素含量最高，金曲的最低。香螺中 8 种儿茶素的含量分别比金曲和金针高 30.34% 和 4.83%。香螺中的 EGCG 含量显著高于金曲（P<0.05），达 0.67 mg/g，ECG 的含量在 3 种川红工夫茶中表现为香螺>金针>金曲。EGC 和 EC 的含量在金曲中的含量最低，含量分别为 0.11 和 0.63 mg/g。

儿茶素是一类热敏化合物，在干燥过程中会发生

表 4　不同干燥方式川红工夫茶儿茶素、咖啡碱和黄酮成分含量差异（mg/g）

Table 4　Difference of catechins, caffeine, and flavonoid compositions of Sichuan Congou black tea samples based on different drying methods (mg/g)

成分	金曲	金针	香螺
GC	1.65±0.06^{a}	1.25±0.1^{b}	1.67±0.06^{a}
EGC	0.11±0.01^{a}	0.13±0.01^{a}	0.12±0.01^{a}
C	0.92±0.06^{c}	1.46±0.12^{a}	1.25±0.01^{b}
EGCG	0.38±0.01^{c}	0.59±0.06^{b}	0.67±0.06^{a}
EC	0.63±0.01^{b}	0.67±0.06^{b}	0.75±0.01^{a}
GCG	0.21±0.06^{a}	0.13±0.01^{b}	0.04±0.00^{c}
ECG	1.38±0.01^{b}	2.21±0.06^{a}	2.50±0.01^{a}
CG	0.13±0.01^{a}	0.13±0.01^{a}	0.13±0.01^{a}
没食子酸	1.84±0.03^{c}	2.27±0.04^{a}	2.02±0.02^{b}
咖啡碱	32.96±0.16^{a}	31.46±0.92^{b}	32.63±0.41^{a}
芦丁	1.98±0.07^{b}	2.13±0.01^{a}	2.14±0.03^{a}
杨梅素	1.13±0.01^{a}	1.04±0.06^{a}	1.15±0.04^{a}
槲皮素	2.46±0.06^{c}	2.88±0.18^{b}	3.77±0.04^{a}
木犀草素	3.77±0.04^{c}	4.38±0.10^{a}	3.99±0.03^{b}

注：同行不同小写字母代表差异显著（P<0.05），相同代表差异不显著（P>0.05）。

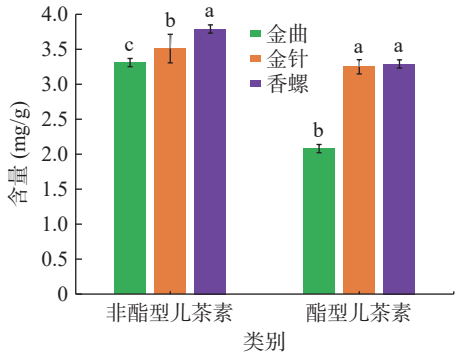


图 2　不同干燥方式川红工夫茶儿茶素组成差异

Fig.2　Differences in the composition of catechins of Sichuan Congou black tea samples based on different drying methods

注：不同小写字母代表差异显著（P<0.05），相同代表差异不显著（P>0.05）；图 3 同。

异构化、水解、聚合等复杂剧烈的化学反应，将儿茶素转化为茶黄素、茶红素和茶褐素等高分子聚合物，这些物质直接影响红茶的色泽与风味，进而影响茶叶的整体品质[17]。酯型儿茶素的降解速率受干燥温度的影响很大，高温是导致 EGCG 降解和异构化的重要因素，Lu 等[17] 通过分析不同干燥方式对滇红的儿茶素含量影响，发现儿茶素在低温环境下也会发生缓慢降解。金曲采用热风干燥，其干燥速率是 3 种红茶中最高的，因此造成了金曲中的 EGCG 含量显著低于金针和香螺，同时，由于香螺在双锅曲毫机中干燥时，茶叶堆积在一起造成内部叶温较低，使其保留了更多的 EGCG。此外，林洁鑫等[25] 和 Lu 等[17] 研究发现 ECG 在 8 种儿茶素中热稳定性最佳，当温度超过 100 ℃ 时其结构几乎不受影响，这可能是 ECG 保留量最多的原因，其在香螺工艺中的含量最高，达 2.50 mg/g，显著高于金曲的含量（P<0.05），但与金针的差异不显著（P>0.05）。没食子酸（gallic acid, GA）可以增强茶汤的收敛性[1]，其在金针中的含量最高，达 2.27 mg/g。咖啡碱是茶中主要的生物碱，具有苦味，也是影响茶叶品质的重要因素[17,22]，其在金曲中的含量最高，达 32.96 mg/g，与 Lu 等[17] 得出咖啡碱具有较高的热稳定性相一致。茶中的黄酮/黄酮醇及其苷类化合物具有较低的味觉阈值，对茶汤的收敛性具有补充作用[22]。在检测到的 4 种黄酮物质中，木犀草素的含量最高，其在金针中的含量最高，为 4.38 mg/g。此外，香螺中的黄酮总量为 11.05 mg/g，显著高于金曲（P<0.05）。上述结果与感官审评发现金曲具有鲜、甜醇的滋味特征，以及其鲜味和甜味的 QDA 得分最高相一致，而香螺由于含有最高的 EGCG 和黄酮，造成其滋味得分最低。综上所述，金曲的品质高于其他两种红茶。

2.4　不同干燥方式氨基酸组分差异

游离氨基酸是红茶的主要化学成分之一，对茶汤的鲜爽味和香气都有重要影响[17,22]。本研究共检测到 19 种氨基酸组分，根据其滋味特征可分为鲜味

(天冬氨酸、谷氨酸、天冬酰胺、谷氨酰胺和茶氨酸)、甜味(丝氨酸、甘氨酸、苏氨酸、丙氨酸、蛋氨酸和色氨酸)和苦味氨基酸(组氨酸、精氨酸、酪氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和赖氨酸)[24](图 3A)。尽管 3 种工艺中的氨基酸组分含量存在差异,但不同滋味特征氨基酸在 3 种干燥工艺川红工夫茶中的比例分布规律一致,均表现为鲜味氨基酸比例最高,其次是苦味氨基酸,甜味氨基酸的比例均小于 16%(图 3F)。由图 3B 可知,鲜味氨基酸在金曲中的含量为 22.67 mg/g,显著高于金针和香螺(P<0.05)。茶氨酸在鲜味氨基酸中的含量最高,分别占金曲、金针和香螺总含量的 60.6%、58.9%和 60.5%。由图 3C~3E 可知,甜味氨基酸和氨基酸总量与鲜爽味氨基酸表现出相同的趋势,苦味氨基酸与鲜爽味氨基酸变化趋势相反。金曲中的氨基酸总量为 33.81 mg/g,分别比金针和香螺茶叶高出 7.09%和 17.04%(图 3E)。Lu 等[17] 和 Li 等[27] 研究发现,氨基酸在高温、长时干燥过程中,通过脱氨、脱羧以及与羰基化合物的美拉德反应使其转化为吡嗪等芳香族化合物,导致其酸含量降低。而金针的干燥温度最高,香螺的干燥时间最长,造成了两者的氨基酸含量显著低于金曲(P<0.05)。上述结果同样表明金曲的品质高于金针和香螺,因为其具有更高的鲜味、甜味氨基酸和较低的苦味氨基酸[17,27]。

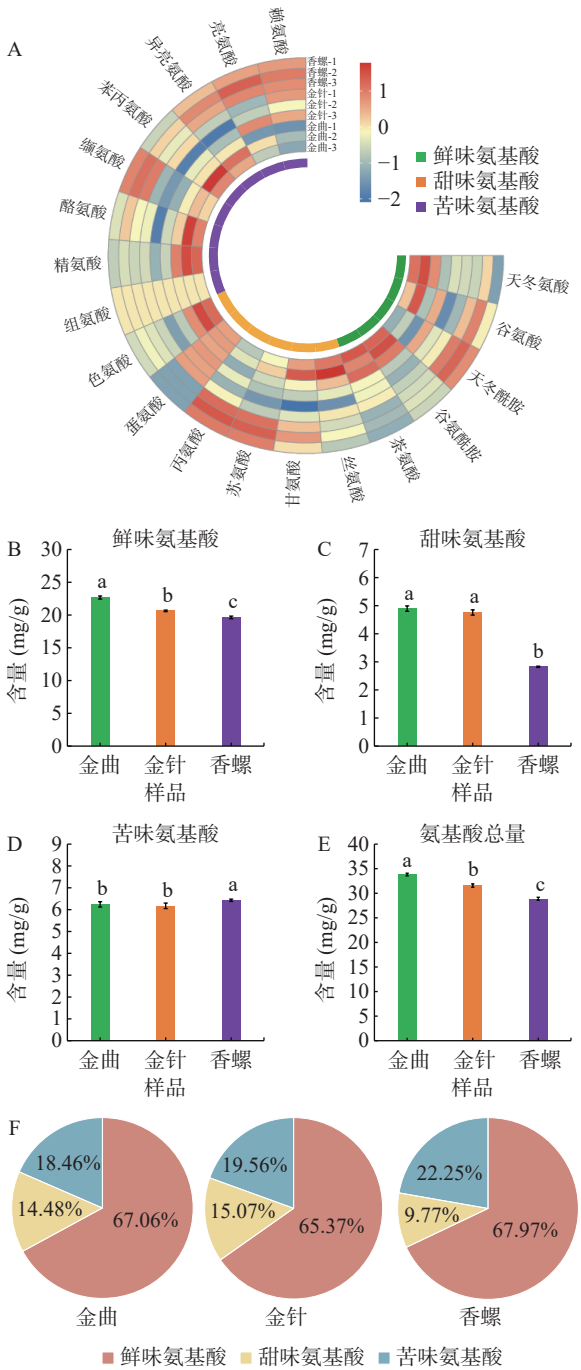


图 3　不同干燥方式川红工夫茶氨基酸组分含量差异

Fig.3　Difference of amino acid composition of Sichuan Congou black tea samples based on different drying methods

注: A 为氨基酸含量热图; B~E 为鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸、氨基酸总量柱形图; F 为氨基酸组成比例。

2.5　不同干燥方式代谢物差异分析

为了全面揭示不同干燥方式对川红工夫茶代谢物的影响,采用基于 UPLC-QTOF-MS 的广泛靶向代谢组学技术分析了 3 种干燥方式川红工夫茶的代谢产物差异。结果在川红工夫茶中共鉴定出 13 类 3937 种代谢物,如图 4A 所示,其中包括黄酮类 773 种(19.63%)、其他类 657 种(16.69%)、酚酸类 467 种(11.86%)、萜类 413 种(10.49%)、生物碱 376 种(9.55%)、氨基酸及其衍生物 361 种(9.17%)、脂质 307 种(7.80%)、木脂素和香豆素 172 种(4.37%)、有机酸 166 种(4.22%)、核苷酸及其衍生物 100 种(2.54%)、鞣质 89 种(2.26%)、醌类 39 种(0.99%)、甾体 17 种(0.43%)。由图 4B 可知,3 种干燥方式的川红工夫茶代谢物存在明显差异。此外,金针中代谢物的相对含量显著高于其他两种干燥方式红茶(P<0.05),表现为金针>香螺>金曲,且 13 种代谢物的比例也存在明显差异(图 4C)。Hua 等[8] 和 Wang 等[28] 研究表明黄酮类化合物是赋予红茶独特风味的关键代谢物,其中低阈值的黄酮及其糖苷会显著提升苦味与涩感。在干燥过程中,黄酮及其糖苷会发生异构化和热降解反应,最终转化为黄酮苷元和糖类,导致其含量逐渐降低,从而有效缓解红茶的涩味与苦味[8],金曲中的黄酮物质相对含量低于其他两种红茶。酚酸是茶多酚中的一种,其在干燥过程中同样会发生异构化、降解和氧化聚合等反应,造成含量降低[28],其在金曲中的相对含量最低,上述结果可能与热风干燥快速使水分丧失,热化效率最高有关。此外,Wang 等[28] 研究发现在干燥过程中氨基酸通过脱羧、脱氨基及美拉德反应与羰基化合物(如可溶性糖、多酚和抗坏血酸)相互作用,转化为吡嗪、吲哚和对甲基苯酚,导致氨基酸含量降低。本研究中,香螺的氨基酸及其衍生物相对含量最低,可能与其高温、长时干燥有关。Li 等[29] 比较了绿茶在干燥前后的脂类物质含量差异,发现脂类物质在高温作用下容易发生氧化还原降解和酯化反应,产生挥发性化合物,如

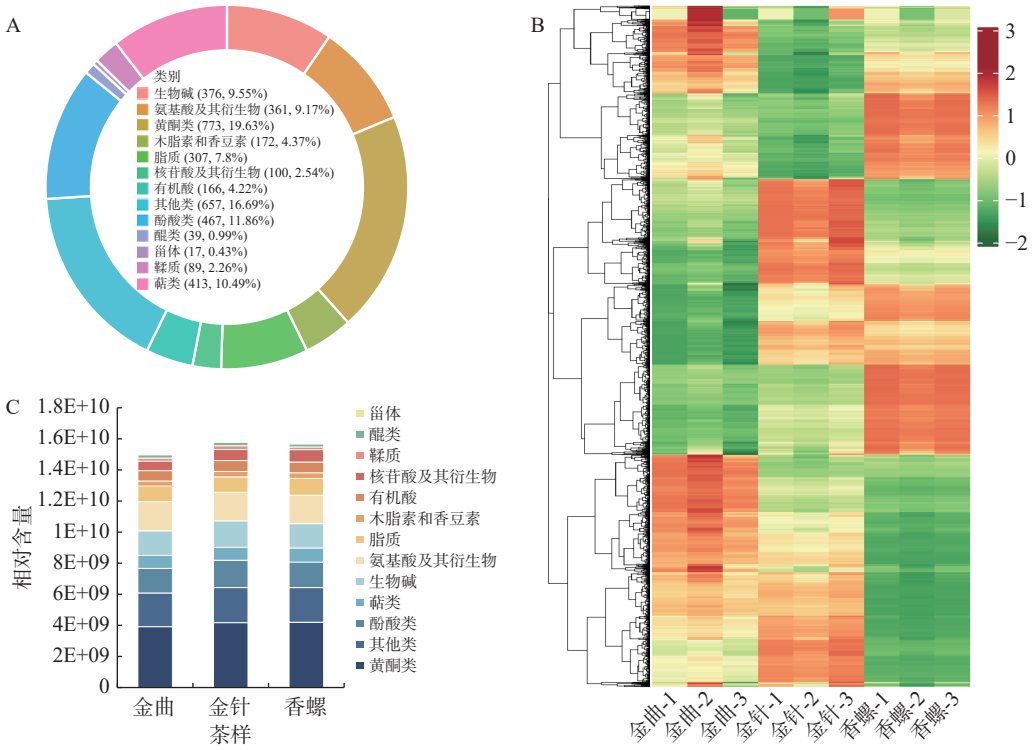


图 4　不同干燥方式川红工夫茶中的代谢物差异

Fig.4　Difference of metabolites of Sichuan Congou black tea samples based on different drying methods

注：A 为代谢物组成比例；B 为代谢物相对含量差异热图；C 为代谢物的相对含量堆积图。

醇类、醛类、酮类和酯类，导致其含量降低。本研究比较发现金针中脂质的相对含量最低，其干燥温度最高，与前人研究结果相一致[29]。

2.6　不同干燥方式差异代谢物筛选

为了解析不同干燥工艺川红工夫茶的代谢特征，对检测到的代谢物进行 PCA 和 OPLS-DA 分析。无监督的 PCA 得分图($R^2X_{(cum)}$=0.86)清晰呈现了 3 种工艺川红工夫茶的聚类差异(图 5A)。前两个主成分分别解释了 51.1% 和 43.8% 的方差，表明不同工艺制成的川红工夫茶在化学品质上存在差异。随后采用有监督的 OPLS-DA 进一步探究 3 种工艺川红工夫茶之间的代谢物差异($R^2X_{(cum)}$=0.984，$R^2Y_{(cum)}$=0.991，$Q^2_{(cum)}$=0.996)。由图 5B 可知，经茶叶烘焙机、茶叶多功能理条机和茶叶双锅曲毫机干燥的样品被归类到不同象限，表明样本间存在显著的代谢差异。通过 200 次置换检验验证了模型的稳定性，Q^2 截距值为-0.699，表明模型具有可靠性且未出现过拟合现象(图 5C)。茶代谢物的差异会直接影响茶的风味特征。为确定导致 3 种干燥工艺川红工夫茶品质差异的关键代谢物，本研究构建了 VIP 图谱。通过筛选 P<0.05 且 VIP>1.0 的代谢物，并结合茶叶代谢组学数据库及相关文献，最终共鉴定出 47 种关键代谢物。这些代谢物包括 23 种黄酮类、10 种氨基酸及其衍生物、8 种酚酸、4 种生物碱、2 种有机酸。为评估不同干燥方式下川红工夫茶的代谢谱差异，基于相对含量绘制了热图，其中蓝色部分代表相对含量较低，红色部分表示相对含量较高(图 5D)。黄酮类及黄酮苷类是影响红茶收敛性和涩味的关键代谢物[17,22]。如图 5D 所示，香螺中的黄酮类物质相对含量显著高于金曲和金针。其中，酯型儿茶素，如表儿茶素没食子酸酯和没食子儿茶素没食子酸酯在香螺中的相对含量显著高于其他两种川红工夫茶。Lu 等[17] 和 Yang 等[22] 的研究发现酯型儿茶素与红茶滋味的涩味和收敛性显著相关。非酯型儿茶素有回甘生津的特征，对红茶的品质有促进作用，金曲中的表儿茶素相对含量显著高于其余两种红茶。此外，Wang 等[28] 研究发现芦丁可增强咖啡因的苦味，本研究发现其相对含量在金曲中最低，在金针中最高。Zhang 等[1] 研究表明具有酸涩味的酚酸是茶多酚的重要成分，本研究发现，在金针样品中相对含量最高的酚酸化合物是没食子酸、2-O-咖啡酰苹果酸、苹果酸，这些化合物在香螺中的相对含量较低，而异绿原酸 C 和 3-O-没食子酰奎宁酸在香螺中的相对含量最高。

氨基酸是构成红茶滋味鲜爽的主要物质之一，与苦涩味物质形成拮抗作用，从而提高红茶的滋味品质，同时也对红茶甜香和花香的品质形成起积极作用[1,28]。本研究筛选到的氨基酸及其衍生物的相对含量在金曲中的相对含量显著高于其余两种干燥方式红茶。茶氨酸是茶叶中的主要鲜爽味氨基酸，其含量约占氨基酸总量的 50% 左右，分析发现，金曲中的茶氨酸相对含量分别是金针和香螺的 1.41 和 1.48 倍，可能是造成金曲鲜爽度得分最高的原因。茶叶中的生物碱主要包括咖啡碱、茶叶碱和可可碱，其对红茶

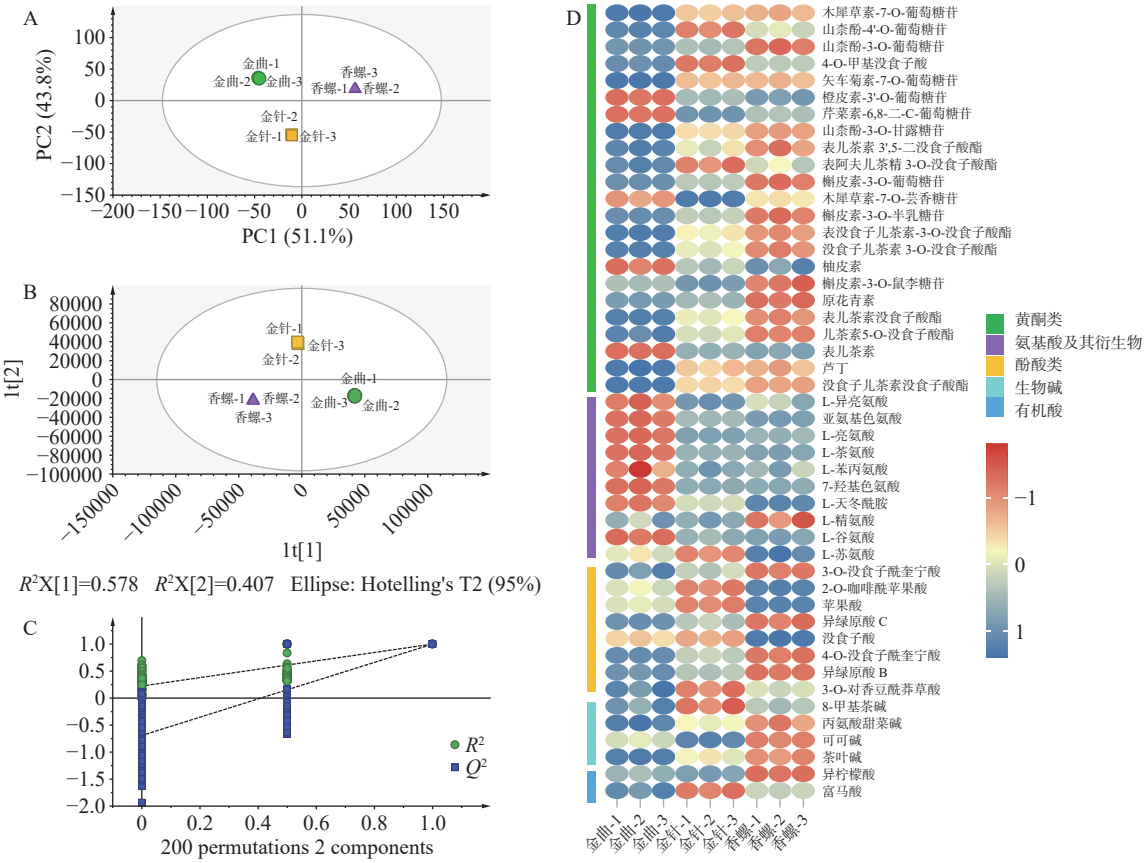


图 5　川红工夫茶中代谢物的多元统计分析

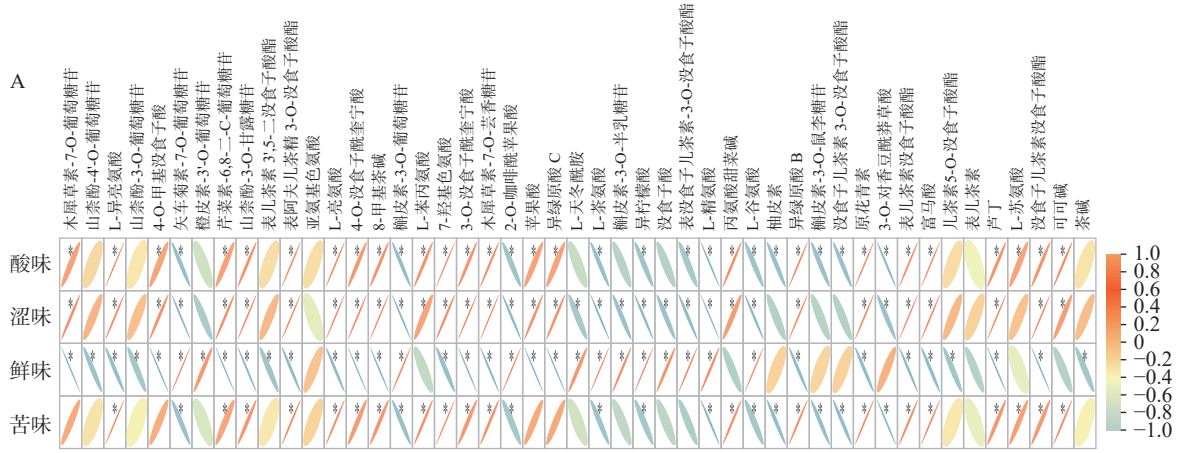
Fig.5　Multivariate statistical analysis of the metabolite profiles in Sichuan Congou black tea samples

注: A 为 PCA 得分图; B 为 OPLS-DA 得分图; C 为置换检验图; D 为差异代谢物热图。

的滋味贡献表现为苦味。茶叶碱和可可碱在金曲中的相对含量均显著低于香螺。Xie 等[30] 研究表明苹果酸加速了红茶储存过程中的酸化, 其在金曲中的相对含量最低, 在香螺中最高, 可能是香螺滋味有酸感的原因。上述结果与感官审评相一致, 表明金曲的品质高于金针和香螺。

2.7　差异代谢物与感官指标的相关性分析

相关性分析是表征代谢物与感官指标关系的有效方法。本研究进行了相关性分析, 以鉴定川红工夫茶中主要差异代谢物与其味觉特性之间的关系, 从而阐明黄酮类、游离氨基酸及其衍生物、酚酸类、生物碱和有机酸如何影响川红工夫茶的滋味品质[17]。QDA 结果显示, 不同干燥方式川红工夫茶的鲜爽味、苦味、涩味和酸味有显著差异。因此, 本研究以 ($|r|$>0.8 且 P<0.05) 为阈值, 采用皮尔逊相关性分析了 4 种滋味属性 QDA 结果与代谢物含量的相关性。结果如图 6 所示, 每类代谢物与味觉值之间存在显著相关。由图 6A 可知, 黄酮类物质如没食子儿茶素没食子酸酯、表儿茶素没食子酸酯、芦丁、木犀草素-7-O-芸香糖苷、山柰酚-3-O-甘露糖苷、木犀草素-7-O-葡萄糖苷, 酚酸类如 4-O-甲基没食子酸、4-O-没食子酰奎宁酸、3-O-没食子酰奎宁酸和 L-亮氨酸等与苦味、涩味呈显著正相关, 这些代谢物可能是导致香螺比金曲和金针更具收敛性的原因。L-天冬



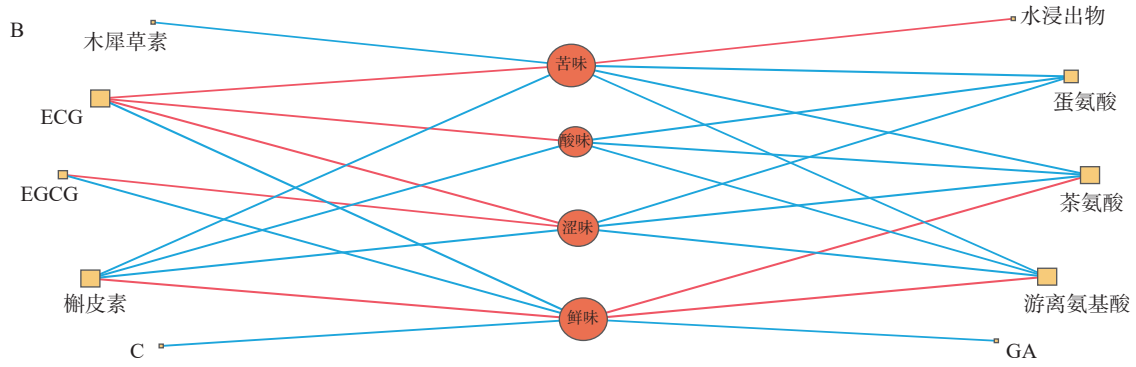


图 6　川红工夫茶中关键差异代谢物与感官指标的相关性分析

Fig.6　Correlation analysis between key differential metabolites and sensory indicators of Sichuan Congou black tea

注：A 为代谢物与味觉值的皮尔逊相关性热图，“*”代表显著相关（$P<0.05$），红色表示正相关，蓝色表示负相关，颜色越深代表相关性绝对值越大，椭圆越细代表相关性绝对值越大；B 为绝对定量物质与味觉值之间的皮尔逊相关网络图，其中红线表示正相关，蓝线表示负相关，图中只显示了相关性大于 0.8 的物质，黄色方框的大小表示滋味物质对滋味特征的贡献程度，方框越大越大代表贡献度越大。

酰胺、L-茶氨酸和 L-谷氨酸与鲜味呈显著正相关，表明鲜味氨基酸是金曲茶汤鲜爽味较高的主要贡献者，与 Lu 等[17] 的研究结果相一致。与金曲相比，香螺中的鲜爽味氨基酸含量较低，这解释了其鲜爽味较低的原因。苹果酸和富马酸与酸味呈显著正相关，而与鲜味呈显著负相关，可能是香螺酸味较高的原因。通过 HPLC 测定结合 OPLS-DA 分析筛选到的绝对定量差异化合物与四种滋味属性的相关性如图 6B 所示。可以发现，ECG 和水浸出物与苦味成正相关，茶氨酸和游离氨基酸与苦味和涩味成负相关，与鲜味呈正相关。EGCG 和涩味呈正相关，与鲜味呈负相关，与 Yang 等[22] 和 Lu 等[17] 的研究结果基本一致。此外，由图 6A 还发现槲皮素-3-O-半乳糖苷、表没食子儿茶素-3-O-没食子酸酯和槲皮素与鲜爽味呈正相关，与这些物质自身的滋味属性相反，可能是因为滋味物质具有协同效应或拮抗效应，在感官评估中，收敛性化合物可能抑制、掩盖并减弱甜味和鲜爽味，同时加剧苦味[31]。综上，上述代谢物是造成不同干燥方式川红工夫茶品质差异的重要原因，而这些物质的相互作用如何影响川红工夫茶的滋味品质还需进一步开展研究。

3　结论

本研究通过探究不同干燥方式对川红工夫茶滋味的影响，发现采用双锅曲毫机加工形成的香螺保留了更多的水浸出物、酯型儿茶素和黄酮，增加了茶汤的醇度、苦涩味和收敛性，同时由于长时间干燥也使香螺中的茶多酚氧化降解形成了更多的茶褐素，导致其茶汤颜色偏暗。而茶多酚的降低和氨基酸的保留使采用热风干燥形成的金曲苦涩味降低和鲜爽度增加，金针的品质处于中等水平。黄酮类、氨基酸及其衍生物、酚酸、生物碱和有机酸相对含量的不同是造成 3 种干燥方式川红工夫茶滋味差异的原因。EGCG、GCG、ECG、芦丁、木犀草素-7-O-芸香糖苷、山柰酚-3-O-甘露糖苷和 4-O-甲基没食子酸、4-O-没食子酰奎宁酸等是苦涩味的主要来源，L-天冬酰胺、L-茶氨酸和 L-谷氨酸是鲜爽味差异的主要贡献者，而苹果酸和富马酸是造成香螺酸味较为明显的主要原因。综上表明，采用热风干燥的金曲品质最高，研究结果为高品质川红工夫茶加工奠定了理论基础。关于不同热风干燥温度及多种组合干燥方式对川红工夫茶品质的影响，代谢物之间的相互作用与滋味品质的相关性在本研究中均未涉及，后续可以深入开展这方面的研究，更好地揭示干燥方式与干燥温度对川红工夫茶品质的影响机理。

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

[2] YE J L, YE Y, YIN J F, 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.

[3] ZHANG L, HO C T, ZHOU J, et al. Chemistry and biological activities of processed *Camellia sinensis* teas: A comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(5): 1474−1495.

[4] TANG G Y, MENG X, GAN R Y, et al. Health functions and related molecular mechanisms of tea components: An update review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(24): 6196.

[5] CHEN L, ZHOU Z X. Variations of main quality components of tea genetic resources [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] preserved in the China national germplasm tea repository[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2005, 60(1): 31−35.

[6] 梅宇. 2024 年中国茶叶生产与内销形势分析[J]. 中国茶叶, 2025, 47(6): 24−30. [MEI Y. Analysis of China's tea production and domestic sales in 2024[J]. China Tea, 2025, 47(6): 24−30.]

[7] JIANG B, YANG L R, LUO X P, et al. Aroma formation and

dynamic changes during *Sichuan* black tea processing by GC-MS-based metabolomics[J]. Fermentation, 2023, 9(7): 686.
[8] HUA J J, OUYANG W, ZHU X Z, 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.
[9] MA J Q, WANG Y J, LI J Y, 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-Food Science and Technology, 2024, 198: 116019.
[10] WANG Y L F, LI S Q, HAN T X, et al. Response of soil faunal communities to tea tree cultivars in the hilly region of western Sichuan, China[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 275: 109701.
[11] 胡静, 段波, 何至伟, 等. 川红工夫红茶加工工序对主要滋味物质及其品质形成的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 291−298. [HU J, DUAN B, HE Z W, et al. Influence of process on the formation of main taste substances and quality of Chuanhong congou black tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 291−298.]
[12] LIU F, ZHU H K, LI C H, et al. A combined drying process involving hot air and roasting for improving summer congou black tea quality[J]. Food Research International, 2025, 201: 115584.
[13] HOU Z W, WANG Y J, XU S S, 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]. Food science & technology, 2020, 130: 109547.
[14] YANG H Y, LI Y K, XIE T, et al. Red-light withering increases the aroma content and diversity, and blue-light withering improves the fresh sweetness of black tea[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 25: 1−14.
[15] ZHANG S, WU S M, YU Q Y, et al. The influence of rolling pressure on the changes in non-volatile compounds and sensory quality of congou black tea: The combination of metabolomics, E-tongue, and chromatic differences analyses[J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100989.
[16] JAING Y Q, CHEN Z B, ZHANG J X et al. Effects of fermentation with different oxygen concentrations on the quality of Keemun black tea: regulation of taste substances by oxygen[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 229: 118197.
[17] LU M X, JIANG Y C, ZHAO W, et al. Effects of different drying methods on color difference, taste and chemical components of Yunnan Congou black tea[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117696.
[18] LAN T M, ZENG Q B, CHEN L, et al. Comparison of volatile and nonvolatile metabolites in black tea under four second-drying methods using widely targeted metabolomics[J]. Foods, 2024, 13(1): 144.
[19] 鲁倩, 熊梦钒, 周艳珠, 等. 5 种不同干燥方式对云南工夫红茶品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6772−6780. [LU Q, XION M F, ZHOU Y Z, et al. Influence of 5 kinds of different drying methods on the quality of Yunnan Congou black tea[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(20): 6772−6780.]
[20] XU Y J, LIU Y Q, YANG J H, et al. Manufacturing process differences give Keemun black teas their distinctive aromas[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100865.
[21] JIANG B, LUO X P, YAN J N, 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: 520.
[22] YANG L R, LUO X P, WANG Q M, 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.
[23] 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 B, LUO X P, LIU K Y, et al. Analysis of the quality differences of Congou black tea from different origin[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(11): 56−65.]
[24] 罗学平, 蒋宾, 李丽霞, 等. OPA 柱前衍生化 HPLC 同时测定川红工夫红茶 20 种氨基酸含量[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(4): 53−62. [LUO X P, JIANG B, LI L X, et al. Simultaneous determination of 20 amino acids in Sichuan black tea by the method of online pre-column OPA derivatization HPLC[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2024, 42(4): 53−62.]
[25] 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 J X, YAN T Y, SHAO S X, et al. Metabonomics analysis of Jinguanyin black tea from different origins based on UPLC-MS/MS[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2022, 50(15): 162−168.]
[26] TIAN D, MA C Q, ZHOU X H, et al. Reveal the influence mechanism of different storage containers on the flavor of ripe Pu-erh tea based molecular sensory science[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 214: 117073.
[27] LI Y C, LUO Q Q, QIN M X, et al. Study on color, aroma, and taste formation mechanism of large-leaf yellow tea during an innovative manufacturing process[J]. Food Chemistry, 2024, 438: 138062.
[28] WANG H J, CHEN L, XU A A, et al. Thermochemical reactions in tea drying shape the flavor of tea: A review[J]. Food Research International, 2024, 197(1): 115188.
[29] LI J, HUA J J, YUAN H B, et al. Investigation on green tea lipids and their metabolic variations during manufacturing by non-targeted lipidomics[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128114.
[30] XIE Z X, ZHANG D, ZHU J Y, et al. Mechanism of aroma enhancement methods in accelerating Congou black tea acidification subjected to room temperature storage[J]. Food Chemistry, 2024(16): 438: 137837.
[31] JIN S, LI M J, LIU Z Q, et al. Study on the correlation between color and taste of beauty tea infusion and the pivotal contributing compounds based on UV–visible spectroscopy, taste equivalent quantification and metabolite analysis[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101192.