DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260318002
引用格式: 李莲, 刘新月, 伍旭东, 等. 不同烘焙程度小粒种咖啡中主要化学成分动态演变探究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 297–304.
LI L, LIU XY, WU XD, *et al*. Research on the dynamic changes of main chemical components in the *Coffea arabica* L. under different roasting degrees [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 297–304. (in Chinese with English abstract).

不同烘焙程度小粒种咖啡中主要化学成分动态演变探究

李　莲, 刘新月*, 伍旭东, 李宗师, 金红芳, 胡圆圆, 周　娅, 王晓妃
(普洱市检验检测院, 普洱　665000)

摘　要: 目的　系统探究不同烘焙程度下小粒种咖啡主要化学成分的动态变化规律。**方法**　选取卡蒂姆、卡杜拉及萨奇姆 3 种小粒种咖啡生豆为研究对象, 分别测定生豆和黄点烘焙、肉桂烘焙、浅烘焙、中度烘焙、中深烘焙和深度烘焙共 6 种烘焙豆样品中咖啡碱、游离氨基酸、多酚、总黄酮、多糖和绿原酸的含量, 系统分析各成分随烘焙程度变化的规律。**结果**　3 种小粒种咖啡的主要化学成分含量随着烘焙程度增加呈现以下变化规律: 咖啡碱含量基本无变化, 稳定在 0.99%~1.24%范围内; 游离氨基酸含量呈显著下降趋势, 其中卡蒂姆由 0.49%降低至 0.02%, 卡杜拉由 0.41%降低至 0.03%, 萨奇姆由 0.59%降低至 0.03%; 多酚含量虽然在部分烘焙阶段略有波动, 但随着烘焙程度的增加, 3 种小粒种咖啡样品多酚含量整体呈下降趋势, 由生豆 8.27%~8.52%降至 5.76%~4.15%; 总黄酮含量总体呈显著下降趋势, 由 5.86%~6.88%降至 0.95%~1.32%; 多糖含量表现为"先下降后显著上升"的趋势, 由生豆开始至肉桂烘焙阶段由 3.47%~4.42%降至 2.30%~2.94%, 由浅烘焙阶段开始随烘焙程度增加多糖含量显著升高, 深度烘焙时达到 5.84%~7.80%; 生豆中 6 种绿原酸总含量高达 64.83~66.12 mg/g, 随烘焙程度的增加逐渐降至 4.62~7.50 mg/g, 仅为对应生豆含量的 7.1%~11.3%。**结论**　本研究明确烘焙程度与 3 种小粒种咖啡主要化学成分的量化关联, 研究结果为咖啡烘焙工艺及功能性产品开发提供基础数据参考。

关键词: 小粒种咖啡; 烘焙度; 化学成分; 量化关联

Research on the dynamic changes of main chemical components in the *Coffea arabica* L. under different roasting degrees

LI Lian, LIU Xin-Yue*, WU Xu-Dong, LI Zong-Shi, JIN Hong-Fang, HU Yuan-Yuan, ZHOU Ya, WANG Xiao-Fei
(*Pu'er Inspection and Testing Institute*, *Pu'er* 665000, *China*)

ABSTRACT: Objective　To systematically investigate the dynamic variation patterns of major chemical

收稿日期: 2026-03-18
基金项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目(2025MK135); 普洱市科技计划项目(KJXM202508080376)
第一作者: 李莲(1986—), 女, 主管药师, 主要研究方向为食品与药品质量安全分析与检测技术。E-mail: 595307155@qq.com
***通信作者:** 刘新月(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 591011711@qq.com

components in *Coffea arabica* L. under different roasting degrees. **Methods** The 3 kinds of *Coffea arabica* L. beans—Catimor coffee, Caturra coffee and Sachimor coffee—were selected as research the subjects. The content of caffeine, free amino acids, polyphenols, total flavonoids, polysaccharides and chlorogenic acid in raw beans and 6 kinds of roasted bean samples: Yellow dot roasted, cassia bark roasted, light roasted, medium roasted, medium-dark roasted and fully roasted were measured respectively, and the variation patterns of each component with roasting degree were systematically analyzed. **Results** The main chemical component content of the 3 kinds of *Coffea arabica* L. exhibited the following variation patterns with increasing roasting degree: The caffeine content remained largely unchanged, stabilizing within the range of 0.99%–1.24%; the free amino acid content showed a significant decline, with Catimor coffee decreasing from 0.49% to 0.02%, Caturra coffee from 0.41% to 0.03%, and Sachimor coffee from 0.59% to 0.03%; although the polyphenol content exhibited slight fluctuations during certain roasting stages, it showed an overall declining trend across all 3 kinds of *Coffea arabica* L. samples as roasting intensity increased, raw beans from 8.27%–8.52% to 5.76%–4.15%; the total flavonoid content showed a pronounced downward trend, dropping from 5.86%–6.88% to 0.95%–1.32%; the polysaccharide content followed a “first decrease followed by significant increase” pattern, from the raw bean stage to the cassia bark roasting stage, the polysaccharide content decreased from 3.47%–4.42% to 2.30%–2.94%. Starting from the light roasting stage, the polysaccharide content increased significantly with increasing roasting degree, reaching 5.84%–7.80% during deep roasting; the total chlorogenic acid content in raw beans reached 64.83–66.12 mg/g, gradually declining to 4.62–7.50 mg/g with increased roasting degree, accounting for only 7.1%–11.3% of the corresponding raw bean content. **Conclusion** This study clarify the quantitative correlation between roasting degree and the main chemical components of 3 kinds of *Coffea arabica* L. varieties. The findings provide basic data reference for the optimization of *Coffea arabica* L. roasting processes and the development of functional *Coffea arabica* L. products.

KEY WORDS: *Coffea arabica* L.; roasting degrees; chemical components; quantitative association

0 引 言

咖啡豆为茜草科(Rubiaceae)咖啡属(*Coffea*)植物种子，分为大粒种(*Coffea liberica*)、中粒种(*Coffea canephora*)、小粒种(*Coffea arabica* L.)和埃塞尔萨种(*Coffea excelsa*) 4 个类别[1–2]。咖啡凭借独特的风味特征、丰富的营养组分及多种生物活性物质，已然成为全球消费量最大的饮品之一。咖啡豆富含绿原酸、咖啡因、类黄酮化合物和矿物质等化学成分[3–7]，这些成分让咖啡具有显著的抗氧化[8]、降脂减肥[9–10]、提神醒脑[11]及调节生理功能[12–13]等功效。基于此，咖啡豆在医药领域和功能性食品开发方面展现出广阔的应用前景。云南省是我国咖啡的主要产区，截止 2026 年，全省咖啡种植面积、产量和产值均位居全国第一，出口咖啡 1.9 万吨，货值 8.6 亿元，出口量值均居全国第一[14]。云南省具有得天独厚的阿拉比卡咖啡种植自然条件，大多数区域海拔都在 800~2000 m 之间，地势连绵起伏，地理气候特征显著，昼夜温度差异较大，有利于产出品质优越的咖啡[3]。咖啡在云南省农产品出口体系中，稳居创汇规模第四位，具备突出的外向型经济拉动作用，已成为全省实施农业“走出去”战略的重点培育产业。近年来，云南咖啡产业的发展逐步由初级农产品供应向精品化产品供应转型，而高品质产品的开发尚处于探索阶段。

烘焙是咖啡加工过程中的关键环节，直接影响其营养品质、风味及产品的市场竞争力。目前，咖啡烘焙程度的核心分类为浅度烘焙、中度烘焙和深度烘焙。鉴于不同产品对目标风味的差异化要求，会将烘焙程度进一步细分，形成包括黄点烘焙、肉桂烘焙、浅烘焙、中度烘焙、中深烘焙和深度烘焙等在内的多个烘焙等级[15–16]。诸多研究表明：由于烘焙温度和烘焙时长的差异，在不同烘焙程度下，烘焙过程中的美拉德反应和焦糖化反应程度会出现显著差异，最终形成具有不同风味与营养特征的产品[17–18]。张琪[19]对比海南罗布斯塔咖啡生豆分别进行了浅烘焙、中度烘焙、中深度烘焙和深度烘焙处理，并对其营养品质开展对比分析，综合感官评价结果显示中深度烘焙的感官评价得分最高，而在化学成分方面浅度烘焙的绿原酸含量较高，但浅度烘焙豆丙烯酰胺生成量也高于其他烘焙方式。施雪颖等[20]以云南日晒和水洗咖啡豆为研究样品，考察浅、中、深 3 种烘焙程度下，对理化性质及风味物质的影响并进行表征，为两种加工工艺的风味物质表征提供参考。顾颖等[21]发现在浅烘焙、中浅烘焙、中烘焙、中深烘焙和深烘焙 5 个烘焙度下，咖啡豆挥发性成分和有机酸含量均呈现显著差异性，其中，中度烘焙感官评分最高。由此可见，烘焙程度对咖啡营养成分影响的相关研究受到学者们广泛关注，但关于云南小粒咖啡细化烘焙程度对咖啡主要化学成分影响的系统性研究较少。

鉴于此, 本研究以云南主栽小粒种咖啡品种(卡蒂姆、卡杜拉、萨奇姆)为研究对象, 采用高效液相色谱法和紫外分光光度计法等现代分析技术, 对咖啡生豆和黄点烘焙、肉桂烘焙、浅烘焙、中度烘焙、中深烘焙和深度烘焙共 6 种烘焙豆样品中咖啡碱、游离氨基酸、多酚、总黄酮、多糖和绿原酸等主要化学成分进行定量测定, 系统分析各成分随烘焙程度变化的动态规律。为完善咖啡品质评价体系, 基于特征化学成分建立客观评价方法, 弥补传统感官评价主观性强、重复性差的不足, 为咖啡品质评价从“感官主导”向“理化+感官”的综合评价模式转变奠定基础, 为企业标准化生产和差异化产品开发提供科学依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

研究所用的卡蒂姆、卡杜拉和萨奇姆 3 种小粒种咖啡原料, 均为 2024 年采自云南省普洱市思茅区经日晒处理加工的生咖啡豆, 每种咖啡原料分为数组样本。每组样本都先剔除缺陷豆后取 7 kg, 充分混合均匀, 以每份 1 kg 分别均分为 7 份, 1 份留作生豆样品, 其余 6 份分别按照不同烘焙程度进行烘焙, 制得黄点烘焙、肉桂烘焙、浅烘焙、中度烘焙、中深烘焙和深度烘焙 6 种咖啡烘焙豆样品。各样品分别用高速粉碎机粉碎后, 置于干燥器中密封保存备用。

硫酸(优级纯)、无水乙醇、硝酸铝、无水碳酸钠(分析纯)(广州市西陇化工有限公司); 苯酚(分析纯, 广东光华科技股份有限公司); 十二水磷酸氢二钠、福林酚试剂(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 磷酸二氢钾、乙酸钾、氧化镁(分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 水合茚三酮(纯度 99%, 科密欧化学试剂有限公司); 乙腈、甲醇(色谱纯, 美国 J.T.Baker®化学公司); 磷酸(分析纯, 四川巴斯特精细化工有限公司); 0.45 μm 聚醚砜膜针式过滤器(天津津腾实验设备有限公司); 没食子酸(纯度大于 99%, 北京百灵威科技有限公司); 咖啡碱(质量浓度 1000 μg/mL, 北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司); 葡萄糖(纯度大于 99.9%, 中国食品药品检定研究院); 谷氨酸(纯度大于 99.7%)、芦丁标准品(纯度大于 92.8%)、绿原酸、隐绿原酸、新绿原酸、异绿原酸 A、异绿原酸 B、异绿原酸 C(质量浓度 1000 μg/mL)(天津阿尔塔科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

CM200 咖啡烘焙测试及粒径分析仪(东莞市宸峄贸易有限公司); TU-1950 型紫外可见-分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); AS-3120B 超声波清洗器(天津兴特赛恩斯仪器有限公司); DKM610C 电热恒温干燥(重庆雅马拓科技有限公司); D-082 涡旋振荡器(德国 IKA-Werke GmbH & Co. KG 公司); 3K15 台式高速冷冻离心机(德国 SIGMA Laborzentrifugen GmbH 公司); CPA225D 电子天平(精度 0.01 mg, 德国赛多利斯股份公司); LC-20AD 高效液相色谱仪(日本株式会社岛津制作所); XA-I高速粉碎机(江苏姜堰市银河实验仪器厂); Aglient ZORBAX ODS-C_{18} (250 mm×4.6 mm, 5 μm)、Agilent ZORBAX SB-C_{18} (250 mm×4.6 mm, 5 μm)(美国安捷伦科技公司)。

1.3　实验方法

水分测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》, 采用直接干燥法, 于 103 ℃干燥至恒重, 计算水分含量; 多糖测定参照 SN/T 4260—2015《出口植物源食品中粗多糖的测定》, 采用苯酚-硫酸法显色, 使用分光光度法, 在 490 nm 处测定吸光度, 以葡萄糖标准曲线定量; 游离氨基酸测定参照 GB/T 8314—2013《茶 游离氨基酸总量的测定》, 采用分光光度法, 在 570 nm 处测定吸光度, 用谷氨酸标准品校准; 总黄酮测定参照 SN/T 4592—2016《出口食品中总黄酮的测定》, 采用分光光度法, 在 420 nm 处测定吸光度, 用芦丁对照品定量; 多酚参照 GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》, 采用分光光度法, 在 765 nm 处测定吸光度, 用没食子酸对照品定量; 绿原酸和咖啡碱测定分别参照 NY/T 3514—2019《咖啡中绿原酸类化合物的测定》和 GB/T 8312—2013《茶 咖啡碱测定》, 均采用高效液相色谱法, 色谱条件部分有调整, 其余条件不变; 咖啡豆的烘焙度梯度以及各咖啡豆的色泽、风味, 如表 1 所示。

咖啡豆样品中的水分含量, 按以下公式(1)进行计算:

$$X=\frac{m_1-m_2}{m_1-m_3}\times 100 \tag{1}$$

式中: X 为样品中水分的含量, g/100 g; m_1 为称量瓶和样品的质量, g; m_2 为称量瓶和样品干燥后的质量, g; m_3 为称量瓶的质量, g; 100 为单位换算系数。

绿原酸测定高效液相色谱法条件:

色谱柱: Aglient ZORBAX ODS-C_{18} (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 流速: 1.0 mL/min; 柱温: 35 ℃; 检测波长: 紫外检测器, 327 nm; 进样量为: 10 μL; 流动相 A: 甲醇, 流动相 B: 0.1%磷酸水溶液, 梯度洗脱流动相比例及梯度: 0~10 min, 10%流动相 A; 12 min, 20%流动相 A; 30 min, 20%流动相 A; 32 min, 10%流动相 A; 36 min, 10%流动相 A。

咖啡碱测定高效液相色谱法条件:

色谱柱: Agilent ZORBAX SB-C_{18} (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 柱温: 35 ℃; 流速: 1.0 mL/min; 检测波长: 紫外检测器, 274 nm; 进样量: 10 μL; 流动相 A: 甲醇, B: 水; 流动相比例及梯度: 甲醇:水=3:70 (V:V), 等度洗脱。

所有实验操作严格控制环境温湿度[25 ℃±1 ℃, 相对湿度(relative humidity, RH) 50%±5%], 避免批次间系统误差。所有指标均以干基计, 均进行 3 次重复测定, 以减小随机误差并提高数据的精确度与重现性, 结果以平均值表示, 用于后续分析与比较。

表 1 咖啡豆的烘焙度梯度以及色泽、风味

Table 1 Roasting degree gradient of *Coffea arabica* L. beans and the color and flavor

烘焙度	烘焙温度/℃	总烘焙时长/min	豆表色泽与状态	核心风味特征
生豆	/	/	均匀浅黄色、有皱皮、银皮多	青香、果香、酒香
黄点烘焙	155	5	浅黄褐色、表面干燥无油、银皮开始松动	青草味完全消散、烤谷物/炒黄豆、瓜子的香味、无明显咖啡风味
肉桂烘焙	180	7	浅棕色、干燥无油脂、豆体轻微膨胀	酸质明亮、香气为水果调性、甜感较弱，但干净清爽，醇厚度稍弱
浅烘焙	195	8.5	金棕色、表面干爽无油	花香、莓果、蜂蜜、酸质明亮活泼、带有热带水果及红酒的风味
中度烘焙	210	11	栗子棕色、表面干爽微润	热带水果、焦糖、巧克力、酸甜平衡
中深烘焙	220	14	深棕色、表面轻微出油	黑巧克力、可可、莓果、醇厚度高、微带烟感
深度烘焙	230	17	深黑褐色、表面明显出油	炭香、烟熏、烤坚果、口感厚重、低等的果酸，苦味较明显

注: /为未有具体数值。

1.4 数据处理

各指标数据严格依据检验方法定量计算，经 Grubbs 检验剔除异常值后，采用 Excel 2007 完成基础数据的整理和描述性统计分析，通过 Origin 2021 开展专业数据处理并生成可视化科研图表。

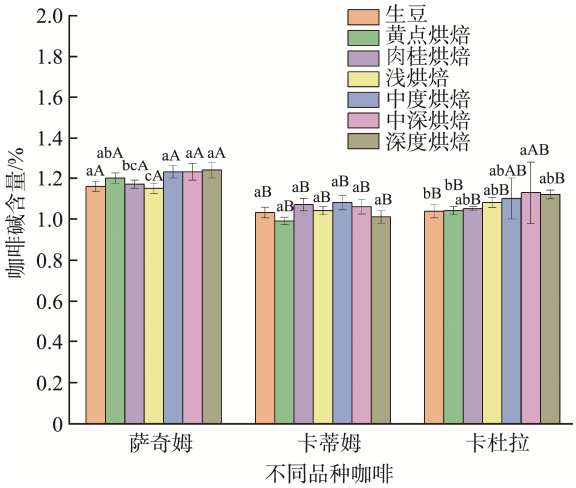
2 结果与分析

2.1 不同烘焙度下咖啡碱含量的变化

对不同烘焙程度 3 种小粒种咖啡中的咖啡碱含量进行测定，结果如图 1 所示，3 种小粒种咖啡豆在烘焙过程中咖啡碱含量变化均呈现相同的趋势，即随着烘焙程度的增加，咖啡碱含量保持相对稳定在 0.99%~1.24%范围内。烘焙度对咖啡碱含量整体上无显著影响，该结果与王春华等[22]在浅、中、深 3 个烘焙度下咖啡碱含量的研究结论一致。咖啡碱属于嘌呤类生物碱，其分子结构由嘌呤环与甲基基团组成，具有较高的热稳定性，在常规物理或化学条件下不易发生断裂或降解[23]，这一分子稳定性特征从机制层面阐释了烘焙中含量恒定的现象，为咖啡烘焙品质控制提供理论依据。

2.2 不同烘焙度下游离氨基酸含量的变化

游离氨基酸是同时具有氨基和羧基结构但未形成肽键的有机化合物，无需进一步分解即可被人体直接吸收利用，能够参与能量供应、代谢反应等关键生理过程[24]，是生命活动不可或缺的物质。本研究定量分析卡蒂姆、卡杜拉及萨奇姆 3 种小粒种咖啡的生豆和在不同烘焙度(浅烘焙、黄点烘焙、肉桂烘焙、中度烘焙、中深烘焙和深度烘焙 6 个梯度)烘焙豆的游离氨基酸含量变化趋势，结果如图 2 所示，随着烘焙程度的增加，其游离氨基酸含量呈显著下降趋势，其中卡蒂姆的游离氨基酸含量由 0.49%降低至 0.02%，卡杜拉的游离氨基酸含量由 0.41%降低至 0.03%，萨奇姆游离氨基酸的含量由 0.59%降低至 0.03%，表明烘焙程度与游离氨基酸含量呈强负相关，造成这一现象的原因，可能是烘焙过程中游离氨基酸参与美拉德反应，导致其含量随烘焙程度的增加而降低。



注: 图中不同大写字母表示相同烘焙程度下不同品种咖啡的化学成分含量之间差异显著(P<0.05)，图中不同小写字母表示相同品种咖啡下不同烘焙程度的化学成分含量之间差异显著(P<0.05)。图 2~6 同。

图 1 不同烘焙程度下各咖啡品种的咖啡碱含量变化

Fig.1 Changes in the caffeine content of different *Coffea arabica* L. varieties under different roasting degrees

2.3 不同烘焙度下多酚含量的变化

随着烘焙程度的增加不同烘焙程度对 3 种小粒种咖啡多酚含量的影响，结果如图 3 所示，随着烘焙程度的增加，3 种小粒种咖啡样品多酚含量整体呈下降趋势，由生豆 8.27%~8.52%降至 5.76%~4.15%，该变化特征与已有研究[25–26]中烘焙对植物源性食品中多酚含量影响规律基本一致。此外，图 3 还显示，在烘焙程度增加过程中的部分阶段，有些咖啡的多酚含量呈现增加的趋势，如萨奇姆和

卡杜拉咖啡在黄点烘焙的多酚含量明显增加, 萨奇姆咖啡从黄点烘焙到肉桂烘焙阶段多酚含量进一步增加。造成咖啡豆在烘焙程度变化的过程中会出现多酚含量时而减少, 时而增加的现象, 主要是由于多酚类物质稳定性较差, 在高温条件下易发生裂解、氧化和异构化等反应[27]。在一定的高温条件下可裂解为小分子多酚, 使其总含量增加, 而过高的温度则能使多酚氧化或者异构化, 使其含量呈降低趋势。多酚的分解与生成是一个复杂的过程, 有待在分子水平上进行深入研究。

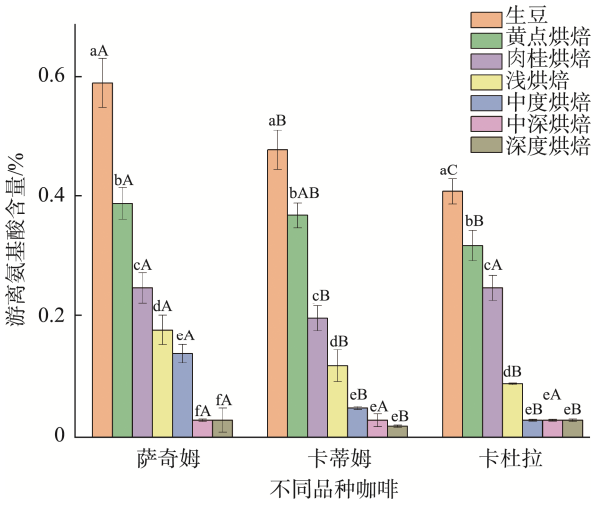


图 2　不同烘焙程度下各咖啡品种的游离氨基酸含量的变化

Fig.2　Changes in the free amino acid content of different *Coffea arabica* L. varieties under different roasting degrees

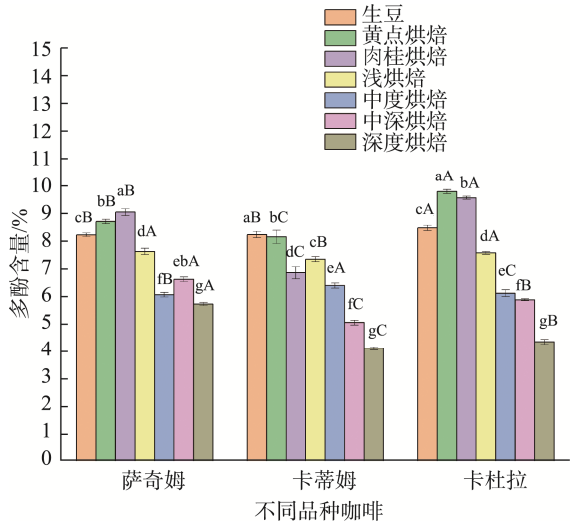


图 3　不同烘焙程度下各咖啡品种的多酚含量变化

Fig.3　Changes in the polyphenol content of different *Coffea arabica* L. varieties under different roasting degrees

2.4　不同烘焙度下总黄酮含量的变化

黄酮是具有 C_6-C_3-C_6结构的多酚类物质, 具有多种生理活性功能, 近年来在医药、食品和保健品领域引起了学者极大的关注[8,12–13]。图 4 所示为黄酮含量随烘焙程度变化的趋势图, 随着烘焙程度的增加, 总黄酮含量总体呈显著下降趋势, 初始咖啡生豆含量范围为 5.86%~6.88%, 经烘焙后降至 0.95%~1.32%范围, 且萨奇姆、卡蒂姆和卡杜拉总黄酮含量降幅分别为 77.4%、85.2%和 82.5%。研究表明: 多数黄酮类化合物对高温较为敏感, 在高温条件提取或处理过程中, 样品黄酮类化合物含量会显著降低[28]。进一步分析表明, 黄酮糖苷(糖基类)与黄酮苷元的耐热性存在显著差异, 其耐热性弱于黄酮苷元。糖基类黄酮类化合物的耐热性较苷元黄酮类化合物耐热性差。

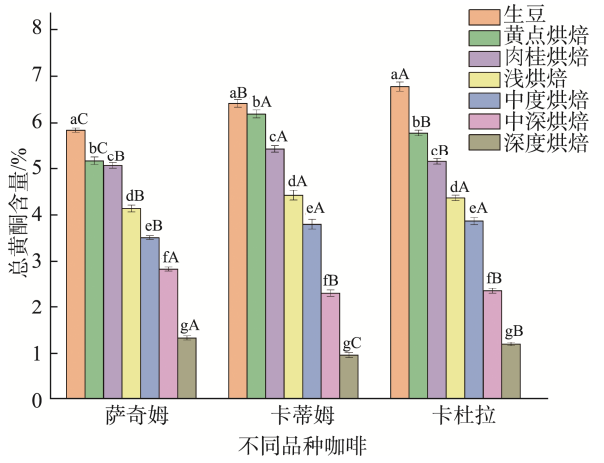


图 4　不同烘焙程度下各咖啡品种的总黄酮含量变化

Fig.4　Changes in the total flavonoids content of different *Coffea arabica* L. varieties under different roasting degrees

2.5　不同烘焙度下多糖含量的变化

多糖是微生物生长代谢的重要碳源, 同时具备良好的免疫活性[29]。咖啡作为广受消费的热门饮品, 其所含多糖成分同样具有重要研究价值, 是值得重点关注的研究对象。图 5 所示 3 种小粒种咖啡中多糖随烘焙程度的变化趋

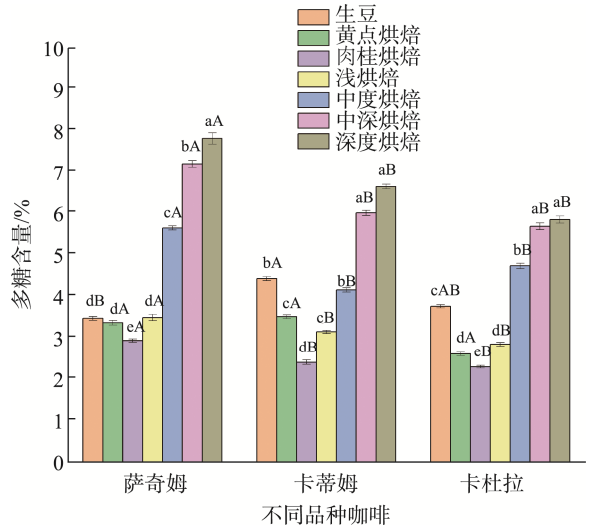


图 5　不同烘焙程度下各咖啡品种的多糖含量变化

Fig.5　Changes in total polysaccharide content of different *Coffea arabica* L. varieties under different roasting degrees

势图，结果显示 3 种小粒种咖啡生豆在烘焙过程中，随着烘焙程度的不断增加，多糖含量变化皆为“双阶段”特征—呈“先下降后显著上升”趋势：由生豆开始至肉桂烘焙阶段由 3.47%~4.42%降至 2.30%~2.94%，由浅烘焙阶段开始随烘焙程度增加多糖含量显著升高，深度烘焙时达到 5.84%~7.80%，较相对应的生豆增加 50.1%~124.9%。本研究出现多糖“双阶段”特征与美拉德反应密切相关。第一阶段，咖啡中的还原糖与氨基化合物发生反应，形成不稳定的醛二胺化合物希夫碱，通过重排反应产生稳定的酮胺产物[30]，故 3 种小粒种咖啡在生豆至肉桂烘焙阶段多糖含量降低；第二阶段，随着烘焙程度的增加非还原糖多糖结构受高温影响而遭到破坏[31]，多糖分解为单糖或多糖及蔗糖等非还原性糖不参与美拉德反应，因此随着烘焙程度的增加多糖总量增加，增加的多糖部分推测为非还原糖组分。

2.6 不同烘焙度下绿原酸含量的变化

本研究对 3 种小粒种咖啡生豆及各烘焙豆中绿原酸、隐绿原酸、新绿原酸、异绿原酸 A、异绿原酸 B 和异绿原酸 C 的含量进行定量分析，结果见图 6 所示：咖啡生豆中绿原酸总含量高达 64.83~66.12 mg/g，随烘焙程度增加逐渐降低，至深度烘焙阶段降至 4.62~7.50 mg/g，仅为对应生豆含量的 7.1%~11.3%。根据图 7 显示，绿原酸和异绿原

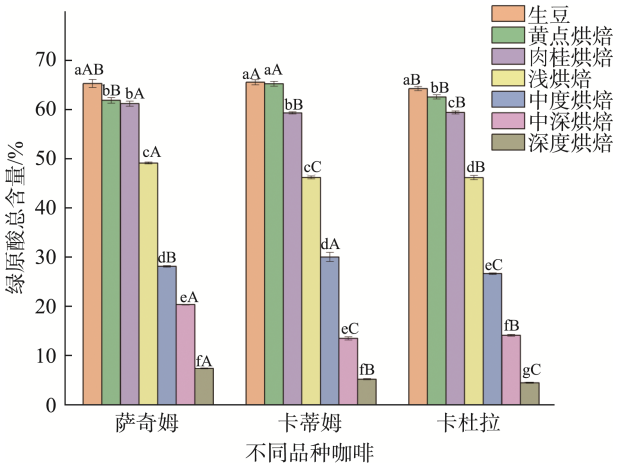
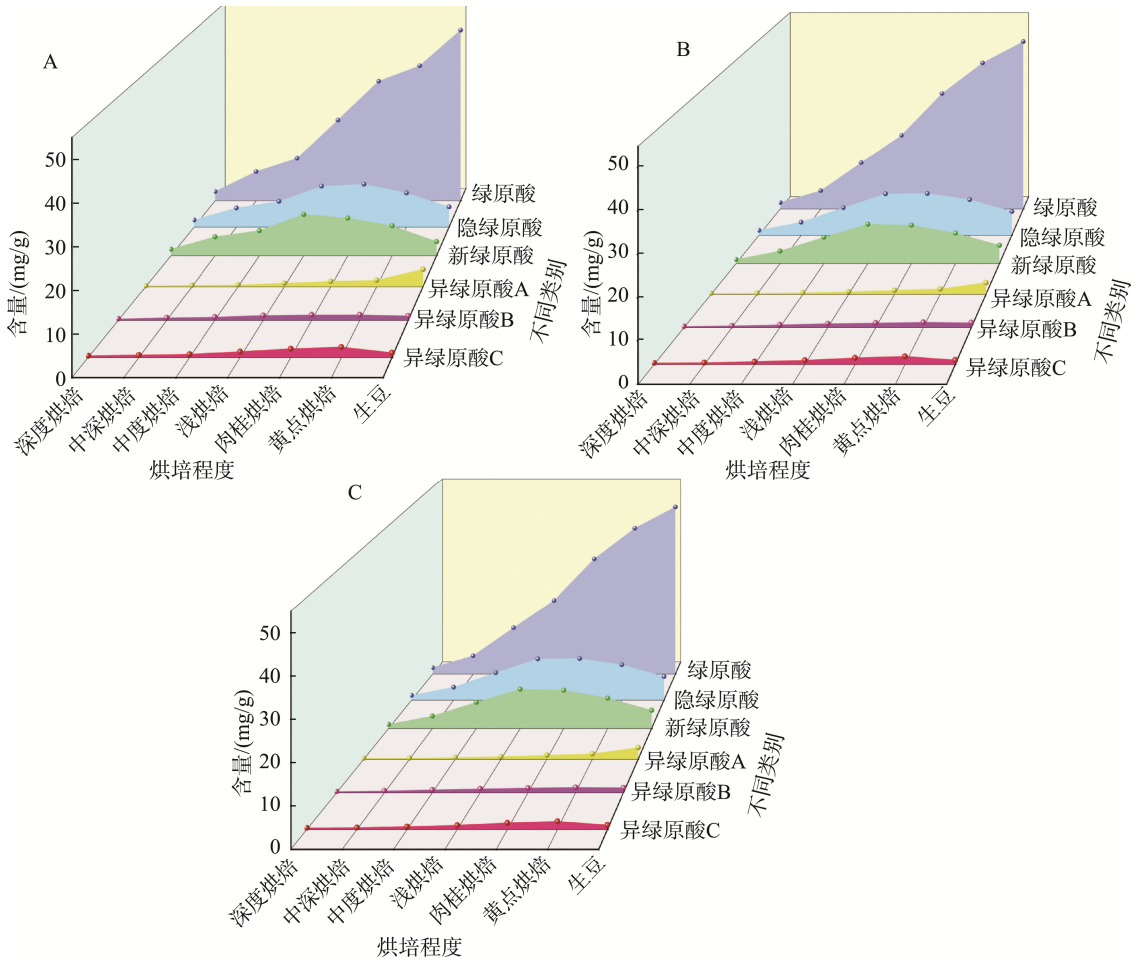


图 6 不同烘焙程度下各咖啡品种的绿原酸总含量变化

Fig.6 Changes in total chlorogenic acid content of different *Coffea arabica* L. varieties under different roasting degrees



注：A. 萨奇姆；B.卡蒂姆；C.卡杜拉。

图 7 不同烘焙程度下各咖啡品种的 6 种绿原酸含量变化

Fig.7 Changes in 6 kinds of chlorogenic acid content of different *Coffea arabica* L. varieties under different roasting degrees

酸 A 的含量随着烘焙程度的增加呈降低趋势; 新绿原酸和隐绿原酸的含量由生咖啡豆至浅烘焙阶段随烘焙程度的增加而增加, 浅度烘焙后若继续增大烘焙度, 其含量反而降低; 异绿原酸 B 和异绿原酸 C 由生豆至黄点烘焙阶段含量增加, 继续增加烘焙度后其含量则呈下降趋势。结果表明, 随着烘焙程度的增加, 绿原酸总量呈下降趋势, 但各单体在烘焙过程中含量变化存在差异, 此单体特异性变化规律与罗发美等[32]的研究结果一致, 验证了在烘焙过程中, 绿原酸等酚酸类化合物的化学稳定性较差, 其结构中有酯键、多元酚和不饱和双键基团, 容易在加热、光照等条件下发生降解和异构化[33]。

3　结　论

烘焙是咖啡的核心加工工艺, 直接决定咖啡的最终饮用品质。咖啡烘焙品质是其营养特性(营养成分的保留、转化与损耗)与风味感官特征(香气、滋味、色泽等)的综合体现。烘焙高温过程中, 美拉德反应是驱动咖啡品质形成的核心化学反应, 该反应以咖啡内源氨基酸与还原糖为底物, 既是咖啡特征风味与标志性棕褐色泽形成的核心动因, 也是烘焙过程中底物消耗、营养物质定向转化的关键机制。

本研究通过测定 3 种小粒种咖啡生豆和黄点烘焙、肉桂烘焙、浅烘焙、中度烘焙、中深烘焙和深度烘焙共 6 种烘焙豆中不挥发物质绿原酸、总黄酮、多酚、多糖和游离氨基酸的含量, 系统分析各成分随烘焙程度变化的规律。经研究发现, 随烘焙程度的增加, 3 种小粒种咖啡中咖啡碱含量变化整体上不显著; 游离氨基酸、总黄酮、绿原酸含量均呈现显著下降趋势; 多酚含量在部分烘焙阶段略有波动, 总体呈下降趋势; 多糖含量呈现“先下降后显著上升”的“双阶段”特征。表明浅度烘焙能有效保留绿原酸、黄酮等活性成分, 维持咖啡较高的抗氧化活性。研究结果可为明确烘焙工艺与咖啡品质的关联、实现咖啡品质精准调控及精深产品开发提供数据支撑与理论依据。

本研究所有样本数据均以扣除水分的干基计, 保障了数据准确性与研究科学性。研究仅选取云南普洱思茅区日晒处理的 3 种小粒咖啡, 供试品种比较单一, 可能会影响结果的代表性; 同时测定的总黄酮、总多酚等指标均为混合性组分, 无法精准表征单体化合物特征。综合上述研究结果与讨论分析, 本研究可为咖啡豆不同烘焙程度的综合开发与高效利用提供一定的理论参考与实践指导; 但针对咖啡单一化学成分在加工、贮藏全流程中的动态变化规律, 仍需从分子层面开展更系统、深入的研究, 以期实现咖啡品质形成与物质转化机理的突破性解析。

参考文献

[1] 黄家雄, 李贵平, 杨世贵. 咖啡种类及优良品种简介[J]. 农村实用技术, 2009(1): 42–43.
HUANG JX, LI GP, YANG SG. Introduction to coffee types and superior varieties [J]. Practical Rural Technologies, 2009(1): 42–43.

[2] CIARAMELLI C, PALMIOLI A, AIROLDI C. Coffee variety, origin and extraction procedure: Implications for coffee beneficial effects on human health [J]. Food Chemistry, 2019(278): 47–55.

[3] 李莎莎, 于娟, 谭淑瑜, 等. HPLC 法测定不同产地咖啡中咖啡因、咖啡酸及绿原酸的含量[J]. 江西中医药大学学报, 2017, 29(1): 90–93.
LI SS, YU J, TAN SY, *et al*. Determination of caffeine, caffeic acid and chlorogenic acid contents in coffee from different origins by HPLC [J]. Journal of Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 29(1): 90–93.

[4] WIERZEJSKA RE, GIELECIŃSKA I. Evaluation of the caffeine content in servings of popular coffees in terms of its safe intake-can we drink 3-5 cups of coffee per day, as experts advise? [J]. Nutrients, 2024, 16(15): 2385.

[5] 陈云兰, 李积华, 陈文进, 等. 云南 4 个产区咖啡豆的主要风味成分及感官品质分析[J]. 热带作物学报, 2024, 45(7): 1445–1454.
CHEN YL, LI JH, CHEN WJ, *et al*. Analysis of main flavor components and sensory quality of coffee beans from four production areas in Yunnan [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(7): 1445–1454.

[6] WEINBERGER M, QUERALT I, STRELI C, *et al*. Critical evaluation of energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry for multielemental analysis of coffee samples: Sample preparation, quantification and chemometricapproaches [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2024(215): 106898.

[7] 张桅儇, 吴国泰, 王晓禹, 等. 咖啡豆化学成分发现及药用价值研究现状[J]. 中国野生植物资源, 2022. 41(5): 57–66.
ZHNAG GX, WU GT, WANG XY, *et al*. Research status on the discovery of chemical components in coffee beans and their medicinal value [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2022. 41(5): 57–66.

[8] DA-COSTA CAR, PINHEIRO FS, DA SILVA LGM, *et al*. Evaluation of physicochemical properties, bioactive compounds, and antioxidant activity in traditional and decaffeinated coffeeblends from the Cerrado Mineiro Region in Brazil [J]. Food and Humanity, 2024, 3: 100388.

[9] 倪键. 绿茶和咖啡提取物协同降糖效果、机理及其复合产品的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
NI J. Synergistic hypoglycemic effects of green tea and coffee extracts, their mechanisms, and research on their composite products [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.

[10] 朱艳萍, 杨丽聪, 林乐珍, 等. 咖啡碱和绿原酸对高脂饮食小鼠体重、脂类沉积及肝脏脂质代谢基因表达的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 162–167.
ZHU YP, YANG LC, LIN LZ, *et al*. Research status on the discovery of chemical components in coffee beans and their medicinal value [J]. Food Science, 2017, 38(9): 162–167.

[11] 段仪, 刘秦明, 卢开华, 等. 咖啡生物活性物质及其健康功效研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 11–21.
DUAN Y, LIU QM, LU KH, *et al*. Research progress on coffee bioactive substances and their health benefits [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 11–21.

[12] MARTINS BC, SOARES AC, MARTINS FF, *et al*. Coffee consumption prevents obesity-related comorbidities and attenuates brownadipose tissue whitening in high-fat diet-fed mice [J]. The Journal of Nutritional

Biochemistry, 2023, 117: 109336.

[13] DRANOFF JA. Coffee, adenosine, and the liver [J]. Purinergic Signalling, 2024, 20(1): 21–28.

[14] 缪亚平. 2025 年云南咖啡出口量值均居全国第一[N]. 昆明日报, 2026-01-29(A04).
MIU YP. In 2025, Yunnan ranked first nationwide in both volume and value of coffee exports [N]. Kunming Daily, 2026-01-29(A04).

[15] TARIGAN EB, WARDIANA E, HILMI YS, *et al*. The changes in chemical properties of coffee during roasting: A review [C]//IOP conference series: Earth and environmental science [J]. IOP Publishing, 2022, 974(1): 012115.

[16] 刘兴勇, 陈兴连, 林涛, 等. 烘焙程度对小粒咖啡 5-羟甲基糠醛生成的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 324–331.
LIU XY, CHEN XL, LIN T, *et al*. The effect of baking degree on the formation of 5-hydroxymethyl furfural in arabica coffee [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 324–331.

[17] RUSINEK R, DOBRZANSKI JB, GAWRYSIAK-WITULSKA M, *et al*. Effect of the roasting level on the content of bioactive and aromatic compounds in Arabica coffee beans [J]. International Agrophysics, 2024, 38(1).

[18] ALCANTARA NRMG, MARTINS CL, GOMES CPW, *et al*. Effect of roasting on chemical composition of coffee [J]. Food Chemistry, 2025, 477: 143169.

[19] 张琪. 不同烘焙度及萃取工艺对海南罗布斯塔咖啡冲泡品质的影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2023.
ZHANG Q. Study on the effects of different roasting levels and extraction processes on the brewing quality of Hainan robusta coffee [D]. Haikou: Hainan University, 2023.

[20] 施雪颖, 李娜, 李玥, 等. 烘焙程度对云南日晒和水洗咖啡豆理化性质及风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(12): 396–413.
SHI XY, LI N, LI Y, *et al*. The effect of roasting degree on the physicochemical properties and flavor substances of yunnan sun-dried and washed coffee beans [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(12): 396–413.

[21] 顾颖, 李建伟, 侯英, 等. 烘焙程度对云南小粒种咖啡挥发性成分、有机酸和感官品质的影响[J]. 热带农业科技, 2025, 48(3): 32–39.
GU Y, LI JW, HOU Y, *et al*. The effect of roasting degree on volatile components, organic acids and sensory quality of yunnan small-grain coffee [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2025, 48(3): 32–39.

[22] 王春华, 肖瀛, 孙斌, 等. 烘焙度对咖啡干预高脂膳食小鼠脂代谢与肠道菌群的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(14): 197–206.
WANG CH, XIAO Y, SUN B, *et al*. Effect of coffee extracts with different roasting degrees on lipid metabolism and gut microbiota in high-fat fed mice [J]. Food Science, 2025, 46(14): 197–206.

[23] MITRA S, NASKAR N, GHOSH K, *et al*. Studies on radiation stability of natural caffeine [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2022, 183: 110148.

[24] KATO H, RHUE MR, NISHIMURA T. Role of free amino acids and peptides in food taste [Z]. 1989.

[25] 严翔, 杜琪珍, 尹军峰, 等. 烘焙对绿茶、红茶、乌龙茶品质成分影响及其机制研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(7): 54–62.
YAN X, DU QZ, YIN JF, *et al*. Research progress on the effects of baking on the quality components of green tea, black tea and oolong tea and its mechanism [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(7): 54–62.

[26] 周慧琳. 热加工和甜味剂对鲜花饼馅料理化性质、多酚组成及其生物可及性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2024.
ZHOU HL. Effects of heat processing and sweeteners on the physicochemical properties, polyphenol composition and bioavailability of fresh flower cake filling [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2024.

[27] VOLF I, IGNAT I, NEAMTU M, *et al*. Thermal stability, antioxidant activity, and photo-oxidation of natural polyphenols [J]. Chemical Papers, 2014, 68(1): 121–129.

[28] CHAABAN H, IOANNOU I, CHEBIL L, *et al*. Effect of heat processing on thermal stability and antioxidant activity of six flavonoids [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(5): e13203.

[29] SUN J, JIANG Y, WANG B, *et al*. Structural characterization of the polysaccharides from *Atractylodes chinensis* (DC.) Koidz. and the protective effection against alcohol-induced intestinal injury in rats [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282(Pt 1): 136641.

[30] 彭佩瑾, 闫媛, 安广涛, 等. 中药的美拉德反应综述: 机制、历程、产物、药理或毒理、分析与调控[J/OL]. 辽宁中医药大学学报. 1–21. [2026-03-01]. https: //link.cnki.net/urlid/21.1543.R.20240410.1758.006
PENG PJ, YAN Y, AN GT, *et al*. Review of Maillard reaction in traditional Chinese medicine: Machine-processed, course, outcome, pharmacodynamics or toxicology, analysis and regulation [J/OL]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 1–21. [2026-03-01]. https://link.cnki.net/urlid/21.1543.R.20240410.1758.006

[31] BOTHARA SB, SINGH S. Thermal studies on natural polysaccharide [J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2012, 2(2): S1031–S1035.

[32] 罗发美, 谭文涵, 金红芳, 等. 基于高效液相色谱法分析烘焙程度对咖啡中绿原酸含量的影响[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(4): 102–110.
LUO FM, TAN WH, JIN HF, *et al*. Influence of baking degree on the content of chlorogenic acid in coffee by high performance liquid chromatography [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(4): 102–110.

[33] BUDRYN G, NEBESNY E, ORACZ J. Correlation between the stability of chlorogenic acids, antioxidant activity and acrylamide content in coffee beans roasted in different conditions [J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(2): 290–302.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)