

肖克, 翟慧楠, 胡荣锁, 等. 不同初加工方法对咖啡豆风味化合物和感官特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 22–32. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040146

XIAO Ke, ZHAI Huinan, HU Rongsuo, et al. Effect of Different Primary Processing Methods on Flavor Compounds and Sensory Characteristics of Coffee Beans[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 22–32. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040146

·特邀主编专栏—咖啡、可可、茶等特色饮料作物加工（客座主编：董文江、许勇泉、付才力）·

不同初加工方法对咖啡豆风味化合物和感官特性的影响

肖克¹, 翟慧楠², 胡荣锁^{2,3}, 于鑫欣^{2,3,*}, 董文江^{2,3,4,*}

(1. 宁夏大学食品科学与工程学院 宁夏食品微生物应用技术与安全控制重点实验室,
宁夏银川 750021;

2. 中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533;

3. 海南省特色热带作物适宜性加工与品质控制重点实验室, 海南万宁 571533;

4. 国家重要热带作物工程技术研究中心, 海南万宁 571533)

摘要: 本研究旨在探究不同初加工处理方法对阿拉比卡咖啡理化特性、风味和感官特性的影响。通过电子鼻和感官分析评价不同初加工咖啡样品的感官风味, 主成分分析 (PCA) 对不同初加工方法进行区分, 并利用皮尔逊相关系数分析初加工方法与产生的风味化合物之间的关系。结果表明, 在理化指标方面, 不同初加工方法对咖啡样品的总可滴定酸度 (TA)、总可溶性固形物 (TSS) 和 pH 具有显著影响 ($P < 0.05$), 其中, 湿法加工 (CS) 的 pH 最高。初加工方法对咖啡样品中的生物碱、绿原酸和有机酸等风味化合物含量影响较大, 干法处理 I (GA) 的咖啡因含量最高 (12.32 mg/g DW), 蜜处理 I (MA) 拥有最高的葫芦巴碱含量 (3.71 mg/g DW), 湿法加工 (CS) 导致咖啡样品具有最低的绿原酸含量和最高的有机酸含量。此外, 电子鼻结果显示, 不同初加工方法制备的咖啡香气化合物含量差异显著, 相较于人工评测, 电子感官分析可以更有效地对不同初加工方法进行区分。该研究结果明晰了不同初加工方法对咖啡的化学组成及感官风味的影响, 对咖啡风味品质提升及对优质产品的筛选和鉴别具有重要意义。

关键词: 阿拉比卡咖啡, 初加工处理, 理化特性, 风味化合物, 电子感官

中图分类号: TS273

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)01-0022-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040146



本文网刊:

Effect of Different Primary Processing Methods on Flavor Compounds and Sensory Characteristics of Coffee Beans

XIAO Ke¹, ZHAI Huinan², HU Rongsuo^{2,3}, YU Xinxin^{2,3,*}, DONG Wenjiang^{2,3,4,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Ningxia University, Ningxia Key Laboratory of Food Microbial Application Technology and Safely Control, Yinchuan 750021, China;

2. Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning 571533, China;

3. Key Laboratory of Suitability Processing and Quality Control of Characteristic Tropical Crops,
Wanning 571533, China;

4. National Center of Important Tropical Crops Engineering and Technology Research, Wanning 571533, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of different primary processing methods on the

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 云南省重大科技专项计划 (202302AE090004); 中国热带农业科学中心中国热带农业科学院科技创新团队 (CATASCXTD202404); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1630142024010); 农业技术示范与服务支持-热带特色富民作物产业减损增效技术试验示范 (102125221630140009006)。

作者简介: 肖克 (1993-), 男, 硕士, 研究方向: 微生物发酵, E-mail: 1464497071@qq.com。

*** 通信作者:** 于鑫欣 (1994-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品组分互作及功能特性分析, E-mail: xxy46455651@163.com; yuxh@catas.cn。

董文江 (1985-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品风味化学、食品组分相互作用, E-mail: dongwenjiang.123@catas.cn。

physicochemical properties, flavor and sensory characteristics of Arabica coffee. The sensory flavor of coffee samples from different primary processing methods were evaluated by E-nose and sensory evaluation, principal component analysis (PCA) was used to differentiate different primary processing methods, and Pearson's correlation coefficients were used to analyze the relationship between the primary processing methods and the flavor compounds produced. The results showed that in terms of physicochemical indexes, different primary processing methods had significant ($P<0.05$) effects on total titratable acidity (TA), total soluble solids (TSS) and pH value of the coffee samples, with wet processing (CS) having the highest pH value. Primary processing methods had a significant effect on the content of flavor compounds such as alkaloids, chlorogenic acid and organic acids in the coffee samples, with dry processing I (GA) having the highest caffeine (12.32 mg/g DW), honey processing I (MA) having the highest fenureek (3.71 mg/g DW), and wet processing (CS) resulting in coffee samples having the lowest chlorogenic acid and the highest organic acid. In addition, the E-nose results showed that the contents of aroma compounds of coffee prepared by different primary processing methods were significantly different, and the E-sensory analysis could be more effective in distinguishing different primary processing methods than manual evaluation. The results of this study clarified the effects of different primary processing methods on the chemical composition and sensory flavor of coffee, which was of great importance for the enhancement of coffee flavor quality and the classification and identification of high-quality products.

Key words: Arabica coffee; primary processing; physicochemical properties; flavor compounds; electronic sensory

咖啡以其独特的风味享誉全球,在许多国家的餐饮文化中均具有重要意义。它与可可和茶一起并称为世界上三大饮料。随着全球需求的增加,中国的咖啡种植产业取得了长足的进步。云南省和海南省是中国主要咖啡种植区,阿拉比卡咖啡(*Coffea arabica* L.)和罗布斯塔咖啡(*Coffee Robusta Linden*)皆有广泛的种植。仅云南省就贡献了中国咖啡豆种植面积和产量的 98% 以上,主要集中在普洱、宝山、德宏、临沧和怒江等地区。云南省总产量为 10.91 万吨,巩固了咖啡产业在八大主流典型产业中的地位^[1]。咖啡富含多种生物活性物质,如生物碱、多酚、萜烯、氨基酸和有机酸等化合物,这些物质除了能够对人体健康产生积极作用以外^[2],还赋予了咖啡独特的风味。

咖啡风味感官主要由冲泡过程中释放的化学成分所决定。咖啡豆的化学成分受到品种、环境、果实成熟度、收获方法和储存条件等因素的影响^[3]。从咖啡种植到储存的各个生产阶段都可以通过适量的干预来提高咖啡的质量。咖啡的初级加工包括去皮、脱胶、发酵和干燥,其目的是将咖啡鲜果转化为咖啡生豆^[4]。这个过程减少了咖啡豆的水分,并去除了咖啡豆周围的保护性外层(外壳、果肉、粘液和果皮),使它们更稳定、更适合储存、运输和烘焙^[5]。初加工所采用的工艺类型取决于生产区域、农场基础设施、气候条件、土壤以及种植品种。不同的咖啡初加工方法会导致咖啡果实中风味前体、微生物种类和活性的变化,从而引起咖啡最终风味的变化^[6]。因此,咖啡初加工方法会直接影响咖啡的风味和香气变化,从而进一步影响到咖啡的质量^[6]。一般来说,通常使用三种类型的咖啡初加工方法来制备生咖啡豆:湿法、干法和半干法(蜜处理)。湿法加工是指将去除果皮和果胶的咖啡鲜豆浸泡于水下,在经过水下发酵后再进行干燥。干法加工是指在平台上干燥整个咖啡果实。蜜处理加工是指对包含果肉的咖啡鲜豆进

行干燥^[6]。同种初加工方法在细节操作上也有些许差异,如不同的干燥方式、发酵时间、发酵菌种和脱皮脱胶程度均会导致咖啡风味物质的含量和种类的改变。以咖啡因为例,Pereira 等^[7]采用四种不同的湿法加工处理了六个海拔高度的咖啡样品,结果显示微生物发酵显著提高了咖啡因含量。Chen 等^[8]研究发现相对于浸泡发酵加工工艺,非浸泡发酵加工后的咖啡生豆中粗脂肪、粗蛋白以及咖啡因含量有所增加。综上所述,加工方法对咖啡中的化学成分有显著性的影响,而这些化学成分又会改变咖啡的风味特性。

电子鼻(E-nose)作为一种潜在的可以替代感官评测的方法已在不同的研究领域被广泛使用^[9]。基于电子鼻的有效性延伸和区分各种食物来源的能力,Xu 等^[10]利用电子鼻技术成功区分了不同发酵时间的红茶样品。电子鼻技术的应用提高了食品品种评估的准确性和效率,Xia 等^[11]通过电子鼻可以快速检测出沙棘酒和蒸馏酒的电子感官的差异,并成功区分二者。Haddi 等^[12]使用电子鼻成功区分了牛肉、山羊肉和绵羊肉。近些年电子鼻在咖啡鉴定方面也有运用,如 Dong 等^[13]使用电子鼻成功对七个罗布斯塔咖啡品种进行了区分。但对于不同初加工方式处理的咖啡豆主要滋味化学成分的组成,以及不同处理方式咖啡豆间含量的差异引起的感官变化即化学成分与感官品质间的相关性尚未得到很好的阐明。

本研究旨在探究七种初加工处理方法对云南阿拉比卡咖啡中风味化合物含量和感官特性的影响,以及二者之间的关系。采用 UPLC 检测咖啡豆中主要风味化合物的含量,在感官分析的基础上,应用电子鼻将气味化合物的感官评价数据化,旨在更客观地阐明加工方法对咖啡感官特性的影响。使用主成分分析(PCA)对不同初加工方法的咖啡进行分类,并应用皮尔逊相关系数探究不同初加工方法与产生的风味化合物之间和最终品质的关系。研究结果有助于深

入理解初加工方法对咖啡风味化合物的影响,对进一步依据风味化合物差异来区分初加工方法提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

8种绿原酸及其衍生物(绿原酸、新绿原酸、隐绿原酸、4-阿魏酰奎宁酸、5-阿魏酰奎宁酸、异绿原酸A、异绿原酸B、异绿原酸C)标准品、葫芦巴碱和咖啡因标准品 四川省维克奇生物科技有限公司;7种有机酸(草酸、酒石酸、奎尼酸、苹果酸、乙酸、柠檬酸、琥珀酸)标准品 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;甲醇(HPLC级) 美国默克公司;DPPH自由基清除能力试剂盒、总抗氧化能力(T-AOC)试剂盒 苏州格锐思生物科技有限公司;卡瑞纯化试剂试剂盒 武汉艾美捷科技有限公司;试验用水为娃哈哈纯净水 杭州娃哈哈有限公司;Whatman滤纸 英国沃特曼公司。

1290 Infinity型超高效液相色谱仪 美国安捷伦公司;AlphaM.O.S电子鼻分析系统 法国Alpha M.O.S公司;MTV-100型多管漩涡混合仪 杭州奥盛仪器有限公司;SHZ-B型恒温水浴锅 上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;PRE1Z鼓式咖啡烘焙机 德国Emmericham Rhein仪器公司;DNP-9162BS-III鼓风干燥箱 上海新苗;WF30手持折光仪 深圳威福光;VTA-6S3型咖啡豆研磨机 德国MAHLKONIG仪。

1.2 实验方法

1.2.1 样品初加工 以云南省普洱市爱伾咖啡庄园的阿拉比卡-卡蒂姆7963咖啡鲜果为原料,在最佳成熟期采摘大小和颜色(红色)一致的新鲜咖啡果实。对咖啡果进行漂洗分级,剔除有缺陷的咖啡果和杂质,采用不同的初加工方法进行加工。对咖啡果实采用七种初加工方法。传统干法处理(CG):咖啡鲜果不做任何处理直接在阳光下晒干。干法处理I(GA):咖啡鲜果厌氧发酵(咖啡鲜果放置密封桶内进行发酵处理)72 h后在通过自然光干燥直至水分含量达到10%~12%。干法处理II(GB):咖啡鲜果经过150 h的厌氧发酵后在阳光下干燥使水分含量达到10%~12%。传统湿法加工(CS):咖啡鲜果在去除果皮和果胶后进行2~3 d的室温发酵(去皮咖啡鲜果室温下泡水发酵以便脱胶),在发酵后将豆子洗净,最后晒干至水分含量10%~12%。蜜处理I(MA):咖啡鲜果在仅去除果皮后在阳光下晒干至水分含量10%~12%。蜜处理II(MB):咖啡鲜果脱去果皮后,在40℃热泵条件下干燥30 h,使其水分含量约为25.0%,再晒干使其水分含量降为10%~12%。蜜处理III(MC):咖啡鲜果脱皮后,室温干燥10 h,在30℃热泵条件下干燥18 h,使水分含量达到25.0%,最后晒干,使水分含量达到10%~12%。在本研究中,所有咖啡鲜果通过不同的初加工方法所制备,并干燥至

样品的水分含量为 11.0 ± 1.0 g/100 g DW,脱壳后即可获得绿咖啡豆用于后续研究。

1.2.2 烘焙样品 取每种初加工制备的咖啡生豆100 g样品,使用PRE1Z鼓式咖啡烘焙机进行烘焙。设置烘焙温度150℃,燃气火力5.5,烘焙时长7.5~8.0 min,使咖啡到达中等烘烤度(CM-100得分#55.0~60.0)。所有样品都使用电子咖啡研磨机进行研磨,研磨后的咖啡使用40目(425 μm)标准筛子进行筛分,以排除大颗粒。在相同的烘焙条件下,对每种中等研磨度的烘焙咖啡分别进行分析测定。

1.2.3 咖啡液制备 将150 mL水加热至93℃,与8.25 g烘焙咖啡粉混合,搅拌5 min后使用Whatman No. 1滤纸过滤,将流出液冷却至室温(25℃)即为咖啡液。

1.2.4 理化指标测定

1.2.4.1 pH 使用pH缓冲校准液(4.0和7.0)对pH计进行校准,校准后吸取40 mL咖啡液,在室温下(25℃)测定咖啡液的酸碱度。

1.2.4.2 总固形物(TS)测定 用鼓风干燥箱对蒸发皿进行干燥恒重,恒重后滴加4.0 mL咖啡液并在105℃下干燥,直到达到恒定重量,结果以百分含量(%)形式表示。

1.2.4.3 总可溶性固形物(TSS)测定 吸取适量咖啡液放置于手持折光仪的镜面上,参数稳定后直接读取,单位为°Brix。

1.2.4.4 总可滴定酸度(TA)测定 参考ISO^[14]的检测方法,烧杯中称取30 mL咖啡液,通过滴定来评估总可滴定酸度(0.1 mol/L NaOH溶液),滴定终点至溶液pH8.0,结果以消耗0.1 mol/L NaOH溶液的毫升数表示。

1.2.5 总多酚含量测定 采用福林酚比色法^[14],提取物中的总酚(TPC)单位为没食子酸当量(mg GAE/g DW),将0.20 g咖啡粉与5 mL 70%甲醇(v/v)混合,在室温下超声15 min后离心(5000 r/min, 10 min)以获得提取液,重复2次提取并混合后,获得咖啡提取物。分别将1.0 mL咖啡提取物、水(空白对照)和没食子酸标准溶液(10、20、30、40和50 μg/mL)转移至15 mL试管中,添加5.0 mL福林酚试剂(10%, v/v),并涡流30 s。反应5 min后,添加4.0 mL Na₂CO₃溶液(7.5%, v/v),涡流30 s并在室温下静置60 min。使用紫外可见分光光度计在765 nm检测样品的吸光度。根据标准没食子酸的标准曲线确定咖啡样品中的总多酚含量。

1.2.6 总黄酮含量测定 参考Qin等^[15]的比色法并稍加修改测定咖啡样品中的总黄酮含量,样品中的总黄酮(TFC)单位为芦丁当量(mg RE/g DW)。将0.50 g咖啡粉转移到50 mL离心管中,添加25 mL 60%(v/v)乙醇,并在40℃下超声处理15 min。5000 r/min的条件下离心15 min,重复2次并混合,

获得咖啡提取物。将 2.0 mL 咖啡提取物、水(空白对照)和芦丁标准溶液(25、50、100、200 和 300 $\mu\text{g/mL}$)分别转移至 25 mL 试管中。依次添加 3 mL 60%(v/v)乙醇和 1 mL NaNO_2 溶液(50 mg/mL),将混合物涡流 30 s 并静置 6 min。然后添加 1.5 mL $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液并涡流 30 s,静置 15 min。使用紫外可见分光光度计在 510 nm 处测定样品吸光度。根据标准芦丁的标准曲线确定咖啡样品中的总黄酮含量。

1.2.7 生物碱及绿原酸含量测定 参考 Clifford 等^[16]方法,采用 UPLC 测定 7 种初加工方法处理后的烘焙咖啡豆中咖啡因、葫芦巴碱和绿原酸组成及含量,结果以“mg/g DW”表示。在 0.25 g 咖啡粉中加入 25 mL 70% 的甲醇溶液,室温超声提取 30 min 后 25 $^{\circ}\text{C}$ 下离心(5000 r/min, 10 min)。取 4 mL 上清液,分别加入卡瑞试剂 I 和卡瑞试剂 II 各 0.1 mL,离心(5000 r/min, 10 min)除去蛋白质。取上清液过 0.22 μm 滤膜后进行 UPLC 检测。色谱柱为 Agilent Zorbax Eclipse Plus C_{18} (4.6 $\times$ 100 mm, 3.5 μm)。甲醇为流动相 A, 0.1% 甲酸水为流动相 B。梯度洗脱程序为 0~20 min: 5%~30% A; 20~20.5 min: 30%~35% A; 20.5~45 min: 35%~45% A; 45~50 min: 45%~95% A; 50~55 min: 95% A; 后运行时间 5 min。柱温 25 $^{\circ}\text{C}$; 流速 0.5 mL/min; 进样体积 2 μL ; 生物碱及绿原酸类 DAD 检测波长分别为 254 nm 和 325 nm。

1.2.8 有机酸含量测定 参考 Bressani 等^[17]研究方法,采用 UPLC 测定 7 种咖啡烘焙豆中 7 种有机酸(草酸、酒石酸、奎尼酸、苹果酸、乙酸、柠檬酸、琥珀酸)的组成及含量,结果以“mg/g DW”表示。5.0 g 咖啡粉溶解于 60 mL 超纯水中,在 70 $^{\circ}\text{C}$ 水浴回流提取 2.5 h,离心(4000 r/min, 10 min)后取上清液用超纯水定容至 100 mL 容量瓶,样液过 0.22 μm 水相滤膜后用于 UPLC 分析。色谱柱为 Zorbax SB-AQ 柱(4.6 $\times$ 250 mm, 5.0 μm),柱温 30 $^{\circ}\text{C}$ 。甲醇为流动相 A, 0.01 mol/L NaH_2PO_4 溶液(用 0.5 mol/L 磷酸将 pH 调至 2.0)为流动相 B, 5% 甲醇等度洗脱,流速为 0.5 mL/min, DAD 检测器波长为 210 nm,进样量 10 μL 。

1.2.9 抗氧化性测定

1.2.9.1 DPPH 自由基清除能力测定 将 0.10 g 咖啡粉放到 10 mL 离心管中,添加 5 mL 80% 甲醇(v/v),并在室温(25 $^{\circ}\text{C}$)下超声处理 15 min。在 12000 r/min 条件下离心 10 min,获得咖啡提取物。根据苏州格锐思生物科技有限公司的 DPPH 自由基清除能力试剂盒提供的方法,具体操作参照说明书。标准曲线: $y=3.0952x-0.4091$, $R^2=0.9997$, 计算公式如下:

$$\text{DPPH 自由基清除能力}(\mu\text{g Trolox/g}) = 0.323 \times (A + 0.4091) \times D$$

式中: A 为 DPPH 自由基清除率, D 为稀释倍数。

1.2.9.2 总还原力测定 将 0.10 g 咖啡粉放到 10 mL 离心管中,添加 5 mL 80% 乙醇(v/v),并在室温(25 $^{\circ}\text{C}$)下超声处理 15 min。在 12000 r/min 条件下离心 10 min,获得咖啡提取物。根据苏州格锐思生物科技有限公司的总还原力(T-AOC)试剂盒 FRAP 法提供的方法,具体操作参照说明书。标准曲线: $y=0.0375x-0.0262$, $R^2=0.9985$, 计算公式如下:

$$\text{总还原力}(\mu\text{mol Trolox/g}) = 0.36 \times (B + 0.0262) \times D$$

式中: B 为清除前吸光度-清除后吸光度, D 为稀释倍数。

1.2.10 电子鼻分析 咖啡样品气味分析通过 Fox 3000 电子鼻进行。电子鼻由模式识别软件、传感器阵列单元和一个 HS-100 自动采样器组成。传感器阵列有五种金属氧化物半导体(LY2/gCT、T30/1、T70/2、PA/2 和 P30/2),对应不同类型的敏感物质^[18]。将 1.0 g 咖啡粉样品放入 10 mL 样品瓶中,在 60 $^{\circ}\text{C}$ 下孵育 5 min。收集延迟时间为 300 s,数据收集时间为 90 s。为确保气体被完全吸收,进样器温度稳定在 70 $^{\circ}\text{C}$,单次进样量为 300 μL 。每次进样前用清洁空气清洗传感器,直至信号响应归零。

1.2.11 感官评价 参照 SCA(Specialty Coffee Association)杯测体系,对 7 种不同初加工方法处理的烘焙咖啡进行感官分析,准确称取 16.5 g 现磨咖啡粉注入 300 mL 93 $^{\circ}\text{C}$ 的热水^[19]。制备好的样品液 20 mL 盛入透明玻璃杯中,在温度下降至 20 $^{\circ}\text{C}$ 时进行气味检测。由 10 名经过训练的评委组成的评审团,根据 SCA 的杯品方案对样品进行感官评估,其中评审团的男女比例为 3:7,年龄在 29~50 岁之间。SCA 评测标准包括咖啡风味、香气、酸度、回味、醇度、一致性、均衡感、干净度、甜度和整体评价 10 个维度。根据 Bressanello 等^[19]研究指出,一致性、甜度和干净度都属于非口感范畴,因此本研究考虑将其给予满分,不进行差异性考虑。感官指标以 6 到 10 的等级进行评估(6: 难以下咽; 7: 讨厌; 8: 不喜欢也不讨厌; 9: 喜欢; 10: 很喜欢),所有 10 个感官指标的分数之和为单个样本的最终分数^[19]。

1.3 数据处理

采用 Origin 2021(Northampton, MA, USA)软件绘图,采用 SPSS 20.0(IBM Corporation, New York, NY)软件中 Duncan 多重比较进行一元方差分析并比较样品间指标的差异性($P<0.05$)。每个样品平行测定 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准偏差形式表示。

2 结果与分析

2.1 理化指标分析

TS 指样品中存在的不溶性物质,7 种不同初加工方法的烘焙咖啡豆的 TS 测定范围为 1.17%~1.58%(见表 1)。TSS 指样品中可溶解物质质量所占总质量的比例, TSS 测定值在 1.23 $^{\circ}\text{Brix}$ ~1.51 $^{\circ}\text{Brix}$ 之间,结果表明初加工方法对咖啡饮料的 TS 无显著

影响,但 3 种蜜处理咖啡的 TSS 显著少于干法加工(CG、GA、GB)和传统湿法加工(CS)。TA 是对样品中所有 H^+ 的测量值,指通过添加强碱可以中和的非解离质子。TA 的变化范围在 2.43 到 3.12 mL 之间,其中 CG 中最高。酸度是衡量一杯好咖啡的重要标准之一,均衡的酸度通常与良好的咖啡风味有关。pH 是溶液中氢离子浓度的量度。CG 样品的 pH 与其他作者报道的传统干法处理的咖啡豆的 pH 相似^[20],在相同的烘焙程度下,传统干法处理咖啡样品的 pH 显著低于湿法样品的 pH($P<0.05$)这可能与咖啡鲜果在发酵时发生微生物的有机酸代谢有关。干法 I (GA)和干法 II (GB)中,随发酵时间的增加 pH 显著降低($P<0.05$),可能是微生物发酵过程中产生的酸性物质逐步迁移到咖啡中,增加了最终产品的酸度^[21]。

表 1 不同初加工咖啡烘焙豆理化指标变化

Table 1 Physical and chemical indicators of roasted coffee beans with different primary processing

初加工方法	pH	TS(%)	TSS(°Brix)	TA(mL)
CG	5.04±0.01 ^c	1.58±0.29 ^a	1.49±0.01 ^a	3.12±0.08 ^a
GA	5.08±0.01 ^b	1.25±0.25 ^a	1.50±0.01 ^a	2.75±0.13 ^c
GB	5.00±0.01 ^d	1.42±0.14 ^a	1.51±0.01 ^a	2.98±0.08 ^{ab}
CS	5.19±0.01 ^a	1.33±0.14 ^a	1.49±0.01 ^a	2.43±0.15 ^d
MA	5.04±0.01 ^c	1.33±0.15 ^a	1.42±0.02 ^b	2.83±0.06 ^{bc}
MB	5.02±0.01 ^d	1.17±0.29 ^a	1.23±0.03 ^c	2.85±0.05 ^{bc}
MC	5.04±0.01 ^c	1.50±0.25 ^a	1.45±0.02 ^b	3.00±0.10 ^{ab}

注:表中同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 总多酚和总黄酮含量

本研究发现,初加工方法显著影响咖啡的总多酚(TPC)和总黄酮(TFC)含量($P<0.05$)(图 1),总多酚含量最高的是 CG(44.42 mg GAE/g DW)。GB 的总多酚含量最低(33.18 mg GAE/g DW),其发酵时间长达 150 h,在发酵过程中大量的多酚被微生物代谢^[22],因此导致其总多酚含量较低。MA、MB 和 MC 同为蜜处理制备,但三者的总多酚含量有明显差异。三者制备方法上的主要差异体现在干燥方法上。MA 为自然光干燥,MB 为热泵干燥,MC 则使用自然光和热泵相混合的干燥方法。由此可见,咖啡多酚的含量也受不同的干燥方法影响。相较于自然干燥,机械干燥对咖啡多酚的损耗量更大。黄酮类化合物是指分子结构上具有 $C_6-C_3-C_6$ 特点的一类多酚化合物。GB 中 TFC 含量最高(159.38 mg RE/g DW),与 TPC 结果正好相反。从图 1A 和 B 中可以看出干法发酵对 TPC 和 TFC 的影响呈相反趋势,随发酵时间增加 TPC 含量减少而 TFC 含量递增。

2.3 生物碱组成及含量变化

Ginz 等^[23]研究发现咖啡的苦味主要来源于其中的咖啡因和葫芦巴碱。咖啡因(1,3,7-三甲基黄嘌呤)是咖啡豆中的主要生物碱成分,其含量是评价咖啡品质的主要参数之一。图 2 为通过不同的初加工方法加工的咖啡豆中的咖啡因和葫芦巴碱的含量。

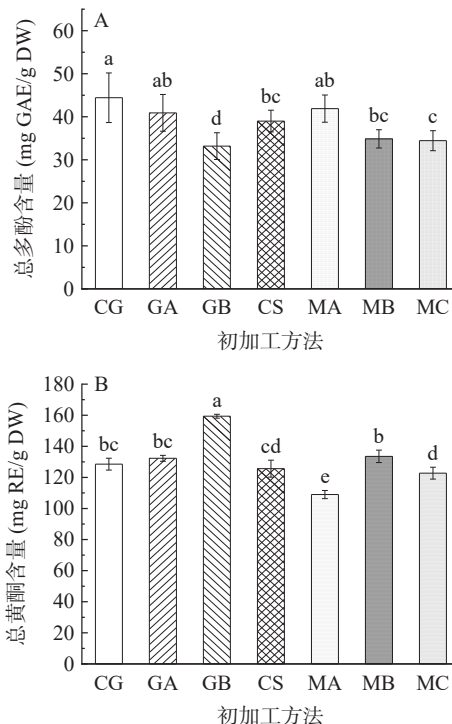


图 1 不同初加工方法咖啡样品中的总多酚和总黄酮含量

Fig.1 Total polyphenols and total flavone content in coffee samples from different primary processing methods

注:图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);图 2~图 5 同。

其中咖啡因含量范围为 11.12~12.32 mg/g DW, Ma-cheiner 等^[24]的研究同样发现,咖啡中的咖啡因含量在 10.8~13.4 mg/g DW 之间。通过长时间发酵的 GA(12.32 mg/g DW)、GB(12.24 mg/g DW)和 CS(12.22 mg/g DW)拥有较高的咖啡因含量, Wang 等^[25]研究发现微生物发酵能够显著增加茶叶中的咖啡因含量。

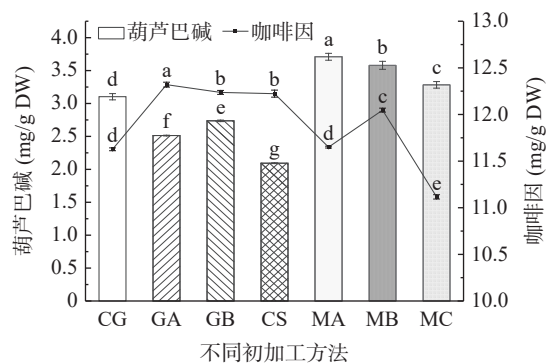


图 2 不同初加工方法咖啡样品中咖啡因和葫芦巴碱含量

Fig.2 Caffeine and trigonella content in coffee samples from different primary processing methods

葫芦巴碱(1-甲基吡啶-3-羧酸)是由烟酸的甲基化得到的咖啡中第二丰富的生物碱^[26]。如图 2 所示,MA(3.71 mg/g DW),MB(3.58 mg/g DW)和 MC(3.28 mg/g DW)这三种蜜处理制备的咖啡豆的葫芦巴碱含量显著高于其他处理($P<0.05$)。蜜处理具有较快速的干燥过程,这可能是影响葫芦巴碱含量较其他初加工方法含量高的主要因素。由于咖啡中的葫

芦巴碱在咖啡的烘焙过程中发生热降解反应,进而形成多种挥发性化合物,如烟酸、吡嗪、吡咯和吡啶^[27],这些化合物会直接影响咖啡饮品的风味和香气,这也是蜜处理咖啡具有独特风味的原因。

2.4 绿原酸组成及含量变化分析

绿原酸(CGAs)是指包括羟基肉桂酸(咖啡酸、阿魏酸和对香豆酸)和奎宁酸的多酚酯家族,CGAs是对绿咖啡豆的抗氧化特性贡献最大的化合物^[28]。咖啡豆中的咖啡酰奎宁酸(CQAs)、二咖啡酰奎宁酸(diCQAs)和阿魏酰奎宁酸(FQAs)是由碳-碳共价键在烘焙早期因热断裂而产生的绿原酸的异构体。为了观察不同的初加工方法对咖啡中绿原酸含量的影响,对 8 种 CGAs 异构体进行了定量分析。咖啡中绿原酸类化合物主要以绿原酸、新绿原酸和隐绿原酸 3 种异构体为主,三者在咖啡样品中占绿原酸异构体总量的 80% 以上,其中绿原酸占总量的 62% 左右。如图 3 所示,绿原酸(3-CQA)和新绿原酸(5-CQA)在 CG 处理制备的咖啡豆中含量最高分别为(3.53 mg/g DW)和(9.05 mg/g DW),但在 CS 中含量最低,分别为 2.03 mg/g DW 和 5.20 mg/g DW;隐绿原酸(4-CQA, 4.39 mg/g DW)在 MB 处理制备的咖啡豆中最高,这三种异构体都是由咖啡酰奎宁酸异构化形成的^[29]。5-阿魏酰奎宁酸(5-FQA)含量在 MB 豆中最高(2.42 mg/g DW),在 GA 最低(1.72 mg/g DW);而 4-阿魏酰奎宁酸(4-FQA)含量在 CG 咖啡豆中最高(0.72 mg/g DW),在 MC 中最低。异绿原酸 B(3,4-diCQA, 0.27~0.45 mg/g DW)和异绿原酸 C(4,5-diCQA, 0.15~0.28 mg/g DW)在 CG 咖啡豆中最高,在 CS 咖啡豆中最低;异绿原酸 A(3,5-diCQA)含量(0.35~0.57 mg/g DW)以 MB 豆最高。由以上结果可知,与其他初加工方法相比,CS 处理导致咖啡中大部分绿原酸异构体的含量较低。所观察到的差异可能与不同的初级加工方法影响咖啡种子内的风味前体的代谢,导致酚类物质等应激代谢物的积累或

损失有关。CS 制备咖啡总绿原酸含量最低,这些酸与咖啡饮料中的涩味、苦味和酸度有关,但并不是绿原酸含量越高,咖啡的感官品质效益就越好,低浓度 CGAs 会导致苦味,而高浓度则会导致酸味^[30]。

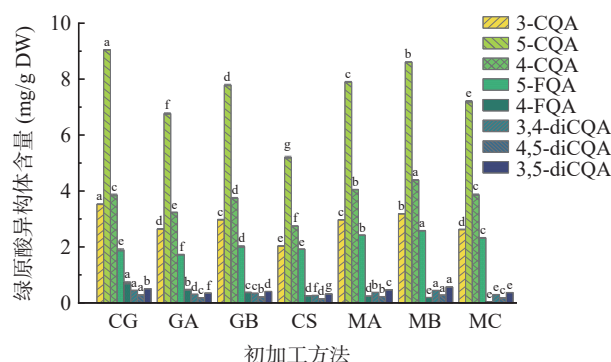


图 3 不同初加工方法咖啡样品中绿原酸异构体含量
Fig.3 Chlorogenic acid isomer content in different coffee samples from different primary processing methods

注: 3-CQA: 绿原酸; 5-CQA: 新绿原酸; 4-CQA: 隐绿原酸; 5-FQA: 5-阿魏酰奎宁酸; 4-FQA: 4-阿魏酰奎宁酸; 3,4-diCQA: 异绿原酸 B; 4,5-diCQA: 异绿原酸 C; 3,5-diCQA: 异绿原酸 A; 图 7 同。

2.5 有机酸组成和含量分析

咖啡的酸度与有机酸有关,它们会显著影响咖啡的整体风味和感官特性。图 4 显示了咖啡豆中七种有机酸的含量分布情况。常见有机酸中含量最高的是苹果酸(5.13~23.37 mg/g DW),而酒石酸(0.18~2.55 mg/g DW)的含量最低。GA、GB 处理方法中草酸的含量显著高于其他处理方法($P<0.05$),这一结果表明厌氧发酵过程有利于草酸的积累。苹果酸在蜜处理和 CS 的咖啡样品中显著高于其他处理方式($P<0.05$),四者的共同点是在初加工过程中除去了咖啡果皮,这说明咖啡果皮存在与否对咖啡中苹果酸的含量有直接影响。乙酸、苹果酸和柠檬酸是影响感知酸度的最重要的有机酸。苹果酸是一种脂肪族酸,浓度高时会使咖啡饮品产生尖酸味^[31]。柠檬酸含量

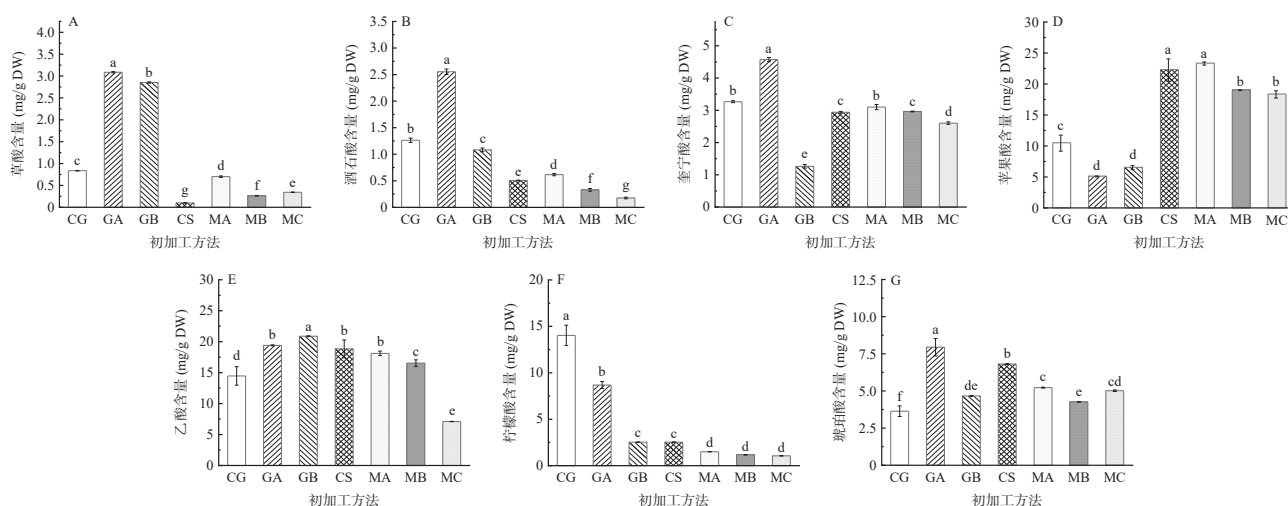


图 4 不同初加工方法咖啡样品中的有机酸含量

Fig.4 Organic acid content of coffee samples from different primary processing methods

表现出显著差异($P<0.05$),在CG处理(14.03 mg/g DW)中最高,而MC(1.06 mg/g DW)中最低。柠檬酸除了可以赋予食物酸味外,还能提供水果味和浆果味^[32]。由于咖啡果皮与果胶中含有柠檬酸,因此未脱皮的干法处理咖啡豆中的柠檬酸含量明显高于湿法处理和蜜处理。而Elhalis等^[33]的研究发现,咖啡豆的湿发酵可以通过直接提高关键前体(如有机酸、酯、醇和醛)的水平,显著提高咖啡饮料的质量、风味、香气和感官。综上所述,有机酸在咖啡豆中的含量受咖啡初加工方式的影响,进而会影响到咖啡饮料最终的口感和风味。

2.6 不同初加工方法对咖啡抗氧化活性的影响

生物系统中的抗氧化能力可以防止自由基或其他活性物质的有害作用。现阶段已有关于咖啡精深加工方法对其抗氧化的影响的研究,如Rao等^[34]对冷萃和热冲泡提取的咖啡理化和抗氧化能力进行研究,发现冷萃的低水温影响有机酸分子从咖啡基质提取到水相中,导致咖啡饮料的酸度低,但是总抗氧化能力高于热冲泡咖啡饮料。但是对不同初加工方法对咖啡抗氧化能力影响的研究较少。因此,本研究评估了不同初加工方法对咖啡抗氧化性的影响。DPPH自由基清除能力和FRAP总抗氧化能力如图5所示。结果表明,MB咖啡样品具有最高的DPPH自由基清除活性,在CS处理方法下最低。在DPPH自由基清除体系中,三个干法处理咖啡样品抗氧化活性随发酵时间增加呈递增的趋势[CG(1372.05 $\mu\text{g Trolox/g}$)<GA(1420.50 $\mu\text{g Trolox/g}$)<GB(1468.95 $\mu\text{g Trolox/g}$)]。在FRAP测定体系中,7种不同初加工方法处理的咖啡样品的抗氧化能力值(T-AOC值)差异显著($P<0.05$),其中MC处理咖啡样品的T-AOC值最高(108.64 $\mu\text{mol Trolox/g}$),显著高于其余六种处理方法($P<0.05$)。结合咖啡中的总多酚含量可以发现,总多酚含量和抗氧化性之间并无相关性。以CS为例,CS总多酚含量(37.11 mg/g DW)位于中间位置,但它的抗氧化性在2种检测方法中都是最低水平。由此可以得出烘焙咖啡中的抗氧化性不只来源于总多酚。Huang等^[35]的研究表明,抗氧化活性可能会受到其他抗氧化剂的影响,例如蛋白质、维生

素、类胡萝卜素等物质的影响,这些活性物质可以逐渐从食物基质中释放出来,从而提高样品的抗氧化能力。

2.7 电子鼻分析

电子鼻检测被认为是一种更好地区分产品中不同的风味的高效方法,已应用于许多农产品,如坚果、蔬菜和水果中味道的区分^[36]。利用电子鼻分析仪对不同初加工方法制备的咖啡样品的香气进行测试,以区分不同咖啡样品的香气差异。电子鼻分析仪有五个传感器,分别为对甲苯、二甲苯等芳香族化合物灵敏的T70/2传感器,对乙醇、氨水、胺类化合物等有机化合物灵敏的PA/2传感器,对氯化氢、酮等有机化合物灵敏的P30/2传感器,对极性化合物、氯化氢灵敏的T30/1传感器和对丙烷、丁烷等易燃气体灵敏的LY2/g CT传感器^[37]。图6显示了不同初加工方法处理的咖啡样品对电子鼻传感器响应的雷达图,不同咖啡样品的传感器响应值的显著差异象征着风味化合物的差异。其中咖啡对P30/2的响应值最高,在干法处理的CG和GA中分别高达55.7和59.32,代表CG和GA中含有大量酮类化合物,而酮类在各种蔬菜、水果和绿叶植物中可以表现出果味、牛奶和薄荷香气^[38]。LY2/g CT的响应在所有传感

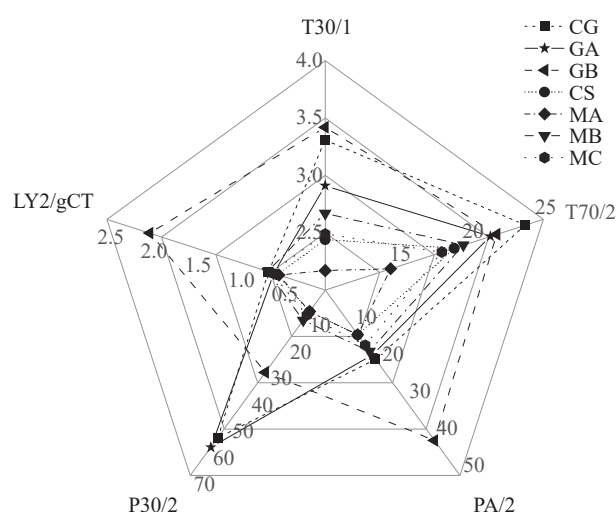


图6 不同咖啡样品的风味雷达图

Fig.6 Flavor radar map of different coffee samples

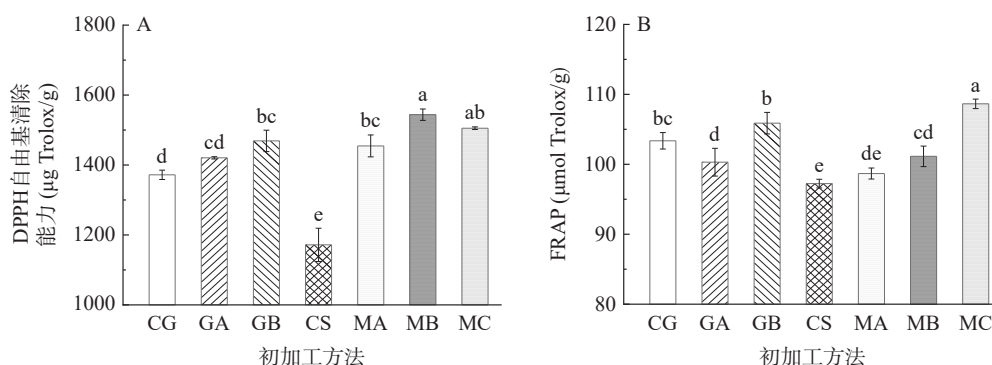


图5 DPPH 自由基清除能力和FRAP 总抗氧化能力

Fig.5 DPPH free-radical scavenging capacity and FRAP total antioxidant capacity

器中最低,证明所有咖啡样品中基本不含有危险性的可燃性气体。

在 7 种初加工方法制备的咖啡样品中,GB 具有最强的 LY2/g CT 和 PA/2 响应值,同时也是唯一一个在这 2 个传感器上有较大响应值的样品,而 GB 在 P30/2 的响应值也是最低的。这不仅代表 GB 中含有较多胺类等大量能产生令人不适的气味的化合物,同时其内部的酮类化合物的含量也较低,二者叠加会大大影响 GB 的风味。相较于其他初加工方法,GB 拥有 150 h 的超长发酵时间,而长时间发酵会导致咖啡中总挥发性有机化合物含量减少,使咖啡豆酸味减弱、低分子量糖含量下降并产生较多的酚类化合物,大大降低咖啡质量^[39]。MA 与同为蜜处理的 MB 和 MC 在对 T70/2 传感器上的响应值有所差异,MA 中芳香族化合物含量较少。MA 与 MB 和 MC 的差异主要体现在干燥方法上,由此可以看出,在蜜处理过程中,不同干燥方法会影响咖啡豆中芳香族化合物的含量,相较于日晒干燥,热泵干燥会使咖啡豆产生更多的芳香族化合物。综上所述,在初加工处理过程中的干燥过程和发酵时间的不同会导致咖啡内的生物碱、绿原酸、有机酸和总酚等化合物种类和含量上产生差异性,这些差异直接影响了咖啡的风味,致使同种类型的处理方法产生了完全不同的电子感官特性。

2.8 感官评测分析

确定不同初加工咖啡样品间存在的实际感官差异,根据 SCA 标准对咖啡的主要感官特征进行杯测,分别对香气、风味、酸度、醇度、余韵、均衡感以及整体进行评分,并获得最终分数“总分”。通过 7 种不同初加工处理获得的咖啡饮料的感官分析结果如表 2 所示。对不同指标的评分在 7.28~7.75 范围之间,感官评分整体偏差较小,说明咖啡的整体感官质量较稳定。根据 SCA 评分标准,所有咖啡的最终评价均高于 80 分,说明这些咖啡样品为精品咖啡^[37]。

通过 GA(83.13)处理的咖啡饮料的最终得分高

于其他处理的咖啡饮料的得分,CG(81.67)处理咖啡得分最低。CG 的香气(7.28)和酸度(7.38)均低于 CS 处理样品的香气(7.46)和酸度(7.64),这些结果与其他研究报告的结果一致,研究表明,通过传统湿法加工的咖啡比传统干加工的咖啡具有更高的酸度和更多的香气^[40]。余韵是指是咖啡吸吸入喉后感受的香气,停留在口腔可感受到的味觉、触觉甚至残留鼻腔的气息。GA 样品中的余韵(7.68)得分最高,MB 的余韵最低(7.43);风味是指吸吸入口中感受的香气,整体风味感受,包括香气和滋味,GB 的风味(7.65)得分最高。随着厌氧发酵时间增加,其风味和醇度的强度显著增加,而余韵和均衡感强度逐渐降低。GA 和 GB 处理过程中的发酵时间影响咖啡饮料的感官特征,微生物活动会产生影响咖啡的化学成分的最终代谢产物^[41]。微生物衍生的代谢物可以扩散到咖啡豆中,并在烘焙过程后保留下来,对咖啡饮料的风味品质起着重要作用。尽管初加工方法存在差异,但所评估的咖啡冲泡饮料具有相似的感官得分。这种相似性可能与地理区域、气候特征、海拔高度等方面的特定和独特组合有关,这使得无法通过单纯的人工评测对不同初加工方法的咖啡进行区分。证明相较于人工评测,电子感官分析可以更有效地对咖啡种类进行区分。

2.9 统计分析

为了揭示和区分各种初级加工方法导致咖啡豆的品质差异,根据生物碱、有机酸、总酚和总黄酮等指标,采用 PCA 将不同初加工方法的样品进行分类。PCA 有助于解释异质性和分析具有复杂关系因素的样本。采用评分图和载荷图来解析样品之间的差异。如图 7A 所示的 PCA 得分图中,前两个主要成分 PC1(40.10%)和 PC2(33.20%)累积方差贡献率为 73.30%。蜜处理下的三种初加工方法 MA、MB、MC 和 CS 在 PC2 负象限中,同时三种蜜处理方法与 CG 也处于 PC1 正象限中,说明蜜处理方法在部分化学成分上与 CG 和 CS 有相似性。三种蜜处理方法可以与其他初加工处理的咖啡清楚地分开。此

表 2 不同初加工咖啡饮料的感官评分

Table 2 Evaluations of coffee beverages produced by different primary methods

感官测评指标	CG	GA	GB	CS	MA	MB	MC
香气	7.28±0.14 ^a	7.38±0.11 ^a	7.43±0.09 ^a	7.46±0.17 ^a	7.51±0.34 ^a	7.41±0.10 ^a	7.49±0.23 ^a
风味	7.35±0.14 ^a	7.57±0.17 ^{ab}	7.65±0.15 ^a	7.50±0.21 ^{ab}	7.37±0.09 ^b	7.43±0.12 ^{ab}	7.53±0.25 ^{ab}
酸度	7.38±0.12 ^a	7.58±0.27 ^a	7.65±0.16 ^a	7.64±0.22 ^a	7.57±0.23 ^a	7.48±0.09 ^a	7.53±0.32 ^a
醇度	7.32±0.06 ^b	7.54±0.08 ^a	7.56±0.15 ^a	7.57±0.15 ^a	7.50±0.16 ^a	7.38±0.22 ^{ab}	7.48±0.23 ^{ab}
余韵	7.48±0.17 ^{ab}	7.68±0.16 ^a	7.53±0.17 ^{ab}	7.48±0.15 ^{ab}	7.54±0.11 ^{ab}	7.43±0.03 ^b	7.59±0.09 ^b
均衡感	7.29±0.13 ^b	7.63±0.15 ^a	7.45±0.12 ^{ab}	7.42±0.11 ^{ab}	7.35±0.04 ^b	7.35±0.11 ^b	7.48±0.13 ^{ab}
一致性	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00
甜度	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00
干净度	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00	10.00±0.00
整体评价	7.57±0.10 ^{ab}	7.75±0.19 ^a	7.61±0.14 ^{ab}	7.66±0.13 ^{ab}	7.56±0.12 ^{ab}	7.45±0.08 ^b	7.56±0.11 ^{ab}
总分	81.67±0.42 ^a	83.13±0.55 ^a	82.88±0.3 ^a	81.98±2.46 ^a	82.40±0.55 ^a	81.93±0.39 ^a	82.66±0.56 ^a

注:表中同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

结果与电子鼻结果相同,由此可得出生物碱、有机酸、总多酚和总黄酮的含量对咖啡的风味有直接影响。

图 7B 显示了所选定性指标如何能够区分不同初加工方法的咖啡,其中每个变量的方向和长度(特征向量)表示每个质量指标的相对贡献。由图可知,利用琥珀酸含量可以清楚地将 CS 咖啡与其他初加工方法的咖啡区分开来。而三种蜜处理加工方法下的咖啡豆也可以通过苹果酸,葫芦巴碱和 5-阿魏酰奎宁酸的含量来与其他初加工法下的咖啡豆进行区分。因此,有机酸和绿原酸异构体的含量能够有效区分咖啡的初加工方式。

咖啡饮料的口感质量是其化学特征的反映,为了了解感官质量与化学成分相关性以及化学成分与抗氧化活性相关性,进行了 Pearson 相关性分析(图 7C),其中红色表示正相关,蓝色表示负相关,颜色越深表示相关性越大。相关系数的绝对值越大,相关性就越强,相关系数越接近 1 或-1,相关性就越强,相关系数越接近 0,相关性就越弱。Cortés 等^[42]指出咖啡豆中咖啡因和葫芦巴碱的浓度与所有杯测质量属性呈负相关,而绿原酸(5-CQA)与其相反,改善了所有杯测质量属性,尤其是酸度。而本研究结果显示,咖啡因、葫芦巴碱与咖啡感官间无相关性,而绿

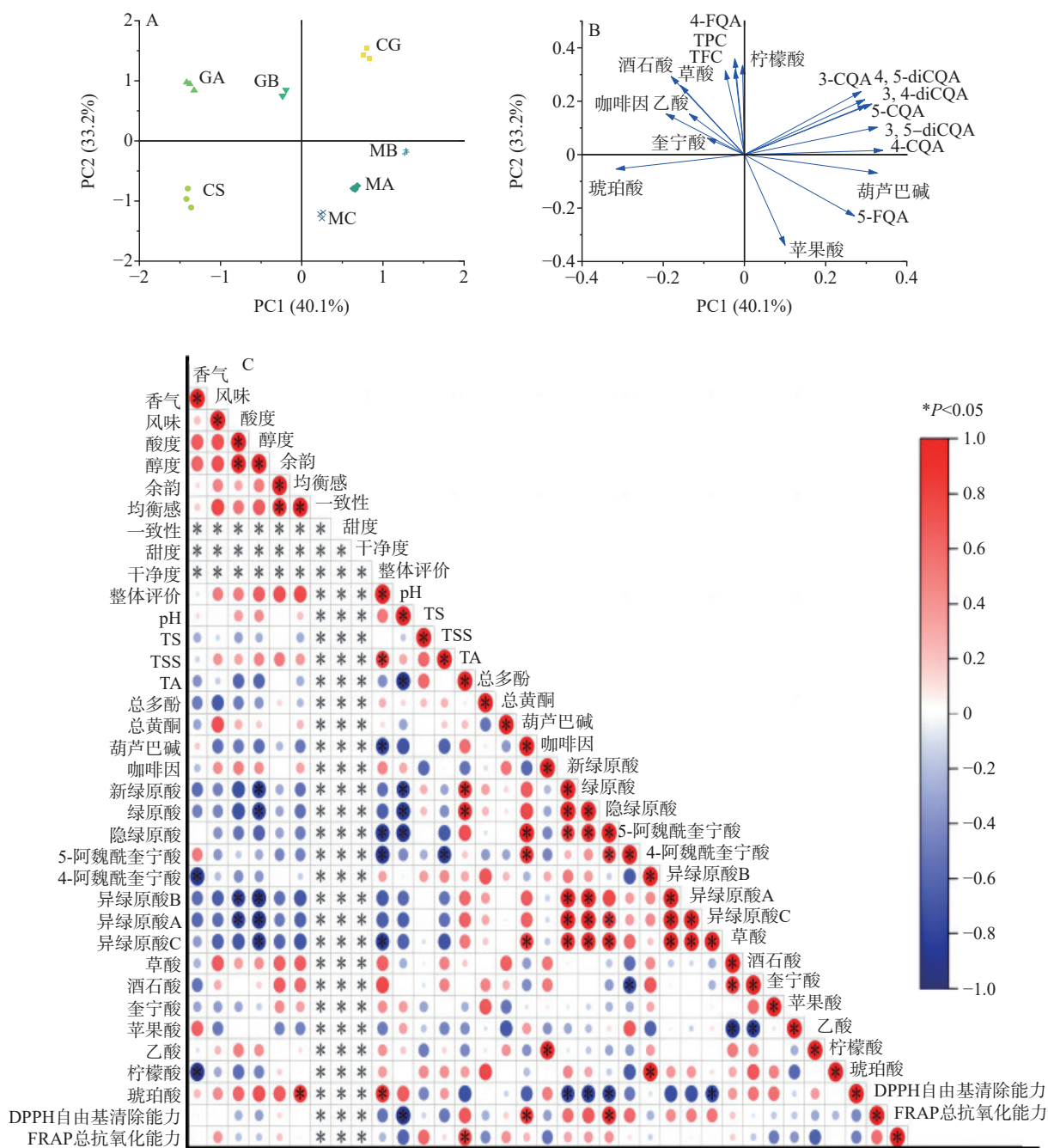


图 7 初加工方法对风味化合物的影响

Fig.7 Effect of primary processing methods on flavor compounds

注: (A)不同初加工方法咖啡样品中风味成分的 PCA 得分图; (B)不同初加工方法咖啡样品风味成分的 PCA 载荷图; (C)化学成分与抗氧化活性及感官的相关性分析, 图中*表示差异显著 $P < 0.05$ 。

原酸及其异构体大部分与咖啡醇度呈显著负相关($P<0.05$),柠檬酸与 4-FQA 与咖啡香气呈显著负相关($P<0.05$)。琥珀酸与咖啡的均衡感和整体评价呈现显著正相关($P<0.05$),葫芦巴碱和隐绿原酸与 DPPH 自由基清除能力呈现显著正相关($P<0.05$)。且 de Gaulejac 等^[43]研究发现,抗氧化活性通常随着酚类含量和羟基数量的增加而增加。综上所述,咖啡感官评分与大多数指标无直接相关性,各理化指标间也无明显的对应关系,表明并不是滋味化学成分含量越高/低,咖啡感官品质越好/坏,而多种组分间较平衡地相互作用可能使咖啡口感滋味更均衡,从而获得更高的感官得分,因此,了解咖啡豆的物理和化学特性可以用来调节咖啡饮品的质量属性。

3 结论

本研究采用 UPLC、感官分析和电子鼻探究了不同初加工方法对咖啡风味化合物含量和感官特性的影响,探讨了感官特性与初加工方法的关系,同时采用电子感官分析根据特征化合物对初加工方法进行区分。研究发现不同初级加工方法间的总多酚、总黄酮、有机酸和生物碱含量存在显著差异($P<0.05$),但咖啡的总多酚含量和抗氧化性之间并无相关性。MC 和 GA 具有最低和最高含量的咖啡因,葫芦巴碱含量在 MA 中最高,CS 咖啡具有最低的绿原酸含量和最高的有机酸含量。GA、GB 由于厌氧发酵处理导致其咖啡样品的草酸含量显著高于其他处理方法($P<0.05$),咖啡果皮的存在直接影响咖啡中苹果酸的含量。CS 和 MA、MB 和 MC 处理咖啡样品具有相似的风味感官。电子鼻可以通过传感器数值精确地区分出不同的咖啡样品,但是感官评测则无法精准对咖啡样品进行区分,依据琥珀酸含量能够将 CS 与其他 6 种初加工方式显著区分。在本研究中,咖啡感官评分与大多数指标无直接相关性,各理化指标间也无明显的对应关系,多种组分间的相互作用可能使咖啡口感滋味更均衡,因此,进一步探索咖啡豆的物理和化学特性与感官的关系有利于调控咖啡的整体品质。

© The Author(s) 2025. 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] CHEN M, MAI B Y, LU J N, et al. Characterization of the volatile organic compounds produced from green coffee in different years by gas chromatography ion mobility spectrometry[J]. *RSC-Advances*, 2022, 12: 15534–15542.
- [2] HU G L, WANG X, ZHANG L, et al. The sources and mechanisms of bioactive ingredients in coffee[J]. *Food & Function*, 2019, 10: 3113–3126.
- [3] XU S, LIU Y Z, MA F W, et al. Impact of agro-forestry systems on the aroma generation of coffee beans[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 968783.
- [4] WU H, GU J, BK A, et al. Effect of processing on bioaccessibility and bioavailability of bioactive compounds in coffee beans[J]. *Food Bioscience*, 2022, 46: 101373.
- [5] BASTIAN F, HUTABARAT O S, DIRPAN A, et al. From plantation to cup: Changes in bioactive compounds during coffee processing[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2827.
- [6] PEREIRA T S, BATISTA N N, SANTOS P L P, et al. Self-induced anaerobiosis coffee fermentation: Impact on microbial communities, chemical composition and sensory quality of coffee[J]. *Food Microbiology*, 2022, 103: 103962.
- [7] PEREIRA L L, GUARÇONI R C, PINHEIRO P F, et al. New propositions about coffee wet processing: Chemical and sensory perspectives[J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125943.
- [8] CHEN Y L, CHEN Z H, JIANG K L, et al. Influence of different primary process on the quality of arabica coffee in Yunnan Province[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2019, 35(192): 149–156.
- [9] NURPUTRA D K, KUSUMAATMAJA A, HAKIM M S, et al. Fast and noninvasive electronic nose for sniffing out COVID-19 based on exhaled breath-print recognition[J]. *npj Digital Medicine*, 2022, 5(115). doi:10.21203/rs.3.rs-750988/v1.
- [10] XU M, WANG J, ZHU L. Tea quality evaluation by applying E-nose combined with chemometrics methods[J]. *Food Science*, 2021, 58: 1549–1561.
- [11] XIA Y, ZHA M, LIU H, et al. Novel insight into the formation of odour-active compounds in sea buckthorn wine and distilled liquor based on GC-MS and E-nose analysis[J]. *Foods*, 2022, 11(20): 3273.
- [12] HADDI Z, BARBRI N E, TAHRI K, et al. Instrumental assessment of red meat origins and their storage time using electronic sensing systems[J]. *Analytical Methods*, 2015, 7: 5193–5203.
- [13] DONG W J, HU R S, CHU Z, et al. Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of Robusta coffee beans[J]. *Food Chemistry*, 2017, 234: 121–130.
- [14] ISO. Determination of substances characteristic of green and black tea-Part 1: Content of total polyphenols in tea-Colorimetric method using Folin-Ciocalteu reagent[S]. ISO, 14502–1, 2005.
- [15] QIN G, ZHANG F, RENG M D, et al. Eco-friendly and efficient extraction of polyphenols from *Ligustrum robustum* by deep eutectic solvent assisted ultrasound[J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136–828.
- [16] CLIFFORD M N, JOHNSTON K L, KNIGHT S, et al. Hierarchical scheme for LC-MSⁿ identification of chlorogenic acids[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(10): 2900–2911.
- [17] BRESSANI A P P, MARTINEZ S J, EVANGELISTA S R, et al. Characteristics of fermented coffee inoculated with yeast starter cultures using different inoculation methods[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 92: 212–212.
- [18] DONG W, HU R, LONG Y, et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of Roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 723–731.
- [19] BRESSANELLO D, LIBERTO E, CORDERO C, et al. Coffee aroma: Chemometric comparison of the chemical information provided by three different samplings combined with GC-MS to describe the sensory properties in cup[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214:

218–226.

- [20] GABRIEL F, ES P F, QUELMO S D N, et al. Quality of coffee produced in the southwest region of Bahia, Brazil subjected to different forms of processing and drying[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2013, 8(20): 2334–2339.
- [21] DE BRUYN F, ZHANG S J, POTHAKOS V, et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2017, 83(1): e02398–16.
- [22] CHENG L, WANG Y, ZHANG J, et al. Integration of non-targeted metabolomics and E-tongue evaluation reveals the chemical variation and taste characteristics of five typical dark teas[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 111875.
- [23] GINZ M, ENGELHARDT U H. Identification of proline-based diketopiperazines in roasted coffee[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(8): 3528–3532.
- [24] MACHEINER L, SCHMIDT A, SCHREINER M, MAYER H K. Green coffee infusion as a source of caffeine and chlorogenic acid[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2019, 84: 103307.
- [25] WANG X G, WAN X C, HU S X, et al. Study on the increase mechanism of the caffeine content during the fermentation of tea with microorganisms[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(3): 1086–1091.
- [26] HEO J, ADHIKARI K, CHOI K S, et al. Analysis of caffeine, chlorogenic acid, trigonelline, and volatile compounds in cold brew coffee using high-performance liquid chromatography and solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1746.
- [27] JESZKA-SKOWRON M, FRANKOWSKI R, ZGOŁA-GRZEŚ A. Comparison of methylxanthines, trigonelline, nicotinic acid and nicotinamide contents in brews of green and processed Arabica and Robusta coffee beans-Influence of steaming, decaffeination and roasting processes on coffee beans[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 125: 109344.
- [28] BABOVA O, OCCHIPINTI A, MAFFEI M E. Chemical partitioning and antioxidant capacity of green coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*) of different geographical origin[J]. *Phytochemistry*, 2016, 123: 33–39.
- [29] ONAKPOYA I, TERRY R, ERNST E. The use of green coffee extract as a weight loss supplement: A systematic review and meta-analysis of randomised clinical trials[J]. *Gastroenterology Research and Practice*, 2011(2011): 1–6.
- [30] ANGELONI G, GUERRINI L, MASELLA P, et al. What kind of coffee do you drink? An investigation on effects of eight different extraction methods[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 1327–1335.
- [31] WU S Y, WANG Z, ZHANG H M, et al. Preliminary study on HPLC method for simultaneous determination of six organic acids in four roasted coffee beans[J]. *Jiangxi Agricultural Journal*, 2018, 30(3): 112–115, 121.
- [32] MARTINEZ S J, BRESSANI A P P, DIAS D R, et al. Effect of bacterial and yeast starters on the formation of volatile and organic acid compounds in coffee beans and selection of flavors markers precursors during wet fermentation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 1: 1287.
- [33] ELHALIS H, COX J, FRANK D, et al. The role of wet fermentation in enhancing coffee flavor, aroma and sensory quality[J]. *European Food Research & Technology*, 2021, 247(2): 485–498.
- [34] RAO N Z, FULLER M. Acidity and antioxidant activity of cold brew coffee[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16030.
- [35] HUANG S, MA Y, ZHANG C, et al. Bioaccessibility and antioxidant activity of phenolics in native and fermented *Prinsepia utilis* Royle seed during a simulated gastrointestinal digestion *in vitro* [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 37: 354–362.
- [36] MOHD A M, HASHIM N, ABD AZIZ S, et al. Principles and recent advances in electronic nose for quality inspection of agricultural and food products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 99: 1–10.
- [37] PEI F, YANG W, MA N, et al. Effect of the two drying approaches on the volatile profiles of button mushroom (*Agaricus bosporus*) by headspace GC-MS and electronic nose[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 72: 343–350.
- [38] WANG X Q, WU Y Y, ZHU H H, et al. Headspace volatiles and endogenous extracts of *Prunus mume* cultivars with different aroma types[J]. *Molecules*, 2021, 26: 7256.
- [39] BODNER M, MOROZOVA K, KRUATHONGSRI P, et al. Effect of harvesting altitude, fermentation time and roasting degree on the aroma released by coffee powder monitored by proton transfer reaction mass spectrometry[J]. *European Food Research and Technology*, 2019, 245: 1499–1506.
- [40] DE MELO PEREIRA G V, DE CARVALHO NETO D P, MAGALHÃES JÚNIOR A I, et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans-A review[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 441–452.
- [41] HAILE M, KANG W H, SUSANA F, et al. The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality[J]. *Journal of Food Quality*, 2019: 1–6.
- [42] CORTÉS F M, PÉREZ S J A, SERVIN J R, et al. Relationship between physico-chemical properties in the coffee beans and the cup quality attributes of coffee from the state of Chiapas, Mexico[J]. *International Food Research Journal*, 2020, 27(4): 754–761.
- [43] de GAULEJAC N S, VIVAS N, de FREITAS V, et al. The influence of various phenolic compounds on scavenging activity assessed by an enzymatic method[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1999, 79(8): 1081–1090.