DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260225005
引用格式: 严静, 刘秀徽, 王瀚墨, 等. 不同等级咖啡豆中的主要苦味、酸味成分及抗氧化活性的差异比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 264–273.
Yan Jing, Liu Xiuwei, Wang Hanmo, et al. Comparative study on the differences in the main bitter and sour components and antioxidant activities in coffee beans of different grades [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 264–273. (in Chinese with English abstract).

不同等级咖啡豆中的主要苦味、酸味成分及抗氧化活性的差异比较研究

严 静[1], 刘秀徽[1], 王瀚墨[1], 潘 俊[1], 李泽林[1], 胡一凡[1], 高 洁[2], 徐立堃[2], 田 浩[1*]
(1. 云南省农业科学院农产品加工研究所, 昆明 650221; 2. 保山市高老庄农副产品开发有限公司, 保山 678025)

摘 要: 目的 分析 9 种精品咖啡豆与 9 种商业咖啡豆两个不同等级咖啡豆中的主要苦味与酸味成分含量及其抗氧化活性, 探究精品咖啡豆与商业咖啡豆之间的差异。**方法** 采用水提法提取咖啡豆中的主要苦味与酸味成分, 利用高效液相色谱法对其进行定性定量分析, 并检测两个不同等级咖啡豆的抗氧化活性。**结果** 精品咖啡豆中的葫芦巴碱、草酸、奎宁酸、绿原酸含量(含量分别介于 5.61~7.91、3.12~4.67、203.30~456.10、3.83~9.33 mg/g 之间)明显高于商业咖啡豆(含量分别介于 1.56~5.43、1.67~2.16、37.17~230.31、1.03~6.66 mg/g 之间); 而精品咖啡豆中的咖啡因(除去脱咖啡因咖啡)、乳酸、苹果酸含量(含量分别介于 10.28~13.00、6.35~7.94、10.38~15.20 mg/g 之间)明显低于商业咖啡豆(含量分别介于 13.62~15.00、7.82~9.22、15.78~24.41 mg/g 之间); 两种等级的咖啡豆中的总酚含量范围在 20~30 mg/g 之间, 而商业咖啡豆的黄酮含量(30.30~52.12 mg/g)总体低于精品咖啡豆(42.64~69.11 mg/g), 部分商业咖啡豆样品黄酮含量高于精品咖啡豆的低限水平, 且精品咖啡豆的抗氧化性则高于商业咖啡豆。主成分分析显示, 咖啡豆品质关联最多的理化成分指标是葫芦巴碱和奎宁酸, 相关性分析表明咖啡抗氧化能力的主要物质是总黄酮与总酚。**结论** 精品咖啡豆与商业咖啡豆中在主要苦味与酸味成分上具有明显的差异性, 且相较于商业咖啡豆, 精品咖啡豆表现出略优的抗氧化活性。基于上述物质成分差异, 可实现两类咖啡豆的有效区分。

关键词: 咖啡豆; 不同等级; 高效液相色谱法; 苦味成分; 酸味成分; 主成分分析; 抗氧化活性
中图分类号: TS273 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0264–10

Comparative study on the differences in the main bitter and sour components and antioxidant activities in coffee beans of different grades

YAN Jing[1], LIU Xiu-Wei[1], WANG Han-Mo[1], PAN Jun[1], LI Ze-Lin[1], HU Yi-Fan[1], GAO Jie[2], XU Li-Kun[2], TIAN Hao[1*]
(1. *Agro-products Processing Research Institute*, *Yunnan Academy of Agricultural Sciences*, *Kunming* 650221, *China*; 2. *Baoshan GaoLaoZhuang Agricultural and Sideline Products Development Co*., *Ltd*., *Banshan* 678025, *China*)

收稿日期: 2026-02-25
基金项目: 云南省科技厅重大科技专项项目(202602AE090002)
第一作者: 严静(1990—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品精深加工。E-mail: 752050079@qq.com
***通信作者:** 田浩(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为天然产物及特征成分精准加工体系研究。E-mail: tianhao.630@163.com

ABSTRACT: Objective　To analyze the content of main bitter and sour components and antioxidant activities of 9 kinds of specialty coffee beans and 9 kinds of commercial coffee beans of 2 different grades of coffee beans, and investigate the differences between specialty coffee beans and commercial coffee beans. **Methods**　Water extraction was adopted to isolate the major bitter and sour components from coffee beans. High performance liquid chromatography was applied for their qualitative and quantitative analysis, and the antioxidant activities of 2 grades of coffee beans were determined simultaneously. **Results**　The content of trigonelline, oxalic acid, quinic acid and chlorogenic acid in specialty coffee beans (the content was 5.61–7.91, 3.12–4.67, 203.30–456.10 and 3.83–9.33 mg/g, respectively) were significantly higher than those in commercial coffee beans (the content was 1.56–5.43, 1.67–2.16, 37.17–230.31 and 1.03–6.66 mg/g, respectively). The content of caffeine (excluding decaffeinated coffee), lactic acid and malic acid in specialty coffee beans (the content ranged from 10.28 to 13.00, 6.35 to 7.94 and 10.38 to 15.20 mg/g, respectively) were significantly lower than those in commercial coffee beans (the content was 13.62–15.00, 7.82–9.22, and 15.78–24.41 mg/g, respectively). The total phenol content in the 2 kinds of grades of coffee beans ranged from 20 mg/g to 30 mg/g. The flavonoid content of commercial coffee beans (30.30–52.12 mg/g) was lower than that of specialty coffee beans (42.64–69.11 mg/g); some commercial coffee bean samples exhibited flavonoid content above the lower limit of specialty coffee beans. In addition, the antioxidant capacity of specialty coffee beans was higher than that of commercial coffee beans. Principal component analysis revealed that trigonelline and quinic acid were the physicochemical indexes most closely correlated with coffee bean quality. Correlation analysis indicated that total flavonoids and total phenols were the primary substances responsible for the antioxidant capacity of coffee. **Conclusion** Specialty and commercial coffee beans exhibit significant differences in their primary bitter and acidic components. Compared to commercial coffee beans, specialty coffee beans demonstrate slightly superior antioxidant activity. Based on these compositional differences, the 2 types of coffee beans can be effectively differentiated.

KEY WORDS: coffee beans; different grades; high performance liquid chromatography; bitter components; sour components; principal component analysis; antioxidant activity

0　引　言

咖啡是一种常绿的多年生灌木或小乔木, 属于茜草科咖啡属, 作为世界三大饮料作物之一, 在全球范围内拥有广泛的消费群体[1]。近年来, 咖啡的市场需求持续攀升, 整体消费量呈明显上升趋势[2]。相关数据显示, 全球每天咖啡饮用量约为 22.5 亿杯, 过去几十年间的年平均增长率稳定在 2%左右[3]。咖啡之所以具有苦、酸、坚果香和烘焙香等独特且令人愉悦的风味, 是由多种因素共同作用的结果, 主要包括咖啡的品种特性、果实成熟度、产地生态环境, 以及采收加工、烘焙方式和冲泡方法等环节中所涉及的化学、生物与物理变化[4]。

咖啡中的生物碱(如咖啡因、葫芦巴碱), 是咖啡中苦味的主要来源, 同时也是咖啡生物活性的重要物质基础[5]。绿原酸及其衍生物具有较强的抗氧化活性。一般来说, 一杯咖啡中的绿原酸含量会因咖啡品种、烘焙程度、冲泡方式等不同而有较大差异, 通常波动范围在 20~673 mg 之间[6]。在烘焙过程中, 绿原酸会通过斯特雷克降解反应分解生成咖啡酸、阿魏酸和奎宁酸等产物。这些分解产物不仅影响咖啡的整体酸度, 还会赋予咖啡一定的涩味和苦味, 共同参与咖啡风味的形成[7]。在咖啡品质评估体系中, 酸度占据重要地位, 而这一特性主要由烘焙过程中生成的有机酸决定。经烘焙处理的咖啡豆含有三十多种有机酸, 包括绿原酸、柠檬酸和苹果酸等。其中, 苹果酸带来的酸涩口感能够引发愉悦的味觉感受, 而其他的有机酸则多以呈现苦味为主[8]。

黄酮类化合物因其具备抗菌消炎、抗肿瘤、抗氧化以及调节人体代谢等多种生物活性, 并且安全性较高, 长期以来都是食品与功能活性领域的研究重点[9]。Borrelli 等[10]的研究指出, 咖啡中的咖啡因和绿原酸抗氧化活性同样显著, 此外, 烘焙阶段经由美拉德反应生成的产物亦具备一定的抗氧化能力。由此可见, 咖啡整体较强的抗氧化特性, 是黄酮类、多酚类、咖啡因及绿原酸等多种活性成分共同协同作用的结果。目前市售咖啡豆依据国际精品咖啡协会 100 分制杯测评分体系, 主要可分为精品咖啡豆与商业咖啡豆两个质量等级(以 80 分为界, ≥80 分为精品, <80 分为商业)。精品咖啡强调从种植园管理到最终冲泡的全流程标准化、精细化管控, 风味特点更突出果香、花香和酸度, 而商业咖啡豆则占据了全球市场 90%左右的流通份额, 以成本效率和产量优先, 风味以醇厚苦味为主[11]。咖啡作为全球消费量最高的饮品之一, 其品质直接决定市场价值与消费者接受度, 不同等级咖啡豆在滋味及功能特性上均存在明显差异。当前, 咖啡市场对高品质咖啡豆(如精品豆)的需

求日益增长, 但针对不同等级咖啡豆滋味物质的研究尚存不足, 缺乏客观的理化指标作为支撑。咖啡滋味成分涵盖苦、酸、甜、鲜、咸及涩感等多维属性, 其中苦味和酸味是消费者感知最显著的两个维度, 也是精品咖啡协会(Specialty Coffee Association, SCA)杯测评分中决定等级划分(≥80 分为精品)的重要指标。精品与商业咖啡的品质分别在酸味优劣与苦味品质上体现最为鲜明。基于此, 通过系统分析不同等级咖啡豆中苦味和酸味成分的差异性及抗氧化性, 可为阐释咖啡品质、逐步构建滋味品质评价框架提供客观的理化依据, 具有重要的研究意义。

本研究通过对精品咖啡豆及商业咖啡豆两种不同等级的咖啡豆中的主要苦味及酸味成分进行研究, 明确不同等级的咖啡豆的主要苦味及酸味物质的含量以及其抗氧化特性的差异, 采用主成分分析对咖啡豆中的主要苦味及酸味物质进行分析, 研究其关键特征成分, 并通过相关性分析咖啡中主要苦味及酸味物质与抗氧化间的关联性, 为深入阐释咖啡豆品质形成机制提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

咖啡豆原料采购于市场门市店, 具体类别见表 1 所示。

表 1 咖啡豆品类

Table 1 Types of coffee beans

类型	咖啡豆	产地
精品咖啡豆	甄选乌基辛加咖啡	乌干达
	甄选加拉帕格斯咖啡	厄瓜多尔加拉帕格斯
	甄选耶加雪菲咖啡	埃塞俄比亚耶加雪菲
	甄选哥伦比亚奎布拉多咖啡豆	哥伦比亚奎布拉多
	甄选云南天佐之合咖啡	云南
	甄选卡雾 2021 咖啡	美国夏威夷
	甄选 21 东帝珠粒咖啡	东帝汶
	甄选哥斯达黎加阿尔萨西亚咖啡豆(脱咖啡因)	哥斯达黎加(脱咖啡因)
	甄选苏门瓦哈纳咖啡	苏门答腊瓦哈纳庄园
商业咖啡豆	危地马拉咖啡豆	危地马拉
	意式烘焙咖啡豆	意式烘焙
	首选综合咖啡豆	首选综合
	苏门答腊咖啡豆	苏门答腊
	早餐综合咖啡豆	早餐综合
	浓缩烘焙咖啡豆	浓缩烘焙
	印度尼西亚爪哇咖啡豆	印度尼西亚
	佛罗娜咖啡豆	佛罗娜
	派克市场烘焙咖啡豆	派克

磷酸、甲酸、无水乙醇(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 磷酸二氢钾、氢氧化钠(分析纯, 广东光华科技股份有限公司); 碳酸钠、福林酚、硝酸铝、亚硝酸钠、过硫酸钾、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt, ABTS](分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 甲醇(色谱纯, 德国 Merck 公司); 没食子酸、芦丁、咖啡因、葫芦巴碱、绿原酸、草酸、奎宁酸、乳酸、苹果酸、柠檬酸标准品(纯度≥99%, 成都埃法生物科技有限公司)。

UltiMate 3000 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司); HPLC VP-ODS C_{18} 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm, 日本 Shimadzu 公司); XMT-DA 型电热恒温水浴锅(余姚市亚星仪器仪表有限公司); Spectrophotometer 1510 酶标仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); AUY220 型万分之一分析天平(日本岛津公司)。

1.2 方 法

1.2.1 样品前处理方法

参考智美丽等[8]方法并进行修改, 咖啡豆进行粗磨粉, 准确称取咖啡粉 10 g 置入锥形瓶中, 加入 80 ℃纯水 180 mL, 摇晃使其充分混匀, 瓶口以双层保鲜膜密封后, 置于集热式恒温加热磁力搅拌器中, 设定转速 60 r/min, 水浴提取 6 min。提取结束后, 以自来水将锥形瓶冷却至室温, 随后采用 Pribolab 1.5 miu μm 玻璃纤维滤纸进行抽滤, 并以等量纯水冲洗锥形瓶及滤渣, 合并全部滤液, 摇匀备用。

1.2.2 色谱方法

方法参考陈桃等[12]方法同时测定咖啡液中的咖啡因、绿原酸和葫芦巴碱, 并加以修改, 其柱温为 30 ℃。以 5‰甲酸水溶液与甲醇为流动相, 按表 2 所示程序进行梯度洗脱。流速 1.0 mL/min, 进样量 10 μL。紫外检测波长: 葫芦巴碱于 254 nm 处检测; 咖啡因于 276 nm 处检测; 绿原酸于 320 nm 处检测。

表 2 咖啡因、葫芦巴碱、绿原酸流动相洗脱程序

Table 2 Mobile phase elution procedures of caffeine, trigonelline and chlorogenic acid

时间/min	5‰甲酸水/%	甲醇/%
0~7	95	5
7~10	90	10
10~55	82	18
55~58	50	50
58~65	20	80
65~70	20	80
70~80	0	100

参考刘帅民等[13]方法同时测定咖啡液中的琥珀酸、乙酸、柠檬酸、苹果酸、乳酸, 并加以修改, 柱温 30 ℃, 流动相为 0.05 mol/L 磷酸二氢钾(pH 2.7)与甲醇。流速 0.8 mL/min, 进

样量 15 μL。紫外检测器检测波长 210 nm。梯度洗脱程序见表 3。

表 3　有机酸洗脱程序
Table 3　Organic acid elution procedure

时间/min	0.05 mol/L 磷酸二氢钾/%	甲醇/%
0~30	99	1
30~45	99	1
45~55	0	100

1.2.3　总黄酮的含量测定

芦丁标准曲线的制备[14], 取适量芦丁对照品, 准确称量后, 使用 60%乙醇稀释至质量浓度为 1 mg/mL, 得到标准品储备液。将标准品溶液稀释得 0、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 mg/mL 的标准品溶液, 取 20 μL 的标准品置入 96 孔板中, 然后均匀加入 60 μL 的 60%乙醇溶液, 10 μL 的 5%亚硝酸钠溶液, 充分混匀后静置 6 min 后, 随后加入 10 μL 10%硝酸铝溶液, 再次静置 6 min, 再加入 100 μL 4%氢氧化钠溶液, 静置 15 min, 于 510 nm 波长处测定吸光度。将咖啡提取液稀释 10 倍后, 作为样液。取待测样液按以上方法处理, 测定其吸光度, 每个样品进行 3 次平行实验。

1.2.4　总酚的含量测定

采用福林酚比色法[15], 准确称取没食子酸标准品, 并用纯水配制成 0.2 mg/mL 的标准溶液, 然后分别进行稀释, 以获得 0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12 mg/mL 的标准品溶液。吸取标准品溶液 20 μL 于 96 孔板, 加入 20 μL 福林酚, 摇匀后静置 3 min, 添加 40 μL 的 12%碳酸钠溶液, 以及 120 μL 纯水, 振荡摇匀后在室温下避光静置 2 h, 于 760 nm 波长处测定吸光度。每个样品进行 3 次平行实验。

1.2.5　DPPH 实验方法

参考奎晶等[16]方法并做适当修改, 配制质量浓度为 40 μg/mL 的 DPPH 溶液, 使用无水乙醇溶解, 计算公式见式(1), 每个样品进行 3 次平行实验。

$$\text{DPPH 自由基清除率/\%}=\frac{A_{样}-A_{空}}{A_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中: $A_{样}$(样品孔)为样品+DPPH, $A_{空}$(本底孔)为样品+乙醇, A_0 为样液(溶样品的溶液)+DPPH。并且样品和样液加的量均保持一致, DPPH 和乙醇加的量均保持一致。样品稀释 5 倍, 加样体积比例 1:1, 加样后反应 30 min, 避光。振荡 1 min, 517 nm 测吸光度。

1.2.6　$ABTS^+$自由基清除实验

参考吕金慧等[17]方法并做适当修改, ABTS 配制终浓度为 7 mmol/L, 过硫酸钾配制终浓度为 4.9 mmol/L, 均用水配制, 体积比例为 1:1 进行混合, 室温避光放置 12~18 h, 即可得到 $ABTS^+$溶液。$ABTS^+$溶液用 PBS (0.01 mol/L pH = 7.4)稀释, 吸光度约 0.7。以稀释 10 倍的咖啡提取液为样液, 备用。计算公式见式(2), 每个样品进行 3 次平行实验。

$$ABTS^+\text{自由基清除率/\%}=\frac{B_{空}-B_{样}}{B_{空}}\times 100\% \quad (2)$$

式中: $B_{样}$(样品孔)为 20 μL 样品+80 μL ABTS 溶液; $B_{空}$(本底孔)为 20 μL 样液+ 80 μL ABTS 溶液。常温下避光, 反应 6 min, 测吸光度 734 nm。

1.3　数据处理

实验数据采用 WPS Office (12.1.0.24034)及 R 语言(R 4.5.2)函数 ggplot 2、ggforce、pheatmap 进行数据统计分析及绘图。采用 R 语言(R 4.5.2)函数 prcomp 进行无监督主成分分析, 分析前对数据进行单位方差标准化处理, 使用函数 cor 进行斯皮尔曼相关系数相关显著性分析。

2　结果与分析

2.1　不同咖啡液中生物碱含量的分析

在精品咖啡豆中(除去脱咖啡因咖啡)咖啡因的含量范围为 10.28~13.00 mg/g, 葫芦巴碱含量则分布在 5.61~7.91 mg/g, 咖啡因在商业咖啡豆中的含量范围为 13.78~15.00 mg/g, 而葫芦巴碱含量则分布在 1.56~5.43 mg/g。从表 4 中也可以看出精品咖啡豆中咖啡因的含量明显低于商业咖啡豆, 而葫芦巴碱的含量则明显高于商业咖啡豆, 咖啡因主要带来苦味, 葫芦巴碱除了带来苦味, 在烘焙过程中也形成了其他的风味[18]。精品咖啡豆较低的咖啡因水平有助于减轻过重苦味, 使其口感更为柔和, 而较高的葫芦巴碱含量则为其提供了更丰富的风味前体物质, 这也是精品咖啡在香气层次与滋味协调性上普遍优于商业咖啡的重要物质基础之一。

2.2　不同咖啡液中的有机酸含量分析

表 5 中显示了不同等级咖啡豆中有机酸的含量。咖啡的酸味主要来源于水溶性羧酸, 如柠檬酸和苹果酸等, 这些酸性物质含有大量氢离子。因此, 咖啡的酸味主要来自于其有机酸含量的差异, 这对咖啡的口感具有重要影响。其组成和含量对咖啡整体口感特征起到关键的调控作用。结果显示, 不同等级咖啡豆的有机酸分布存在明显差异, 精品咖啡豆中的绿原酸含量整体上明显高于商业咖啡豆含量, 绿原酸作为咖啡中重要的酸性与功能性成分, 不仅直接影响咖啡酸度强弱, 还会带来柔和的收敛口感, 是塑造咖啡风味层次感的重要物质[19]。柠檬酸含量在精品咖啡豆和商业咖啡豆中含量接近, 草酸、奎宁酸含量在精品咖啡豆中含量远高于商业咖啡豆, 而苹果酸、乳酸含量则明显低于商业咖啡豆。有机酸可作为风味增强剂, 通过协调酸、甜、苦、涩的平衡提升咖啡感官品质[20]。

2.3　总酚和总黄酮的含量分析

表 6 显示了咖啡中的总酚和总黄酮的含量。从表 6 中可以看出, 从整体趋势可见, 两种等级咖啡豆的总酚含量

表 4 不同等级咖啡豆中的生物碱类物质含量(mg/g)

Table 4 Content of alkaloids in coffee beans of different grades (mg/g)

精品咖啡豆	咖啡因	葫芦巴碱	商业咖啡豆	咖啡因	葫芦巴碱
甄选乌基辛加咖啡	10.28±0.15^{g}	6.13±0.14^{e}	危地马拉咖啡豆	15.00±0.21^{a}	3.88±0.03^{h}
甄选加拉帕格斯咖啡	11.46±0.23^{f}	6.10±0.14^{e}	意式烘焙咖啡豆	14.42±0.33^{b}	1.56±0.04^{m}
甄选耶加雪菲咖啡	11.41±0.36^{f}	7.91±0.26^{a}	首选综合咖啡豆	14.53±0.17^{b}	2.97±0.21^{jk}
甄选哥伦比亚奎布拉多咖啡豆	11.91±0.15^{e}	6.47±0.28^{d}	苏门答腊咖啡豆	13.88±0.31^{c}	3.11±0.10^{ij}
甄选云南天佐之合咖啡	11.87±0.06^{e}	5.89±0.11^{e}	早餐综合咖啡豆	13.62±0.44^{c}	5.43±0.05^{f}
甄选卡雾 2021 咖啡	13.00±0.40^{d}	7.65±0.22^{b}	浓缩烘焙咖啡豆	14.54±0.04^{b}	2.39±0.25^{l}
甄选 21 东帝珠粒咖啡	12.99±0.06^{d}	7.49±0.15^{b}	印度尼西亚爪哇咖啡豆	14.29±0.17^{b}	4.95±0.07^{g}
甄选哥斯达黎加阿尔萨西亚咖啡豆(脱咖啡因)	0.56±0.03^{h}	6.74±0.02^{c}	佛罗娜咖啡豆	14.64±0.20^{ab}	2.78±0.04^{k}
甄选苏门瓦哈纳咖啡	11.36±0.25^{f}	5.61±0.11^{f}	派克市场烘焙咖啡豆	13.78±0.30^{c}	3.29±0.08^{i}

注: 不同字母表示具有显著性差异(P<0.05)。表 5~6、10 同。

表 5 不同等级咖啡豆中的有机酸含量(mg/g)

Table 5 Organic acid content in coffee beans of different grades (mg/g)

	组别	绿原酸	草酸	奎宁酸	苹果酸	乳酸	柠檬酸
精品咖啡豆	甄选乌基辛加咖啡	6.06±0.05^{c}	3.22±0.03^{d}	392.46±6.16^{d}	12.16±0.07^{i}	6.47±0.28^{i}	6.23±0.02^{h}
	甄选加拉帕格斯咖啡	6.56±0.05^{b}	3.57±0.10^{c}	353.48±6.43^{f}	13.20±0.38^{h}	6.84±0.19^{h}	7.03±0.03^{ef}
	甄选耶加雪菲咖啡	9.33±0.19^{a}	3.12±0.18^{d}	456.10±9.02^{a}	10.38±0.05^{j}	7.26±0.17^{j}	6.25±0.09^{h}
	甄选哥伦比亚奎布拉多咖啡豆	5.28±0.07^{e}	4.67±0.03^{a}	378.63±5.03^{e}	13.21±0.17^{h}	7.54±0.08^{h}	7.36±0.16^{cd}
	甄选云南天佐之合咖啡	4.71±0.08^{f}	4.55±0.04^{ab}	326.95±6.31^{g}	13.43±0.17^{h}	7.33±0.25^{h}	7.20±0.01^{de}
	甄选卡雾 2021 咖啡	6.54±0.06^{b}	4.68±0.08^{a}	438.59±8.96^{b}	15.06±0.32^{g}	7.94±0.22^{g}	8.07±0.09^{a}
	甄选 21 东帝珠粒咖啡	5.72±0.08^{d}	4.39±0.18^{b}	423.73±5.36^{c}	15.20±0.03^{g}	7.56±0.09^{g}	7.17±0.14^{de}
	甄选哥斯达黎加阿尔萨西亚咖啡豆(脱咖啡因)	6.15±0.05^{c}	4.32±0.25^{b}	399.16±3.67^{d}	13.63±0.27^{h}	7.63±0.15^{h}	7.84±0.11^{b}
	甄选苏门瓦哈纳咖啡	3.83±0.04^{g}	4.32±0.23^{b}	203.30±4.89^{i}	13.31±0.25^{h}	6.35±0.25^{h}	6.21±0.16^{h}
商业咖啡豆	危地马拉咖啡豆	3.94±0.09^{g}	1.67±0.02^{g}	137.23±3.15^{j}	18.95±0.30^{d}	8.22±0.05^{d}	6.64±0.18^{g}
	意式烘焙咖啡豆	1.03±0.02^{l}	2.14±0.24^{e}	37.17±4.05^{o}	24.08±0.28^{a}	9.22±0.16^{a}	6.48±0.06^{g}
	首选综合咖啡豆	3.02±0.08^{i}	1.94±0.05^{efg}	92.38±3.16^{l}	22.03±0.16^{c}	8.44±0.09^{c}	6.89±0.07^{f}
	苏门答腊咖啡豆	3.34±0.11^{h}	2.13±0.15^{e}	106.89±8.38^{k}	18.28±0.04^{e}	8.46±0.05^{e}	6.18±0.22^{h}
	早餐综合咖啡豆	6.66±0.02^{b}	1.83±0.23^{fg}	230.31±5.13^{h}	15.78±0.23^{f}	8.15±0.07^{f}	7.08±0.09^{ef}
	浓缩烘焙咖啡豆	2.11±0.10^{k}	1.68±0.14^{g}	60.81±2.36^{m}	24.41±0.04^{a}	9.06±0.08^{a}	7.41±0.09^{c}
	印度尼西亚爪哇咖啡豆	5.85±0.16^{d}	2.16±0.15^{e}	193.72±6.37^{i}	18.20±0.45^{e}	7.82±0.20^{e}	7.32±0.05^{cd}
	佛罗娜咖啡豆	2.67±0.03^{j}	1.97±0.14^{ef}	81.03±8.62^{n}	21.87±0.36^{c}	8.86±0.10^{c}	7.19±0.03^{de}
	派克市场烘焙咖啡豆	3.28±0.05^{h}	1.80±0.05^{fg}	107.27±4.53^{k}	22.43±0.06^{b}	8.32±0.08^{b}	7.97±0.13^{ab}

表 6　不同等级咖啡豆中总酚和总黄酮的含量(mg/g)

Table 6　Total phenol and total flavonoid content in coffee beans of different grades (mg/g)

精品咖啡豆	总酚	总黄酮	商业咖啡豆	总酚	总黄酮
甄选乌基辛加咖啡	20.26±0.14^{i}	42.64±0.46^{g}	危地马拉咖啡豆	23.13±0.10^{fg}	41.73±1.86^{gh}
甄选加拉帕格斯咖啡	28.19±0.39^{ab}	60.60±1.64^{b}	意式烘焙咖啡豆	20.27±0.28^{i}	30.30±0.89^{l}
甄选耶加雪菲咖啡	28.73±0.28^{a}	69.11±1.17^{a}	首选综合咖啡豆	24.23±0.81^{def}	39.37±0.90^{ij}
甄选哥伦比亚奎布拉多咖啡豆	25.03±0.53^{d}	54.53±1.43^{d}	苏门答腊咖啡豆	24.46±1.20^{de}	39.99±2.35^{hi}
甄选云南天佐之合咖啡	25.35±1.71^{d}	49.50±1.42^{f}	早餐综合咖啡豆	26.67±0.20^{c}	50.39±0.15^{ef}
甄选卡雾 2021 咖啡	27.90±0.63^{abc}	60.27±0.14^{bc}	浓缩烘焙咖啡豆	23.36±1.06^{efg}	37.12±0.47^{k}
甄选 21 东帝珠粒咖啡	27.29±0.35^{bc}	58.56±0.57^{c}	印度尼西亚爪哇咖啡豆	27.43±0.33^{bc}	52.12±0.80^{e}
甄选哥斯达黎加阿尔萨西亚咖啡豆(脱咖啡因)	24.19±0.36^{b}	52.31±0.20^{def}	佛罗娜咖啡豆	22.86±0.16^{gh}	38.79±1.55^{ijk}
甄选苏门瓦哈纳咖啡	22.28±1.19^{h}	48.45±0.83^{gh}	派克市场烘焙咖啡豆	21.84±0.55^{h}	37.51±0.49^{jk}

分布较为集中, 整体介于 20~30 mg/g 之间, 含量差异相对有限, 表明多酚类物质在咖啡豆中普遍存在且积累水平相对稳定。在黄酮类物质积累方面, 商业咖啡豆整体含量明显低于精品咖啡豆, 反映出精品豆在次生代谢产物富集上具有明显优势, 进一步对比不同产地精品咖啡豆可知, 产自埃塞俄比亚的咖啡豆总酚与总黄酮含量最高, 分别为 28.73 mg/g 和 69.11 mg/g, 明显高于其他样品, 说明咖啡豆等级与产地来源是影响酚类活性物质含量的重要因素。

2.4　咖啡豆中主要苦味与酸味成分的主成分分析

对咖啡水提物的 8 项理化成分进行主成分分析(葫芦巴碱、绿原酸、咖啡因、草酸、奎宁酸、苹果酸、乳酸和柠檬酸), 其主成分特征值和贡献率结果见表 7。如表 7 及图 1 所示, 前两个主成分的特征值大于 1.00, 累计贡献率为 81.920%, 能较好反映原始数据的信息, 因此, 选取前两个主成分对咖啡水提物的化学成分进行进一步的分析。主成分 1 的贡献最大为 66.463%, 特征值为 5.317, 表明分析评议中主成分 1 起主导作用。

表 7　主成分特征值及累计贡献率

Table 7　Principal component eigenvalues and cumulative contribution rates

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	5.317	66.463	66.463
2	1.237	15.457	81.920

计算前两个主要成分的特征向量, 结果如表 8 所示。由主成分的特征向量可知, 第一主成分主要综合了葫芦巴碱、奎宁酸、绿原酸及草酸, 其中葫芦巴碱和奎宁酸的载荷较高, 说明葫芦巴碱和奎宁酸是决定主成分 1 的重要因子。第二主成分主要综合了柠檬酸、乳酸、苹果酸、草酸的信息。

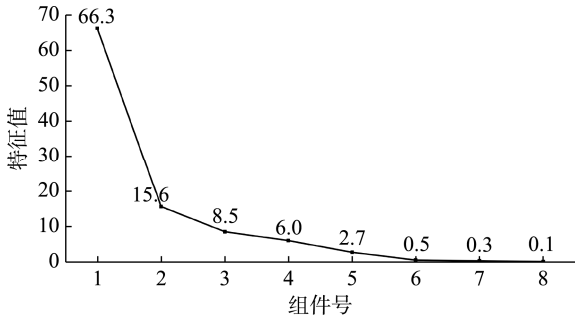


图 1　碎石图

Fig.1　Rock sample diagram

表 8　主成分载荷结果

Table 8　Results of principal component load

化学成分	主成分	
	1	2
葫芦巴碱	0.97	0.09
绿原酸	0.85	–0.03
咖啡因	–0.64	–0.28
草酸	0.82	0.20
奎宁酸	0.96	0.11
苹果酸	–0.96	0.22
乳酸	–0.85	0.33
柠檬酸	–0.01	0.97

以主成分 1 和主成分 2 的贡献率为权重, 由相对应的主成分得分和权重加权求和得到综合评价函数, 通过函数计算出各产地咖啡的品质综合得分和排序结果, 综合数值越大说明该咖啡的综合品质越好, 如表 9 所示。通过综合

评价结果由大到小可知, 精品咖啡豆整体评分均大于商业咖啡豆, 这正说明了精品咖啡豆的品质高于商业咖啡豆。在精品咖啡豆中, 哥斯达黎加产地与埃塞俄比亚耶加雪菲产地咖啡豆的综合评价最高, 而云南产地的精品咖啡豆则位于品质的中下水平。

2.5 抗氧化性分析

表 10 为不同等级咖啡的抗氧化性分析。在 $ABTS^+$自由基清除体系下, 精品咖啡豆整体表现出更强的自由基清除能力, 抗氧化活性水平略优于商业咖啡豆, 说明在该评价体系中, 精品咖啡对自由基的抑制作用更为突出。而精品咖啡豆在 DPPH 清除自由基的实验中, 其抗氧化能力与商业咖啡豆的抗氧化能力相差不大, 说明在这一自由基反应体系下, 咖啡等级差异对抗氧化效果的影响并不明显。

2.6 咖啡中各成分与抗氧化性的相关性分析

图 2 显示了咖啡中主要苦味与酸味成分与抗氧化活性之间的相关性, 数据显示, 总黄酮及总酚含量与 $ABTS^+$自由基清除能力呈极显著正相关(P<0.001), 相关系数均为 0.79, 二者对 ABTS 体系下的抗氧化能力起到了关键且一致的作用; 葫芦巴碱、奎宁酸和绿原酸的含量与 $ABTS^+$自由基的清除能力之间存在显著的正相关关系(P<0.05), 相关系数分别为 0.61、0.59 和 0.60, 对抗氧化活性均有显著贡献。由此可以看出, 总酚与总黄酮是影响咖啡 ABTS 抗氧化能力的关键物质, 对整体抗氧化活性起主要贡献, 而葫芦巴碱、奎宁酸、绿原酸等成分也起着重要的辅助作用。相比较而言, 在所检测到的各种咖啡成分中, 其含量水平与清除 DPPH 自由基的能力并没有表现出显著的相关性, 说明 DPPH 法所反映的抗氧化能力, 并不由上述单一或某几类特征成分直接决定。整体来看, 不同咖啡样品在 ABTS 抗氧化能力上的差异, 主要来自总酚、总黄酮等标志性物质含量的不同; 而 DPPH 抗氧化性受单一成分影响较小, 因此样品间未体现出明显差别。

表 9 主成分分析综合评价

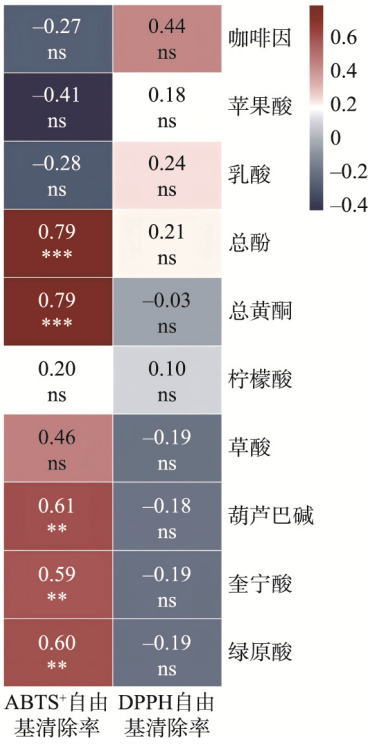
Table 9 Comprehensive evaluation of principal component analysis

种类	主成分得分		综合得分 F	排名
	$F1$	$F2$		
甄选乌基辛加咖啡	2.20	–1.62	1.47	7
甄选加拉帕格斯咖啡	1.91	–0.38	1.48	6
甄选耶加雪菲咖啡	3.04	–1.40	2.21	2
甄选哥伦比亚奎布拉多咖啡豆	1.81	0.57	1.58	4
甄选云南天佐之合咖啡	1.48	0.27	1.25	8
甄选卡雾 2021 咖啡	2.02	1.85	1.99	3
甄选 21 东帝珠粒咖啡	1.87	0.34	1.58	4
甄选哥斯达黎加阿尔萨西亚咖啡豆	2.85	2.09	2.70	1
甄选苏门瓦哈纳咖啡	1.32	–1.59	0.77	9
危地马拉咖啡豆	–1.66	–0.80	–1.50	12
意式烘焙咖啡豆	–3.68	–0.49	–3.08	18
首选综合咖啡豆	–2.41	–0.24	–2.00	15
苏门答腊咖啡豆	–1.83	–1.30	–1.73	14
早餐综合咖啡豆	–0.07	–0.14	–0.09	10
浓缩烘焙咖啡豆	–3.38	0.81	–2.59	17
印度尼西亚爪哇咖啡豆	–0.48	0.20	–0.35	11
佛罗娜咖啡豆	–2.77	0.46	–2.16	16
派克市场烘焙咖啡豆	–2.23	1.37	–1.55	13

表 10 不同等级咖啡豆的抗氧化性分析

Table 10 Antioxidant resistance analysis in coffee beans of different grades

精品咖啡豆	DPPH 自由基清除率/%	$ABTS^+$自由基清除率/%	商业咖啡豆	DPPH 自由基清除率/%	$ABTS^+$自由基清除率/%
甄选乌基辛加咖啡	63.81 ± 0.73^{cd}	41.69 ± 0.75^{h}	危地马拉咖啡豆	65.70 ± 0.64^{abc}	45.54 ± 3.29^{fg}
甄选加拉帕格斯咖啡	64.81 ± 1.54^{abcd}	54.55 ± 1.56^{c}	意式烘焙咖啡豆	64.09 ± 2.44^{bcd}	42.80 ± 2.27^{gh}
甄选耶加雪菲咖啡	64.64 ± 0.31^{abcd}	65.21 ± 2.42^{a}	首选综合咖啡豆	63.81 ± 0.73^{cd}	47.23 ± 2.08^{ef}
甄选哥伦比亚奎布拉多咖啡豆	66.70 ± 1.22^{a}	49.65 ± 2.29^{de}	苏门答腊咖啡豆	64.81 ± 1.54^{abcd}	47.85 ± 2.91^{ef}
甄选云南天佐之合咖啡	64.78 ± 1.25^{abcd}	44.84 ± 0.82^{fgh}	早餐综合咖啡豆	64.64 ± 0.31^{abcd}	49.59 ± 0.53^{de}
甄选卡雾 2021 咖啡	63.37 ± 0.69^{cd}	62.39 ± 1.24^{a}	浓缩烘焙咖啡豆	66.74 ± 1.22^{a}	46.00 ± 3.07^{fg}
甄选 21 东帝珠粒咖啡	66.46 ± 0.62^{ab}	58.57 ± 1.03^{b}	印度尼西亚爪哇咖啡豆	64.65 ± 2.22^{abcd}	52.63 ± 1.32^{cd}
甄选哥斯达黎加阿尔萨西亚咖啡豆(脱咖啡因)	62.61 ± 0.64^{d}	54.20 ± 0.87^{c}	佛罗娜咖啡豆	65.70 ± 0.64^{abc}	49.74 ± 2.01^{de}
甄选苏门瓦哈纳咖啡	62.45 ± 1.30^{d}	48.32 ± 0.96^{ef}	派克市场烘焙咖啡豆	64.09 ± 2.44^{bcd}	42.08 ± 0.79^{h}



注: 方格内数值为抗氧化性指标的斯皮尔曼相关系数和对应的 *P*; 颜色深浅与绝对值大小正相关, 红色代表正相关, 蓝色代表负相关; ns 表示不具有显著性差异, *P*>0.05, **表示具有极显著差异, *P*<0.01, ***表示具有强极显著差异, *P*<0.001。

图 2　咖啡中各成分与抗氧化性的相关性分析

Fig.2　Correlation analysis of various components and antioxidant properties in coffee

3 讨　论

咖啡冲泡后的整体风味, 是咖啡中多种呈味物质共同作用的综合体现, 已有研究显示, 咖啡豆中的咖啡因和葫芦巴碱含量与大部分杯测品质指标之间存在负相关关系。而绿原酸则与之相反, 绿原酸能够显著提升各项杯测属性, 尤其对咖啡酸度的改善作用最为突出[21]。作为咖啡豆中生物碱含量最高的咖啡碱, 咖啡因是咖啡中最核心的苦味来源; 而葫芦巴碱则是咖啡中的第二大类生物碱, 属于吡啶类生物, 在阿拉比卡和罗布斯塔的咖啡豆中平均含量为 1%。加热后极易降解, 深度烘焙后残留量只有 0.1%~0.2%[22]。这两种生物碱都对咖啡的苦涩感有着重要的作用。其中, 葫芦巴碱可参与咖啡香气的形成, 而咖啡因主要贡献苦味, 这也一定程度上解释了精品咖啡豆品质更优的原因, 即商业咖啡豆咖啡因含量更高, 苦味表现更为突出[23]。

绿原酸作为咖啡中关键的酚酸类化合物, 不仅具备显著的生物学功能, 还对咖啡的风味与色泽形成具有重要作用, 其具有降血脂、抗氧化、抗菌等多种生理活性[22], Asamenew 等[24]的研究也证实, 绿原酸能显著降低胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白和升高高密度脂蛋白等多种生理活性, 显示出良好的身体调节能力。在烘焙咖啡风味的形成过程中, 绿原酸扮演着重要角色, 与咖啡的涩味、苦味和酸味有着密切的联系[25]。烘焙阶段, 绿原酸受热发生降解, 转化为苦味酚及酚类芳香物质; 与此同时, 该反应亦参与了咖啡色泽的构建, 构成了咖啡色素沉积与涩感形成的主要机制[22]。值得注意的是, 绿原酸浓度不同对咖啡滋味的影响存在差异, 低浓度的绿原酸会增加咖啡的苦味, 而高浓度则会突出其酸味[26]。此外, 咖啡中酸、苦等味觉平衡的形成, 也离不开绿原酸与有机酸、咖啡因等非挥发性化合物的协同作用[27]。本研究的结果显示, 精品咖啡豆中绿原酸的整体含量显著高于商业咖啡豆, 这一差异不仅使得精品咖啡在生理活性上更具优势, 也为其更丰富的风味层次、更协调的酸苦平衡提供了重要的物质支撑。

咖啡的酸度特性已被证实为消费者接受度与喜爱度的重要决定因素[28]。另有研究表明, 消费者对咖啡酸度的喜好存在明显群体差异, 部分消费者对酸度表现出积极偏好, 而另一部分消费者则对酸度较为敏感, 反应消极[29]。在咖啡的各种有机酸中, 苹果酸和柠檬酸所呈现出的酸味是一种更清爽、更柔和的, 在感官上属于一种能提高咖啡风味舒适度的愉悦酸性物质[30–31]。奎宁酸和乳酸除了贡献酸味外, 还带有明显的涩味, 对咖啡的口感层次有一定的调控作用[32–33]。草酸作为咖啡中重要的有机酸之一, 可进一步丰富咖啡的风味层次, 提升整体感官品质[33]。咖啡中各类有机酸并非独立发挥作用, 而是通过相互协同、相互制衡, 共同塑造了冲泡后咖啡的多样风味特征。同时, 不同等级咖啡豆中各类酸味物质的含量差异, 会导致咖啡整体酸度、口感复杂度呈现明显区别, 这也是精品咖啡与商业咖啡在风味表现上形成明显差异的重要原因之一, 进一步印证了有机酸组成对咖啡品质的关键影响。

咖啡富含多酚、黄酮类物质, 同时含有咖啡因、绿原酸等多种活性成分, 共同赋予咖啡较强的抗氧化活性[34]。本研究结果显示, 精品咖啡豆中的总黄酮含量明显高于商业咖啡豆, 而总酚含量在两类咖啡豆中差异不大, 在 $ABTS^+$自由基清除能力方面, 精品咖啡豆表现出较商业咖啡豆略强的抗氧化活性。相关性分析进一步表明, 总黄酮、总酚、葫芦巴碱、奎宁酸及绿原酸的含量与 $ABTS^+$自由基清除能力之间存在显著的正相关关系, 明确了咖啡中标志性成分对抗氧化活性的贡献机制。

4　结　论

精品咖啡豆与商业咖啡豆在咖啡因、葫芦巴碱、绿原酸及有机酸等核心组分上差异明显。相较而言, 精品咖啡豆中葫芦巴碱、绿原酸、奎宁酸等物质的积累量更高, 由此赋予其更为复杂的感官风味特征。精品咖啡豆中总黄酮含量强极显著高于商业咖啡豆(P<0.001), 总酚、总黄酮等

成分与 ABTS 抗氧化活性显著相关，与 DPPH 无明显关联。综上，不同等级咖啡豆的风味物质组成、活性成分含量存在明显区别，直接导致其抗氧化特性与整体品质呈现差异化特征，在决定咖啡苦、酸口感的核心物质含量及配比方面，精品咖啡豆与商业咖啡豆的差异尤为突出。明确两类咖啡豆的成分差异与品质机制，能够为咖啡品质综合评价、优质咖啡原料选育、咖啡精深加工技术研发提供可靠的理论依据，也可以为咖啡产业的品质优化和精细化提供有力支撑。

参考文献

[1] 李国明, 刘小琼, 匡钰, 等. 不同初加工处理方式对瑞丽小粒咖啡豆游离氨基酸含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 33–43.
Li Guoming, Liu Xiaoqiong, Kuang Yu, et al. Effects of different primary processing methods on the content of free amino acids in *Ruili arabica* coffee beans [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 33–43.

[2] 施雪颖. 不同品种、产地和加工方式烘焙咖啡豆的风味特征研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024: 1.
Shi Xueying. Research on the flavor characteristics of roasted coffee beans with different varieties, origins, and processing methods [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024: 1.

[3] Cordoba N, Pataquiva L, Osorio C, et al. Effect of grinding, extraction time and type of coffee on the physicochemical and flavour characteristics of cold brew coffee [J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 8440.

[4] 周雄. 烘焙咖啡豆贮藏过程香气变化与烘焙硫香风味消褪的机理探索[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024: 1.
Zhou Xiong. Exploration of the mechanisms behind aromatic changes during the storage of roasted coffee beans and the diminishing of sulfur-related flavors [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2024: 1.

[5] Atlabachew M, Abebe A, Alemneh W T, et al. Rapid and simultaneous determination of trigonelline, caffeine, and chlorogenic acid in green coffee bean extract [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(9): 5028–5035.

[6] Ayseli M T, Kelebek H, Selli S. Elucidation of aroma-active compounds and chlorogenic acids of Turkish coffee brewed from medium and dark roasted *Coffea arabica* beans [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 127821.

[7] Passos C P, Costa R M, Ferreira S S, et al. Role of coffee caffeine and chlorogenic acids adsorption to polysaccharides with impact on brew immunomodulation effects [J]. Foods, 2021, 10(2): 378.

[8] 智美丽, 徐学万, 吴立涛, 等. 不同地域烘焙咖啡豆风味性物质的检测与评价[J]. 农产品质量与安全, 2021(3): 84–90.
Zhi Meili, Xu Xuewan, Wu Litao, et al. Detection and evaluation of the flavor substances of roasted coffee beans in different regions [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2021(3): 84–90.

[9] 高雪峰, 高健, 门中华, 等. 超声提取碱韭总黄酮及其抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(3): 197–206.
Gao Xuefeng, Gao Jian, Men Zhonghua, et al. Study on extraction of total flavonoids from *Allium polyrhizum* Turcz. ex Regel by ultrasonic-assisted extraction method and antioxidant activity [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(3): 197–206.

[10] Borrelli R C, Visconti A, Mennella C, et al. Chemical characterization and antioxidant properties of coffee melanoidins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(22): 6527–6533.

[11] Bolka M, Emire S A. Effects of coffee roasting technologies on cup quality and bioactive compounds of specialty coffee beans [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(10): 1–11.

[12] 陈桃, 张昂, 董云萍, 等. 海南不同产区咖啡生豆的关键风味物质差异[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2025, 40(2): 108–118.
Chen Tao, Zhang Ang, Dong Yunping, et al. Differences in the key flavour compounds of green coffee beans in different producing regions of hainan [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2025, 40(2): 108–118.

[13] 刘帅民, 黄冠儒, 陈赶林, 等. 不同窨制工艺对茉莉咖啡风味品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(9): 239–246.
Liu Shuaimin, Huang Guanru, Chen Ganlin, et al. Effects of different scenting techniques on the flavor quality of jasmine coffee [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(09): 239–246.

[14] 何兰香, 丁科, 谢明华. 等. 酶法-超声提取黄精总黄酮及其抗氧化活性研究[J]. 中国现代应用药学, 2019, 36(9): 1075–1080.
He Lanxiang, Ding Ke, Xie Minghua, et al. Study on enzymatic-ultrasonic assisted extraction of total flavonoids from *Polygonatum sibirici* and its antioxidant activities [J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2019, 36(9): 1075–1080.

[15] 余平莲, 俞媛瑞, 张帮磊. 等. 马铃薯皮渣中总酚和单体酚的检测方法研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(6): 157–165.
Yu Pinglian, Yu Yuanduan, Zhang Banglei, et al. Study on the determination of total phenols and monomer phenols of potato peel residue [J]. China Food Additives, 2022, 33(6): 157–165.

[16] 奎晶, 宋晓凡, 马晓花. 等. 鹿角菜多酚提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(9): 98–106.
Kui Jing, Song Xiaofan, Ma Xiaohua, et al. Optimization of extraction process of polyphenols from Pelvetia siliquosa and their antioxidant activity [J]. China Food Additives, 2023, 34(9): 98–106.

[17] 吕金慧, 郑中兵, 吴涛. 等. 8 种海南热带水果的抗氧化活性比较分析[J]. 南方农业学报, 2023, 54(8): 2388–2395.
Lv Jinhui, Zheng Zhongbing, Wu Tao, et al. Antioxidant activity comparison of eight kinds of tropical fruits in Hainan [J]. Journal of Southern Agriculture, 2023, 54(8): 2388–2395.

[18] Sunarharum W B, Williams D J, Smyth H E. Complexity of coffee flavor: a compositional and sensory perspective [J]. Food Research International, 2014, 62: 315–325.

[19] 黄晓旭, 张勇, 夏斌. 咖啡酸味特性研究进展[J]. 热带农业科技, 2024, 47(1): 23–27.
Huang Xiaoxu, Zhang Yong, Xia Bin. Research progress on the sour taste characteristics of coffee [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2024, 47(1): 23–27.

[20] Yeager S E, Batali M, Guinard J X, et al. Acids in coffee: a review of sensory measurements and meta-analysis of chemical composition [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021. DOI: 10.1080/10408398.2021.1957767.

[21] Cortés F M, Pérez S J A, Servín 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.

[22] Saud S, Salamatullah A M. Relationship between the chemical composition and the biological functions of coffee [J]. Molecules, 2021, 26(24): 7634.

[23] Feifei W, Tanokura M. Chemical changes in the components of coffee beans during roasting [M]. Coffee in Health and Disease Prevention. Amsterdam: Elsevier, 2015: 83–91.

[24] Asamenew G, Kim H W, Lee M K, et al. Comprehensive characterization of hydroxycinnamoyl derivatives in green and roasted coffee beans: a new group of methyl hydroxycinnamoyl quinate [J]. Food Chemistry, 2019, 2: 100033.

[25] Farah A, de Paulis T, Trugo L C, et al. Effect of roasting on the formation of chlorogenic acid lactones in coffee [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(5): 1505–1513.

[26] Tripetch P, Borompichaichartkul C. Effect of packaging materials and storage time on changes of colour, phenolic content, chlorogenic acid and antioxidant activity in *Arabica* green coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor) [J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 84: 101510.

[27] 封华明, 宋佳慧, 李国华, 等. 咖啡液风味优化: 萃取温度的关键作用及机制探索 [J/OL]. 中国食品学报, 1–12. [2026-08-23]. https://link.cnki.net/urlid/11.4528.TS.20260114.1506.004.
Feng Huaming, Song Jiahui, Li Guohua, et al. Flavor optimization of coffee liquid: the key role and mechanism of extraction temperature [J/OL]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 1–12. [2026-08-23]. https://link.cnki.net/urlid/11.4528.TS.20260114.1506.004.

[28] Frost S C, Ristenpart W D, Guinard J X. Effect of basket geometry on the sensory quality and consumer acceptance of drip brewed coffee [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(8): 2297–2312.

[29] Cotter A R, Battali M E, Ristenpart W D, et al. Consumer preferences for black coffee are spread over a wide range of brew strengths and extraction yields [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(1): 194–205.

[30] Rodrigues C I, Marta L, Maia R, et al. Application of solid-phase extraction to brewed coffee caffeine and organic acid determination by UV/HPLC [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2007, 20(5): 440–448.

[31] Jumhawan U, Putri S P, Yusianto, et al. Selection of discriminant markers for authentication of Asian palm civet coffee (Kopi Luwak): a metabolomics approach [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2013, 61(33): 7994–8001.

[32] Hartwig P, McDaniel M R. Flavor characteristics of lactic, malic, citric, and acetic acids at various pH levels [J]. Journal of Food Science, 1995, 60(2): 384–388.

[33] Da Conceicao-Neta E R, Johanningsmeier S D, McFeeters R F. The chemistry and physiology of sour taste: a review [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(2): R33–R38.

[34] Asy'ari-Hasbullah U H, Rini-Umiyati D. Antioxidant activity and total phenolic compounds of *Arabica* and robusta coffee at different roasting levels [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1764(1): 012033

(责任编辑: 韩晓红　蔡世佳)