

李雪瑞, 严静, 刘秀徽, 等. 基于主成分分析优化咖啡微水脱胶工艺 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 217–224. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100096

LI Xuerui, YAN Jing, LIU Xiuwei, et al. Optimization of Coffee Micro-water Degumming Process Based on Principal Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 217–224. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100096

· 工艺技术 ·

基于主成分分析优化咖啡微水脱胶工艺

李雪瑞, 严 静, 刘秀徽, 吴昕怡, 杨态仙, 潘 俊, 朱志妍, 田 浩*, 李 宏*
(云南省农业科学院农产品加工研究所, 云南昆明 650205)

摘 要: 为优化微水脱胶工艺, 本文分析机械脱皮脱胶+晒干 (A)、机械脱皮脱胶+烘干 (B)、手工脱皮+带胶烘干 (C)、机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干 (D) 及手工脱皮+水洗脱胶+烘干 (E) 五种不同加工工艺对咖啡生豆中香味前体物质 (蛋白质、粗脂肪)、滋味呈味物质 (咖啡因、绿原酸、咖啡酸) 及挥发性物质相对含量的影响。结果显示, 机械脱皮脱胶+烘干处理组相比于手工脱皮+带胶烘干处理组, 随着果胶残留量的增加, 咖啡生豆中绿原酸、咖啡酸含量显著增加 ($P<0.05$), 蛋白质含量显著减少 ($P<0.05$); 机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干处理组相比于机械脱皮脱胶+烘干处理组, 咖啡生豆中粗脂肪、咖啡酸含量显著增加 ($P<0.05$); 机械脱皮脱胶+烘干处理组相比于机械脱皮脱胶+晒干处理组, 咖啡生豆中绿原酸、咖啡酸含量显著增加 ($P<0.05$)。手工脱皮+带胶烘干、手工脱皮+水洗脱胶+烘干处理后咖啡生豆中蛋白质、粗脂肪、咖啡因含量均较低, 机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干处理后咖啡生豆中蛋白质含量最高, 达 13.71%, 粗脂肪含量仅次机械脱皮脱胶+晒干, 为 9.84%。按照品质指标综合得分由高到低排名: $D>B>A>E>C$, PCA 得分图将样品 B、D 归在一个象限, 其他处理分别位于不同象限, 这说明机械脱皮脱胶+烘干与机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干处理组的咖啡生豆品质差异较小, 而其他处理组的咖啡生豆品质差异较大。挥发性物质相对含量分析结果表明手工脱皮+水洗脱胶+烘干处理组咖啡生豆中正十八烷 (4.80 $\mu\text{g/g}$)、大马士酮 (1.85 $\mu\text{g/g}$)、邻苯二甲酸二丁酯 (20.28 $\mu\text{g/g}$) 等对风味有主要贡献的化合物含量高于机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干处理组 (1.63、0.94、4.07 $\mu\text{g/g}$), 随果胶残留量的减少, 咖啡生豆中化合物含量整体呈现减少的趋势。综上所述, 充分发挥果胶的作用能得到风味丰富的咖啡生豆, 而机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干的微水脱胶工艺则能得到综合品质最佳的咖啡生豆, 这为云南精品咖啡豆及发酵风味咖啡豆的加工提供思路。

关键词: 咖啡, 脱胶工艺, 干燥方法, 品质, 主成分分析

中图分类号: TS255.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)18-0217-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100096



本文网刊:

Optimization of Coffee Micro-water Degumming Process Based on Principal Component Analysis

LI Xuerui, YAN Jing, LIU Xiuwei, WU Xinyi, YANG Taixian, PAN Jun, ZHU Zhiyan, TIAN Hao*, LI Hong*

(Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Yunnan Academy of
Agricultural Sciences, Kunming 650205, China)

Abstract: To optimize the micro-water degumming process, this study investigated the effects of different processing techniques including mechanical peeling degumming+sun drying (A), mechanical peeling degumming+heat pump drying (B), manual peeling+heat pump drying (C), mechanical peeling degumming+water soaking degumming+heat pump drying (D), and manual peeling+water soaking degumming+heat pump drying (E) on the content of aroma precursors (protein and crude fat), taste-producing substances (caffeine, chlorogenic acid and caffeic acid), and volatile substances in green coffee beans. The results showed that compared to the manual peeling degumming+heat pump treatment group, the mechanical peeling degumming+heat pump drying group exhibited a significantly increased chlorogenic acid and caffeic acid contents

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 现代农产品加工科技支撑专项经费。

作者简介: 李雪瑞 (1990-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: lxr@yaas.org.cn。

* 通信作者: 田浩 (1982-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 特征成分精准加工体系研究, E-mail: tianhao@yaas.org.cn。

李宏 (1974-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: ynvveg@163.com。

in raw coffee beans, a significantly decreased ($P<0.05$) protein content with the increase in pectin residue ($P<0.05$). The content of crude fat and caffeic acid in raw coffee beans significantly higher in the mechanical peeling degumming+water soaking degumming+heat pump drying treatment group than in the mechanical peeling degumming+heat pump drying treatment group ($P<0.05$). Chlorogenic acid and caffeic acid contents in raw coffee beans were significantly higher in the mechanical peeling degumming+heat pump drying treatment group than in the mechanical peeling degumming+sun-drying treatment group ($P<0.05$). The contents of protein, crude fat, and caffeine in green coffee beans were lower in manual peeling+heat pump drying (C) and manual peeling+water soaking degumming+heat pump drying (E). The protein content in green coffee beans was the highest (13.71%) in mechanical peeling degumming+water soaking degumming+heat pump drying(D), and its crude fat content was only second (9.84%) to mechanical peeling degumming+sun drying (A). According to the overall score of quality indicators from high to low, the 5 treatment groups were ranked as $D>B>A>E>C$. The PCA score plot grouped samples B and D into one quadrant, and the samples in other treatment groups were located in different quadrants, which indicated a relatively small difference in the quality of raw coffee beans between the mechanical peeling degumming+heat pump drying group and mechanical peeling degumming+water soaking degumming+heat pump drying treatment group, while the difference in quality of raw coffee beans among the other treatment groups was dramatic. The analysis results of the relative content of volatile substances showed that raw coffee beans in the manual peeling+water soaking degumming+heat pump drying treatment group contained more main flavor compounds such as n-octadecane (4.80 $\mu\text{g/g}$), damascenone (1.85 $\mu\text{g/g}$), dibutyl phthalate (20.28 $\mu\text{g/g}$) than those in the mechanical peeling degumming+water soaking degumming+heat pump drying treatment group (1.63, 0.94, 4.07 $\mu\text{g/g}$), and compounds in raw coffee beans exhibited an overall decreasing trend with decreasing pectin residues. Taken together, rich flavor could be obtained from green coffee beans by taking advantage of pectin, and the optimal comprehensive quality could be obtained from the micro-water degumming process, namely, mechanical peeling degumming+water soaking degumming+heat pump drying. The findings would provide new perspectives for the processing of the Yunnan fine coffee beans and fermented flavor coffee beans.

Key words: coffee; degumming process; drying method; quality; principal component analysis

云南咖啡种植面积、产量、农业产值均占全国的 98% 以上, 咖啡豆产量在 14 万吨左右^[1], 其中 80% 以上都是采取湿法加工的方式生产水洗咖啡, 此工艺主要包括机械脱皮、浸泡自然发酵脱胶、大量用水清洗、晒场自然晾晒^[2]。其中脱胶工艺在咖啡初加工过程中对咖啡豆品质具有重要影响^[3]。最近, 无水脱胶、微水脱胶成为应用热点, 无水脱胶主要以巴西 Pinhalense 公司的生态型脱皮脱胶组合机为主, 微水脱胶则以普洱富民农业装备有限公司的 WSX-5 咖啡无水脱皮微水脱胶加工系统为主, 这两种方法的特点是一次性脱皮脱胶然后直接进入干燥环节, 但是也存在脱胶不干净导致果胶残留量不同, 是否增加再次水浸泡脱胶环节的争议^[4-5]。干燥过程影响咖啡加工的质量和效率, 任何加工方法处理后都需使生豆的含水量达到 10%~12%。传统干燥采用自然晾晒干燥, 人工劳动强度大, 受天气和人为因素影响大, 干燥质量较难保证。机械烘干可以缩减干燥时间, 并减少微生物污染的风险。目前, 背压式热风干燥及热泵干燥等技术研究成为热点。但是研究者发现热泵干燥在保持咖啡整体风味品质方面优于热风干燥^[6-7]。关于热泵干燥的温度, Borem 等^[8]发现随干燥温度升高, 咖啡豆的质膜和囊泡细胞完整性发生改变, 至 60 $^{\circ}\text{C}$ 时, 细胞原生质发生泄漏, 最佳的热泵干燥工艺尚在摸索。

脂类、蛋白质是咖啡主要的香气前体物, 咖啡因、绿原酸、咖啡酸是咖啡滋味的主要呈味物质^[9-10],

这些非挥发性前体物经咖啡的烘焙过程转化为有气味的分子^[11]。同时生咖啡豆中含量丰富的挥发性物质, 也对烘焙咖啡豆香气形成至关重要。前人研究发现咖啡生豆中挥发性物质主要为酯类、醛类、醇类、酸类、烷烃类、酮类等, 比如云南保山、德宏、临沧和普洱 4 个地区生咖啡豆中挥发性物质主要以酸类为主, 相对含量占 32.96%, 其次为酮类、醇类、碳氢类、酯类及醛类^[12-13]。脱胶工艺和干燥工艺影响着咖啡生豆中挥发性物质的含量。研究表明, 湿法加工过程中用水脱胶的这个过程使得咖啡生豆的各种代谢活动得到保存^[14], 其中果胶起主要作用^[15], 咖啡鲜果初加工过程中微生物分解果胶, 激活咖啡风味物质, 使其透过羊皮纸进入咖啡生豆内^[16]。Wang 等^[17]关于咖啡的综述也表明水洗工艺为咖啡带来更好的品质与稳定的风味。干燥工艺对咖啡风味的影响, 董文江等研究发现热泵干燥温度低于 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, 与日晒样品差异较小, 高于 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, 风味前体物及挥发性成分与日晒样品存在显著差异^[18]。但是, 关于脱胶工艺和干燥工艺对咖啡生豆品质及挥发性物质的具体影响鲜有研究, 这对优化工艺尤为重要。

本研究利用手工脱皮的方式让咖啡鲜果的果胶最大限度保留, 设置了机械脱皮脱胶+晒干、机械脱皮脱胶+烘干、手工脱皮+带胶烘干、机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干、手工脱皮+水洗脱胶+烘干, 5 个不同处理组, 探究不同加工工艺对咖啡香气前体物质蛋白质、粗脂肪, 咖啡滋味呈味物质咖啡因、咖啡酸、绿原酸及咖啡生豆的挥发性物质含量的影响, 从

而优化微水脱胶工艺,为提高咖啡豆的精品率提供思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

咖啡鲜果 采自云南省保山市潞江坝,1500 m 海拔的卡蒂姆品种。新鲜采摘的咖啡鲜果迅速运回至实验室,每个加工处理 20 kg。

AF-150-800 咖啡鲜果脱皮、脱胶一体机 云南奥福实业有限公司;DRC-2X 脱壳机 Pinhalense 公司;TF-KG01-Z/2 箱式热泵烘干机 四川蜀冷冷暖设备有限公司;SMF2002(019-A7)磨粉机 浙江苏泊有限公司;Pro-100 咖啡烘焙机 IKAWA 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 参照湿法加工的方法^[2],结合生产实际及前期预实验对样品脱胶后果胶残留量、干燥处理方法进行工艺改进,样品处理试验设置如表 1 所示。

取 10 g 生豆样品经过磨粉机研磨过 40 目筛,剩余样品用同一烘焙曲线浅度烘焙,获得 5 组熟咖啡豆样品,同样经过研磨机研磨后过 40 目筛,留样检测。

1.2.2 咖啡内含物检测方法 蛋白质采用 GB/T 5511-2008 标准测定^[21];粗脂肪按照 GB/T 6433-2006 标准测定^[22];咖啡因采用 GB/T 19182-2003 标准测定^[23];咖啡酸、绿原酸按照 YC/T 202-2006 标准测定^[24]。

1.2.3 挥发性风味物质测定 蒸馏萃取(SDE)的条件:样品 25 g,加入 20 g 固体 NaCl 和 400 mL 去离子水,蒸馏萃取 3 h,将提取液和 40 mL 二氯甲烷混合物经无水硫酸钠干燥,然后加入 1 mL 混合内标(癸醇、乙酸苯乙酯、癸醇、烟酸甲酯),在旋转蒸发仪 40 ℃ 水浴中浓缩至 1 mL 于进样瓶中进行 GC/MS 分析。色谱条件:色谱柱:HP-5MS(Agilent19091S433: 30 m×0.25 mm×0.25 mm);进样口温度:260 ℃;进样量和分流比:1 μl,20:1;接口温度:280 ℃;升温程序:60 ℃(2 min)以 2 ℃/min 升至 260 ℃(10 min)再以 5 ℃/min 升至 280 ℃(10 min);载气:氮气;尾吹:氮气;流速:1.2 ml/min;离子源温度:230 ℃;四级杆温度:150 ℃;扫描范围:30~550 amu;谱库:NIST 08;Agilent 化学工作站^[25]。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件处理数据,SPSS 20.0 软件进行标准差及差异显著性分析(当 $P<0.05$ 时,差异显著),采用 LSD、Duncan 多重比较的统计方法,SIMCA 14.1 软件进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同加工工艺对咖啡生豆中蛋白质含量的影响

蛋白质作为咖啡烘焙过程美拉德反应氨基提供的前体物质,与含羧基的糖类化合物发生反应生成醛、酮等物质,对咖啡的色泽、香气和滋味有巨大影响^[26]。如图 1 所示,不同加工方式处理的生咖啡豆中粗蛋白含量均在 12% 以上,机械脱皮脱胶+烘干与手工脱皮+带胶烘干处理组之间蛋白质含量有显著性差异($P<0.05$),分别为 13.42%、12.21%;机械脱皮脱胶+烘干与机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干处理组之间蛋白质含量无显著性差异($P>0.05$),含量分别为 13.42%、13.71%;机械脱皮脱胶+晒干与机械脱皮脱胶+烘干处理组蛋白质含量之间无显著性差异($P>0.05$),含量分别为 13.25%、13.42%。实验结果表明,改变果胶残留量对生咖啡豆中的蛋白质含量具有显著影响($P<0.05$),但增加水浸泡脱胶工艺、改变干燥方式对咖啡生豆中蛋白质含量无显著影响($P>0.05$)。这可能是由于果胶残留量高,带胶烘干时蛋白质长期暴露在高温下而变性,水浸泡脱胶时微生物分解蛋白质,且前者作用强于后者,因此其含量降低。

2.2 不同加工工艺对咖啡生豆中粗脂肪含量的影响

脂肪是咖啡中的一种风味前体物质,在高温下易被氧化分解,其氧化产物能够作为替代物阻碍氨基酸斯特雷克尔降解产物参与丙烯酰胺的合成,其含量差异会对烘焙过程美拉德反应产生影响^[27-28]。如图 2 所示,生咖啡豆中,机械脱皮脱胶+烘干、手工脱皮+带胶烘干处理组粗脂肪含量之间无显著性差异($P>0.05$),分别为 9.39%、9.02%;机械脱皮脱胶+晒干、机械脱皮脱胶+烘干处理组粗脂肪含量之间有显著性差异($P<0.05$),分别为 9.85%、9.39%;机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干、机械脱皮脱胶+烘干处理组之间粗脂肪含量有显著性差异($P<0.05$),分别为 9.84%、

表 1 样品处理试验设置

Table 1 Experiment setting for sample treatment

编号	处理	具体方法
A	机械脱皮脱胶+晒干	鲜果采摘后清洗、剔除漂浮果和异物,用脱皮脱胶一体机脱外果皮及果胶,之后晒场上自然晾晒至含水量为12%左右 ^[19]
B	机械脱皮脱胶+烘干	鲜果清洗挑选同上,用脱皮脱胶一体机脱外果皮及果胶,之后用热泵烘干机50 ℃烘干 ^[18] 至含水量为12%左右
C	手工脱皮+带胶烘干	鲜果清洗挑选同上,手工脱去外果皮,最大限度保留果胶,之后用热泵烘干机50 ℃烘干至含水量为12%左右
D	机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干	鲜果清洗挑选同上,用脱皮脱胶一体机脱外果皮及果胶,将残留有果胶的咖啡鲜果放入清水中浸泡至手摸咖啡豆表面有粗糙感,表明果胶已去除 ^[20] ,之后用热泵烘干机50 ℃烘干至含水量为12%左右
E	手工脱皮+水洗脱胶+烘干	鲜果清洗挑选同上,手工脱去外果皮,最大限度保留果胶,将带有果胶的咖啡鲜果放入清水中浸泡至手摸咖啡豆表面有粗糙感,表明果胶已去除,之后用热泵烘干机50 ℃烘干至含水量为12%左右

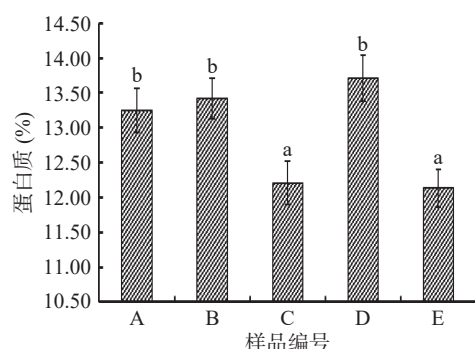


图1 不同加工工艺咖啡生豆中蛋白质含量

Fig.1 Protein contents of green coffee beans under different processing

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 图2~图5同。

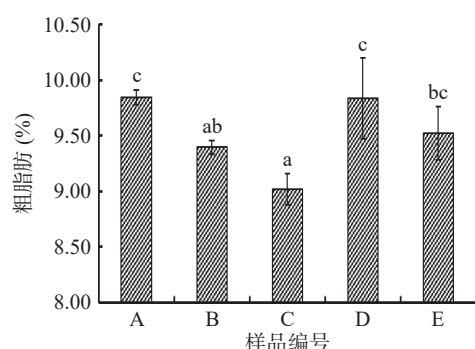


图2 不同加工工艺咖啡生豆中粗脂肪含量

Fig.2 Fat contents of green coffee beans under different processing

9.39%。实验结果表明, 咖啡的粗脂肪含量与烘干前果胶含量的多少无关; 机械脱皮后, 烘干与晒干对咖啡的粗脂肪含量影响显著 ($P < 0.05$); 机械脱皮保持相同的果胶残留量, 水洗脱胶再烘干与直接烘干对咖啡生豆的粗脂肪含量有显著影响 ($P < 0.05$)。这可能是由于水洗脱胶过程中脂类化合物在酶的作用下发生水解生成游离脂肪酸, 但烘干处理温度较高, 脂类的氧化速率增加, 生成氢过氧化物, 粗脂肪含量降低。

2.3 不同加工工艺对咖啡生豆中绿原酸含量的影响

绿原酸是由咖啡酸和奎宁酸缩合而成的羟基肉桂酸类化合物, 其在生豆中含量丰富, 烘焙后生成绿原酸内酯等物质, 是咖啡中苦味物质的主要来源之一^[26,29]。如图3所示, 不同加工工艺处理后咖啡生豆中绿原酸含量之间差异显著 ($P < 0.05$), 含量由低到高: 机械脱皮脱胶+晒干 (42.35 mg/g) < 机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干 (45.04 mg/g) < 机械脱皮脱胶+烘干 (46.65 mg/g) < 手工脱皮+水洗脱胶+烘干 (49.27 mg/g) < 手工脱皮+带胶烘干 (55.02 mg/g)。绿原酸的分子结构中有酯键、不饱和双键及多元酚三个不稳定部分, 易因温度、pH 等外界环境因素的改变而发生水解或氧化^[30], 不同处理间差异显著可能是由于绿原酸水解及氧化程度不同, 手工脱皮后, 咖啡鲜果的营养物质得到最大程度的保留, 直接烘干又避

免了绿原酸等的流失, 再度水浸泡脱胶过程中微生物活动使得环境 pH 改变, 绿原酸作为一种咖啡酸奎宁酸酯发生一定程度的水解, 生豆中其含量降低。

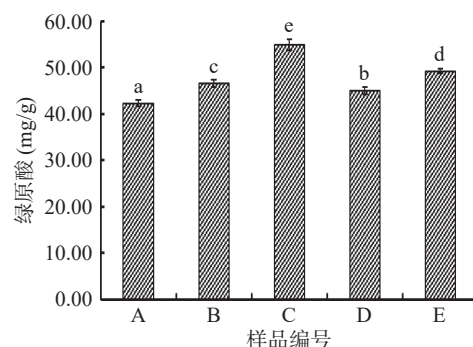


图3 不同加工工艺咖啡生豆中绿原酸含量

Fig.3 Chlorogenic acid contents of green coffee beans under different processing

2.4 不同加工工艺对咖啡生豆中咖啡酸含量的影响

咖啡酸是绿原酸的水解产物, 咖啡豆烘焙时发生的 Strecker 降解反应使得绿原酸分解为咖啡酸, 其是咖啡苦涩味的主要呈味化合物之一^[31-32]。如图4所示, 机械脱皮脱胶+晒干、机械脱皮脱胶+烘干处理组咖啡酸含量有显著性差异 ($P < 0.05$), 分别为 0.12、0.17 mg/g; 机械脱皮脱胶+烘干、手工脱皮+带胶烘干处理组咖啡酸含量之间有显著性差异 ($P < 0.05$), 分别为 0.17、0.23 mg/g; 机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干、机械脱皮脱胶+烘干处理组之间咖啡酸含量有显著性差异 ($P < 0.05$), 分别为 0.17、0.22 mg/g。实验结果表明, 机械脱皮脱胶后, 烘干与晒干对咖啡的咖啡酸含量影响显著 ($P < 0.05$); 烘干前果胶含量的多少对咖啡酸含量影响显著 ($P < 0.05$); 机械脱皮保持相同的果胶残留量, 水洗脱胶再烘干与直接烘干对咖啡豆的咖啡酸含量影响显著 ($P < 0.05$), 这可能与咖啡酸自身的结构特点及不同加工工艺的影响相关, 咖啡酸的分子结构中含有两个羟基、碳碳双键及羧基, 易发生聚合、氧化及加成等反应而发生降解, 晒干干燥时间长, 组织呼吸消耗多, 因此咖啡酸含量降低^[33]。

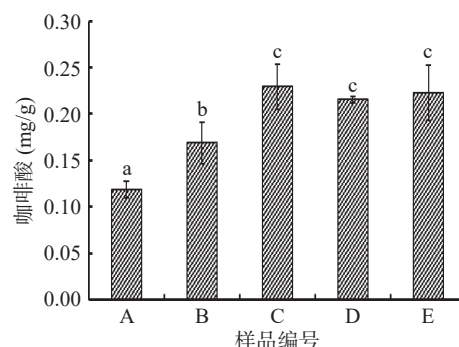


图4 不同加工工艺咖啡生豆中咖啡酸含量

Fig.4 Caffeic acid contents of green coffee beans under different processing

注: 小写字母表示不同加工工艺咖啡豆的咖啡酸含量的差异显著性 ($P < 0.05$)。

2.5 不同加工工艺对咖啡生豆中咖啡因含量的影响

咖啡因是生物碱类物质,是咖啡苦味的主要呈味物质之一^[32]。如图 5 所示,不同加工工艺处理的咖啡生豆中咖啡因含量均在 0.15% 左右,均接近平均值,虽然不同处理样品间有显著性差异($P<0.05$),但咖啡因结构稳定^[34],不同加工工艺处理后其含量相对稳定。机械脱皮脱胶+烘干处理的样品咖啡因含量最高,为 0.16%,手工脱皮+水洗脱胶+烘干处理组咖啡因含量最低,为 0.15%。

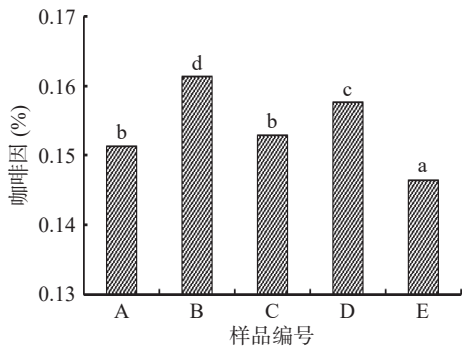


图 5 不同加工工艺咖啡生豆中咖啡因含量

Fig.5 Caffeine contents of green coffee beans under different processing

2.6 综合评价

2.6.1 主成分分析 利用主成分分析方法讨论 5 种加工处理方式后咖啡品质指标,结果见下表,提取得到 2 个主成分,贡献率分别为 60.054%、23.415%,累计贡献率为 83.469%。说明这 2 个主成分能代表原数据 83.469% 的信息。结合表 2~表 3 可知,主成分 1 的方差贡献率为 60.054%,蛋白质、粗脂肪、咖啡酸、绿原酸的载荷绝对值较高,其中蛋白质、粗脂肪对主成分 1 正向影响较大,绿原酸对主成分 1 负向影响较大,因此主成分 1 可作为蛋白质、粗脂肪、绿原酸的代表;主成分 2 的方差贡献率为 23.415%,其中咖啡因对主成分 2 正向影响较大。PCA 是一种无监督模式识别方法,通过原始变量的线性组合进行降维处理,将原始变量信息压缩至前几个主成分的多元统计方法^[35]。如图 6 所示,15 个样品数据点均分布于 95% 置信区间内,不同加工工艺有很好的区别效果,且品质存在一定差异,机械脱皮+烘干、机械脱皮+水洗脱胶+烘干处于同一象限,其他处理分别处于得分图的不同象限。机械脱皮+晒干与机械脱皮+烘干、机械脱皮+水洗脱胶+烘干对主成分 1 的影响较一致,手工脱皮+水洗脱胶+烘干、手工脱皮+带

表 2 主成分特征值及方差贡献率

Table 2 Eigenvalue and variance contribution rate of principal component

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累计方差贡献率(%)
1	3.003	60.054	60.054
2	1.171	23.415	83.469

胶烘干在主成分 1、2 上与其他处理距离均较远,表明水洗脱胶及烘干时果胶含量太高均会导致咖啡品质与传统处理产生较大差异。

表 3 主成分荷载矩阵

Table 3 Principal component loading matrix

理化指标	主成分1	主成分2
蛋白质	0.888	0.337
粗脂肪	0.778	-0.196
咖啡酸	-0.628	0.586
咖啡因	0.562	0.788
绿原酸	-0.948	0.234

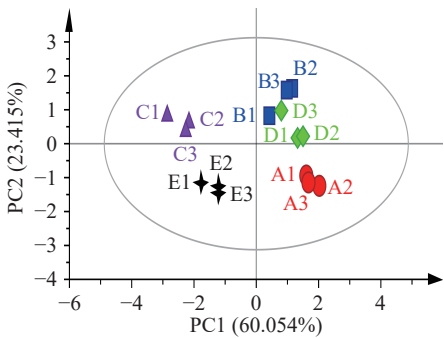


图 6 不同加工工艺咖啡豆品质主成分分析图

Fig.6 Principal component analysis of quality of coffee beans under different processing

2.6.2 主要品质综合评价 根据标准化后的品质指标及因子荷载矩阵计算,设主成分 F_1, F_2 , 以特征向量为权重建立 1 个主成分的表达式如下:

$$F_1=0.888X_1+0.778X_2-0.628X_3+0.562X_4-0.948X_5$$

$$F_2=0.337X_1-0.196X_2+0.586X_3+0.788X_4+0.234X_5$$

以主成分的方差贡献率为权重,构建不同干燥工艺咖啡的综合评价得分函数,公式为 $F_{综}=0.6005F_1+0.2342F_2$ 。根据综合评价模型计算不同干燥工艺咖啡的得分并排名,结果如表 4 所示。

表 4 不同加工工艺咖啡生豆主成分分析综合得分

Table 4 Comprehensive score of principal component analysis of green coffee beans under different processing

加工工艺	F_1	F_2	$F_{综}$	排名
A	0.540	-0.365	0.175	3
B	0.303	0.173	0.477	2
C	-0.901	0.038	-0.864	5
D	0.496	0.263	0.759	1
E	-0.437	-0.109	-0.547	4

F 值越大,表明该加工工艺咖啡的综合品质越好。机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干,其品质的综合得分最高,综合品质最好,其次是机械脱皮脱胶+烘干和机械脱皮脱胶+晒干,得分最低的是手工脱皮+带胶烘干,可能由于烘干时果胶的存在使得咖啡鲜果过度发酵。

2.7 不同加工工艺生咖啡豆挥发性风味物质分析

通过与 NIST 08 谱图库对照,从各处理组中共

鉴定出 30 种挥发性成分,对其进行定性定量分析得到表 5,30 种挥发性风味物质中变异系数最大的是蒎烷的含量,达 76.99%,最小的是正十六烷,仅为 29.27%,表明这 30 种挥发性风味物质变异较大。30 种挥发性风味物质中包含酮类 4 种、烯类 3 种、酚类 2 种、烷烃 10 种、醛类 3 种、酯类 7 种和酸类 1 种,文献报道咖啡豆挥发性化合物主要也是上述几类,诸如愈木酚、吡啶、糠醛、正十八烷和 β -大马士革酮等^[36],此实验中检测到的大马士革酮被 Wang 等^[17]认为是对烘焙咖啡豆风味有主要贡献的化合物之一,会产生花香、蜂蜜味,不同工艺加工咖啡后咖啡生豆中大马士革酮含量分别为 0.37、0.59、1、0.94、1.85 $\mu\text{g/g}$ 。酮类化合物主要呈奶油味和水果味^[37],如图 7 所示,5 种处理中手工脱皮+水洗脱胶+烘干处理组酮类化合物相对含量较高,达 29.39 $\mu\text{g/g}$,机械脱皮+水洗脱胶+烘干的酮类化合物相对含量最低,仅为 7.70 $\mu\text{g/g}$,烷烃类化合物、酚类物质、烯类化合物相对含量也显示相同的趋势,5 种处理化合物相对含量由高到低为:手工脱皮+水洗脱胶+烘干>手工脱皮+带胶烘干>

机械脱皮+晒干>机械脱皮+烘干>机械脱皮+水洗脱胶+烘干。醛类化合物主要呈奶油味^[37],5 种处理化合物相对含量由高到低为:手工脱皮+带胶烘干>手工脱皮+水洗脱胶+烘干>机械脱皮+晒干>机械脱皮+水洗脱胶+烘干>机械脱皮+烘干。酯类化合物呈现果香^[37],实验结果显示 5 种不同工艺加工后,酯类化合物相对含量最高,风味化合物酯类对咖啡质量有很大影响^[36]。不同处理酯类化合物含量由高到低为:机械脱皮+水洗脱胶+烘干(234.61 $\mu\text{g/g}$)>手工脱皮+水洗脱胶+烘干(117.78 $\mu\text{g/g}$)>手工脱皮+带胶烘干(108.54 $\mu\text{g/g}$)>机械脱皮+烘干(86.1 $\mu\text{g/g}$)>机械脱皮+晒干(61.44 $\mu\text{g/g}$),说明水洗脱胶工艺处理后咖啡生豆中酯类物质含量较高;酸类化合物主要呈现酸味^[28],其中机械脱皮+水洗脱胶+烘干相对含量最高为 11.22 $\mu\text{g/g}$,手工脱皮+带胶烘干处理相对含量最低为 4.12 $\mu\text{g/g}$ 。实验结果显示,保持高的果胶残留量再烘干及保持高的果胶残留量水洗脱胶后再烘干对咖啡生豆中烷烃类、酮类、烯类、酚类、醛类化合物均有较好的保持作用,晒干也能激发风味物质的产生,

表 5 不同加工工艺咖啡生豆的挥发性成分及其含量

Table 5 Volatile components and contents of green beans under different processing

峰号	物质	CAS	保留时间(min)	含量($\mu\text{g/g}$)					变异系数(%)
				A	B	C	D	E	
1	大马士革酮	23726-93-4	32.21	0.37	0.59	1	0.94	1.85	59.55
2	β -石竹烯	87-44-5	34.24	0.53	0.67	1.61	0.26	1.83	70.99
3	大根香叶烯	37839-63-7	37.96	0.52	0.3	0.31	0.25	0.55	35.57
4	2,6-二叔丁基对甲酚	128-37-0	40.03	0.52	7.21	3.82	1.95	7.85	75.06
5	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	40.52	25.66	13.92	29.49	8.71	40.57	53.54
6	正十六烷	544-76-3	45.55	0.67	0.79	1.34	0.77	1.03	29.27
7	1-十四烯	1120-36-1	49.37	0.72	0.52	1.19	0.47	1.15	42.20
8	正十七烷	629-78-7	51.03	1.03	1.05	1.64	0.78	1.66	32.16
9	肉豆蔻醛	124-25-4	51.56	9.05	4.23	12.63	6.5	7.90	38.72
10	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛	1620-98-0	53.59	0.22	0.49	0.63	0.67	1.00	47.32
11	环十四烷	1795-18-2	53.77	0.22	0.39	0.68	0.29	0.97	60.90
12	正十五烷	629-62-9	54.74	0.70	0.77	1.02	0.32	0.90	35.87
13	正十八烷	593-45-3	56.24	2.70	2.46	3.61	1.63	4.80	39.80
14	正十三烷	629-50-5	56.73	1.56	1.50	2.62	0.94	2.39	38.36
15	蒎烷	6876-13-7	58.11	8.98	2.7	5.24	1.23	13.02	76.99
16	植酮	502-69-2	58.30	14.54	6.08	15.36	5.52	19.85	50.90
17	邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	59.00	10.52	9.71	13.48	4.07	20.28	51.01
18	(9Z)-十八碳-9,17-二烯醛	56554-35-9	60.18	0.37	0.57	0.69	0.3	0.78	37.93
19	环十五烷	295-48-7	60.81	1.59	1.23	2.3	1.25	3.32	45.69
20	正十九烷	629-92-5	61.22	2.84	2.33	4.47	1.82	5.88	48.30
21	7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4.5]癸-6,9-二烯-2,8-二酮	82304-66-3	61.33	3.90	2.18	4.53	0.83	5.53	55.42
22	4-(3-羟基丁基)-3,5,5-三甲基环己-2-烯-1-酮	36151-02-7	61.71	0.48	1.94	1.63	0.41	2.16	62.24
23	1,2-环氧十八烷	7390-81-0	61.87	2.29	1.44	3.23	1.03	1.99	42.30
24	棕榈酸甲酯	112-39-0	62.35	2.78	1.8	6.06	11.33	5.16	68.62
25	棕榈酸乙酯	628-97-7	65.71	20.73	32.87	42.31	101.67	42.43	65.19
26	棕榈酸	57-10-3	66.30	8.73	1.35	4.12	11.22	10.25	71.99
27	亚油酸甲酯	112-63-0	69.97	2.48	2.63	4.98	8.01	3.25	54.19
28	亚油酸乙酯	544-35-4	73.06	15.79	31.24	32.81	85.41	30.41	68.39
29	油酸乙酯	111-62-6	73.34	6.41	4.95	5.39	14.61	10.12	49.11
30	硬脂酸乙酯	111-61-5	74.82	2.73	2.9	3.51	9.51	6.12	69.68

这可能是由于咖啡鲜果表面果胶含量高的样品,在直接带胶烘干、水洗脱胶、晒干过程中,微生物会产生一系列诸如酯、醛和酮等代谢产物,会扩散到咖啡豆使得化合物含量增加,这与 Gilberto 等^[19]的论述一致。

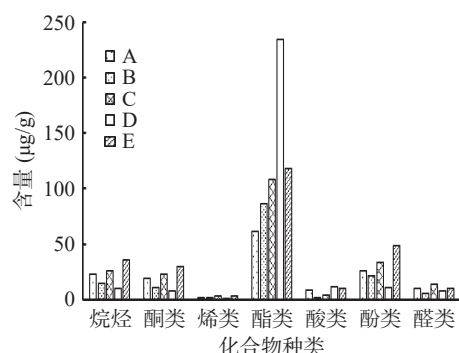


图 7 不同加工工艺生豆样品中挥发性物质含量对比图

Fig.7 Comparison of volatile substances content in green beans samples under different processing

3 结论

本文围绕着咖啡微水脱胶干燥工艺中脱皮后果胶残留量、是否再次水浸泡脱胶及干燥方式这三个关键环节对咖啡品质的影响展开讨论,研究结果显示,5 种咖啡加工工艺对咖啡生豆的香气前体物质蛋白质、粗脂肪及咖啡苦涩味的呈味物质咖啡酸、绿原酸、咖啡因含量影响显著($P < 0.05$),其中机械脱皮脱胶+水洗脱胶+烘干的微水脱胶工艺能得到综合品质最佳的咖啡生豆,而手工脱皮+水洗脱胶+烘干、手工脱皮+带胶烘干能得到风味丰富的咖啡生豆,这为云南发酵风味咖啡豆及精品咖啡豆的加工提供思路,下一步研究重点是不同工艺的关键控制点参数。

参考文献

[1] 阿里新服务研究中心. 阿里: 2022 中国咖啡产业发展报告[R]. 北京: 2022. [Ali New Service Research Center. Alibaba: Coffee industry development report in China[R]. Beijing: 2022.]

[2] 肖兵, 匡钰, 李维锐. 云南小粒种咖啡初加工工艺技术改进与创新[J]. 中国热带农业, 2018(6): 4-19. [XIAO B, KUANG Y, LI W R. Improvement and innovation of primary processing technology of Yunnan coffee[J]. Tropical Agriculture in China, 2018(6): 4-19.]

[3] 黄家雄, 孙有祥, 吕玉兰, 等. 咖啡机械脱胶技术研发与推广[J]. 中国热带农业, 2018(3): 65-68. [HUANG J X, SUN Y X, LV Y L, et al. Development and promotion of coffee mechanical degumming technology[J]. China Tropical Agriculture, 2018(3): 65-68.]

[4] 文志华. 生态型脱皮脱胶组合机用于咖啡初加工的若干技术问题[J]. 云南农业科技, 2002(5): 45-47. [WEN Z H. Some technical problems of ecological peeling and degumming combination machine for coffee primary processing[J]. Yunnan Agricultural Science and Technology, 2002(5): 45-47.]

[5] 毕晓菲, 胡发广, 陈雷, 等. 中国云南与巴西咖啡初级加工现状比较及存在问题探讨[J]. 农产品加工(学刊), 2014, 355(6): 68-70. [BI X F, HU G F, CHEN L, et al. Current situation and existing problem of coffee primary processing in Brazil and Yunnan, China[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014, 355(6): 68-70.]

[6] 陈治华, 林兴文, 罗映山, 等. 机械热风干燥技术在云南咖啡初加工中的应用[J]. 中国热带农业, 2014, 57(2): 1-2. [CHEN Z H, LIN X W, LUO Y S, et al. Application of mechanical hot air drying technology in the preliminary processing of Yunnan coffee[J]. China Tropical Agriculture, 2014, 57(2): 1-2.]

[7] KULAPICHIT R, BOROMPICHAICHARTKUL C, SUPPA-VORASATIT I, et al. Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee[J]. Food Chemistry, 2019, 291(S1): 49-58.

[8] BOREM F M, MARQUES E R, ALVES E. Ultrastructural analysis of drying damage in coffee endosperm cells[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 62-66.

[9] FADAI N T, PLEASE C P, GORDER R. Modelling structural deformations in a roasting coffee bean[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2019, 110: 123-130.

[10] POISSON L, AUZANNEAU N, MESTDAGH F, et al. New insight into the role of sucrose in the generation of α -diketones upon coffee roasting[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(10): 2422-2431.

[11] LEE K G, SHIBAMOTO T. Analysis of volatile components isolated from Hawaiian green coffee beans (*Coffea arabica* L.)[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2010, 17(5): 349-351.

[12] 程可, 董文江, 胡荣锁, 等. 微波真空干燥对咖啡豆风味成分的影响研究[J]. 热带作物学报, 2018, 39(2): 180-191. [CHEN K, DONG W J, HU R S, et al. Effect of microwave vacuum drying on flavor components of coffee beans[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(2): 180-191.]

[13] 董文江, 胡荣锁, 宗迎, 等. 利用 HS-SPME/GC-MS 法对云南主产区生咖啡豆中挥发性成分萃取与分析研究[J]. 农学学报, 2018, 8(9): 71-79. [DONG W J, HU R S, ZONG Y, et al. Application of HS-SPME/GC-MS in volatile components analysis of green coffee beans from major production areas in Yunnan province[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(9): 71-79.]

[14] KNOPP S, BYTOF G, SELMAR D. Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans[J]. European Food Research and Technology, 2006, 223(2): 195-201.

[15] 吴建, 蒋快乐, 时玲, 等. 云南小粒种咖啡初加工工艺发展现状及趋势[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(11): 205-213. [WU J, JIANG K L, SHI L, et al. Development status and trend of Yunnan Arabica coffee primary processing[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(11): 205-213.]

[16] 陈云兰, 陈治华, 蒋快乐, 等. 不同初加工工艺对云南阿拉比卡咖啡品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(2): 149-156. [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 and Technology, 2019, 35(2): 149-156.]

[17] WANG X Y, WANG Y B, HU G L, et al. Review on factors affecting coffee volatiles: from seed to cup[J]. Journal Science Food Agricultural, 2022, 102(4): 1341-1352.

[18] 董文江, 杨静园, 陆敏泉, 等. 热泵干燥对生咖啡豆活性物质和挥发性成分的影响研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(4): 141-149. [DONG W J, YANG J Y, LU M Q, et al. Effect of heat pump drying on the bioactive components and volatile compounds in green coffee beans[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(4): 141-149.]

[19] GILBERTO P, DAO N, ANTONIO J, et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans-A review[J]. Food Chemistry, 2019, 272(1): 441-452.

- [20] 胡红. 小粒咖啡脱胶技术研究[J]. *科学技术创新*, 2019(32): 39-40. [HU H. Study on degumming technology of coffee[J]. *Science and Technology Innovation*, 2019(32): 39-40.]
- [21] 国家粮食局科学研究院. GB/T 5511-2008 谷物和豆类 氮含量测定和粗蛋白质含量计算 凯氏法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [Research Institute of Science, State Food Administration. GB/T 5511-2008 Determination of nitrogen content and calculation of crude protein content in cereals and legumes. Kjeldahl method [S]. Beijing: China Standard Press, 2008.]
- [22] 国家饲料质量监督检验中心(北京). GB/T 6433-2006 饲料中粗脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [National Feed Quality Supervision and Inspection Center (Beijing). GB/T 6433-2006 Determination of crude fat in feed[S]. Beijing: China Standard Press, 2006.]
- [23] 华南热带农产品加工设计研究所. GB/T 19182-2003 咖啡咖啡因含量的测定 高效液相色谱法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003. [South China Institute of Tropical Agricultural Products Processing and Design. GB/T 19182-2003 Determination of caffeine in coffee by high performance liquid chromatography[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.]
- [24] 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 中国烟草标准化研究中心. YC/T 202-2006 烟草及烟草制品 多酚类化合物绿原酸、茛菪亭和芸香苷的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003. [Zhengzhou Tobacco Research Institute, China Tobacco Corporation, China Tobacco Standardization Research Center. YC/T 202-2006 Determination of polyphenolic compounds chlorogenic acid, hyoscyamine and rutin in tobacco and tobacco products[S]. Beijing: China Standards Press, 2003.]
- [25] 刘帅帅. 烤烟 GC/MS 指纹图谱构建与验证[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. [LIU S S. Structure and validation of GC/MS fingerprint of Tobacco[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.]
- [26] 陈钰莹, 孙红波, 宋萧萧, 等. 咖啡苦味特性研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 285-293. [CHEN Y Y, SUN H B, SONG X X, et al. Recent advances in research the bitterness of coffee[J]. *Food Science*, 2020, 41(9): 285-293.]
- [27] HIDALGO F J, DELGADO R M, ZAMORA R. Degradation of asparagine to acrylamide by carbonyl-amine reactions initiated by alkadienals[J]. *Food Chemistry*, 2009, 116(3): 779-784.
- [28] 董文江, 张丰, 赵建平, 等. 云南不同地区生咖啡豆的风味前体物质研究[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(1): 290-296. [DONG W J, ZHANG F, ZHAO J P, et al. Flavor precursor compounds of green coffee beans from different geographical origins in Yunnan province[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(1): 290-296.]
- [29] DAWIDOWICZ A L, TYPEK R. Transformation of chlorogenic acids during the coffee beans roasting process[J]. *European Food Research and Technology*, 2017, 243(3): 379-390.
- [30] 刘意, 曾桂先, 宋凤兰, 等. 绿原酸稳定性研究[J]. *辽宁化工*, 2009, 38(4): 25-28. [LIU Y, ZENG G X, SONG F L, et al. Studies on the stability of Chlorogenic acid[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2009, 38(4): 25-28.]
- [31] 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 S S, YU J, TAN S Y, et al. Determination of caffeine, caffeic acid and chlorogenic acid in coffee beans from different origins by RP-HPLC[J]. *Journal of Jiangxi University of TCM*, 2017, 29(1): 90-93.]
- [32] 王茜. 基于热诱导的烘焙咖啡豆贮藏期风味品质变化规律研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019. [WANG Q. Study on the regular of flavor quality of roasted coffee beans during storage based on accelerated induction[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019.]
- [33] 朱攀攀, 马亚琴, 窦华亭, 等. 超声局部效应对咖啡酸稳定性及抗氧化性的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(23): 12-17. [ZHU P P, MA Y Q, DOU H T, et al. Effect of local ultrasound on stability and antioxidant capacity of caffeic acid in a model system[J]. *Food Science*, 2015, 36(23): 12-17.]
- [34] DONG W, HU R, 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(12): 121-130.
- [35] 于森. 云南德宏地区咖啡豆的风味品质特性研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2017: 11-18. [YU M. Study on flavor quality of coffee beans in Dehong area of Yunnan[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2017: 11-18.]
- [36] POYRAZ I E, OZTURK N, KIYAN H T, et al. Volatile compounds of coffea Arabica L. Green and roasted beans[J]. *Anadolu University Journal of Science and Technology*, 2016, 5: 31-35.
- [37] AKIYAMA M, MURAKAMI K, HIRANO Y, et al. Characterization of headspace aroma compounds of freshly brewed arabica coffees and studies on a characteristic aroma compound of ethiopian coffee[J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(5): 335-346.