

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.01.014

烘焙时间和粒径对小粒咖啡豆营养及品质的影响

刘凤茹, 蒋昕彤, 张钰婕, 黎思婷, 刘攀, 龚志伟

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 文章研究了烘焙时间和粒径对云南小粒咖啡豆营养成分及品质的影响。结果表明:随着烘焙时间的增加,灰分、脂肪、蛋白质等营养成分的质量分数均有所提高;咖啡豆失重率上升,色度值 L^* 、 b^* 、 ΔE 下降, a^* 先上升后下降,咖啡液pH值先下降后上升;相同烘焙时间下,小豆(粒径小于5.6 mm)的灰分质量分数、pH值、脂肪质量分数总体高于中豆(粒径5.6~6.7 mm)和大豆(粒径大于6.7 mm),而大豆的蛋白质质量分数则更高。由主成分分析发现,脂肪质量分数的综合权重得分最高,其次是灰分质量分数、蛋白质质量分数、失重率、pH值。以上研究为咖啡豆进行精细烘焙、质量改善提供数据支撑。

关键词: 云南小粒咖啡; 粒径; 烘焙时间; 营养成分; 品质

中图分类号: TS273; TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2025)01-0092-07

Effects of roasting time and grain size on nutrition and quality of Yunnan Arabica coffee beans

LIU Fengru, JIANG Xintong, ZHANG Yujie, LI Siting, LIU Pan, GONG Zhiwei

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: This paper investigated the effects of roasting time and grain size on the nutrients and quality of Yunnan Arabica coffee beans. The results showed that the content of nutrients such as ash, fat and protein increased with the increase of roasting time. In terms of quality, the weight loss ratio increased, the chromaticity values L^* , b^* , and ΔE decreased, a^* increased first and then decreased, and the pH value of coffee liquor decreased first and then increased. Under the same roasting time, the ash content, pH value and fat content of small beans (diameter < 5.6 mm) were generally higher than those of medium beans (diameter 5.6-6.7 mm) and big beans (diameter > 6.7 mm), while the protein content of big beans was higher. According to the principal component analysis, the fat content had the highest comprehensive weight score, followed by the ash content, protein content, weight loss ratio and pH value. The above research provides data support for fine roasting and quality improvement of coffee beans.

Key words: Yunnan Arabica coffee; grain size; roasting time; nutrients; quality

咖啡是世界上消费最多的饮料之一^[1],小粒种咖啡是世界上栽培最广泛的咖啡品种,其产量约占世界咖啡总产量的80%^[2],同时小粒种咖啡也是中国种植面积最为广泛的咖啡品种^[3],以其浓而不苦、香而不烈的特征风味广受人们的喜爱。

咖啡中营养成分与品质相关的物质含量是判定咖啡滋味的主要指标。目前,咖啡烘焙条件与烘焙后咖啡豆营养成分指标的关联性已有报道^[4],包括蛋白质、脂肪等在不同烘焙温度、时间下含量的变化^[5];改进咖啡烘焙工艺的研究取得

收稿日期: 2022-06-24; **修回日期:** 2022-07-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HGTD0115); 国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202110359107)

作者简介: 刘凤茹(1984—),女,河北廊坊人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

一定的进展^[6-7]。但粒径和烘焙时间对云南小粒咖啡豆营养成分及品质交互作用的探究目前并不多。不同粒径咖啡豆因其比表面积不同,达到最适烘焙程度所需条件必然存在差异。实际生产中,会在烘焙前对咖啡豆进行粒径分级,但是缺乏具体的研究数据证明分级烘焙的必要性。

咖啡豆的各项营养成分及品质会随烘焙过程的进行而发生变化。灰分与咖啡烘焙条件之间存在密不可分的联系^[8],其含量对判定烘焙程度具有重要作用。脂肪也是决定咖啡风味的一项重要指标,其含量将对咖啡的着色和泡沫稳定性产生影响^[9]。蛋白质与糖类经过美拉德反应生成醛、酮等物质,它们使咖啡带上奶油味;氨基酸经过美拉德反应分解产生呋喃、吡啶^[10],将影响咖啡的烧焦味和焦糖化味。失重率用于判定实验的稳定性,与烘焙程度具有一定的相关性。咖啡液的 pH 值是评判咖啡优劣的一项重要指标,咖啡烘焙过程中会使有机酸含量发生变化,引起 pH 值改变,使咖啡产生酸味,影响口感^[5]。目前国际上普遍使用由美国精品咖啡协会(Specialty Coffee Association of America, SCAA)确立的咖啡烘焙标准,根据这套体系制定出 SCAA 比色卡,表明颜色在判断咖啡烘焙程度中占有决定性作用。

本研究通过测定不同粒径、不同烘焙时间的云南小粒咖啡豆的失重率、色差、pH 值及灰分、脂肪、蛋白质质量分数的变化,分析粒径和烘焙时间对咖啡豆营养成分及品质的影响,为咖啡豆烘焙加工及消费者选择提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

云南小粒咖啡豆由保山市新寨咖啡有限公司提供。本研究选择咖啡豆物理分类中的半圆豆进行实验^[11],相较于圆豆,半圆豆更为多见,且在生产中使用更为广泛。本实验咖啡样品是 9 月采取的,实验时间为 2021 年 9—12 月。所用试剂均购于国药集团化学试剂有限公司,均为分析纯。

1.2 仪器与设备

韩国 Gene Cafe 咖啡烘焙设备(青岛宇啡拓克国际贸易有限公司); VAP50S 全自动凯氏定氮仪(德国格哈特分析仪器有限公司); 3nhNR110 精密色度计(3nh 科技有限公司); SOX406 脂肪测定仪(山东海能科学仪器有限公司); PHS-3E pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); SX2-4-13G 马弗炉(济南精密科学仪器仪

表有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 咖啡豆的分级与烘焙

根据 ISO 4150—2011 生咖啡豆粒度分析标准,本实验通过具有不同直径筛孔的筛子将云南小粒咖啡豆筛分成大(粒径>6.7 mm)、中(粒径 5.6~6.7 mm)、小(粒径<5.6 mm)3 个等级。咖啡豆水洗 1 遍,干燥到含水率约为 12%,手工剔除残豆后,使用韩国 Gene Cafe 咖啡烘焙设备在 10、12、14、16 min 条件下进行烘焙,然后使用 ZD-10T 咖啡研磨机相同档位研磨后,用 20 目筛过筛 2 遍。将筛下的样品储存在塑料袋中,密封直至进一步分析。

由于咖啡豆烘烤过程中很难根据咖啡的风味或者香气确定咖啡烘焙程度,因此咖啡加工过程中通常采用 SCAA 标准色卡比较,从而判断咖啡烘焙程度。由于烘焙过程中产生美拉德反应,咖啡豆颜色会随着烘焙时间长短而变化^[12]。本研究设计了在 0、10、12、14、16 min 时间梯度下对小豆、中豆、大豆咖啡豆分别烘焙,得到 3 组平行样的实验结果,分析咖啡豆烘焙时间和粒径对其营养成分和品质的影响。

1.3.2 失重率的测定

使用电子分析天平分别称量每组咖啡生豆和烘焙咖啡豆的质量^[13],计算失重率,其公式如下:

$$y_1 = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中: y_1 为失重率; m_0 为烘焙前咖啡生豆质量; m_1 为烘焙后咖啡豆质量。

1.3.3 色差的测定

采用亨特色度测量法进行色差的测量^[14]。 L^* 表示亮度(明亮度); $-a^*$ ($+a^*$) 表示绿(红)的程度; $-b^*$ ($+b^*$) 表示蓝(黄)的程度; b^*/a^* 表示色相指标; ΔE 代表总色差。其原理为:在等色差表色系(L^* 、 a^* 、 b^*)中的一个物体,当 L^* 、 a^* 、 b^* 值确定后,其颜色状态也被确定,若 2 个彩色样品均按 L^* 、 a^* 、 b^* 标定颜色,则两者间的总色差 ΔE 的计算公式为:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

1.3.4 咖啡液 pH 值的测定

根据 SCAA 的咖啡杯评体系规格定量,精准称量 8.25 g 粉末样品置于 250 mL 不锈钢杯中,加入 150 mL 的 95 °C 热水,用恒温加热磁力搅拌器加热 5 min。待温度降至 83~84 °C 时过滤,将滤液保存至 4 °C 冰箱内备用,24 h 内用 pH 计测

定其 pH 值。

1.3.5 灰分质量分数的测定

根据 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准食品中灰分的测定》,称取 3.00 g 咖啡粉末加入 1.00 mL 乙酸镁溶液(240 g/L),在(550±25) °C 高温炉中灼烧 4 h 充分炭化。冷却至 200 °C 左右取出,放入干燥器中冷却 30 min,直至恒重。

1.3.6 脂肪质量分数的测定

采用索氏抽提法,按 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准食品中脂肪的测定》检测脂肪质量分数。精密称取 3.00 g 的咖啡粉于快速水分测定仪中烘干,将烘干的咖啡粉放入滤纸筒中,并置于索式提取装置中,加入 50.00 mL 石油醚,50 °C 水浴中回流 12 h 取出,105 °C 烘箱中烘干,称量烧瓶回流前、后质量差,计算粗脂肪质量分数。

1.3.7 蛋白质质量分数的测定

根据 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法对蛋白质质量分数进行检测。精确称取 0.20~2.00 g 的咖啡粉,移入干燥定氮瓶中,加入 0.40 g 硫酸铜、6.00 g 硫酸钾及 20.00 mL 硫酸于消化炉进行消化。当消化炉温度达到 420 °C 后,继续消化 1 h,此时消化管中液体呈绿色透明状,取出、冷却后加入 50.00 mL 水,于自动凯氏定氮仪上实现自动加液、蒸馏、滴定和记录滴定数据的过程。根据含氮量计算蛋白质质量分数。

1.4 数据统计与处理

所有实验均进行 3 组平行样实验,采用 Origin 2019 绘图,IBM SPSS Statistics 25 软件进行方差分析,邓氏多重检验确定数据间的差异,小写字母表示烘焙时间影响差异显著($P < 0.05$);大写字母表示粒径影响差异显著($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 时间和粒径对小粒咖啡豆失重率的影响

时间和粒径对小粒咖啡豆失重率的影响如图 1 所示。

由图 1 可知:随着烘焙时间的延长,各粒径咖啡豆的失重率均有所上升,咖啡豆质量由 200 g 下降至 160 g,且随着烘焙过程的进行,3 种粒径咖啡豆的失重率渐趋相近;烘焙时间对咖啡失重率具有显著影响($P < 0.05$)。在烘焙过程中,咖啡豆中水分流失以及有机化合物受热产生二氧化碳和挥发性物质、损失银皮等导致咖啡豆质量损失增加^[15]。这与文献[16]的研究结果一致,证明

了本实验的可靠性。文献[17]发现咖啡豆质量损失有 2 种不同的速度:第 1 阶段对应于水分和挥发物损失,此阶段减重速度较快;第 2 阶段质量损失与大豆中二氧化碳和有机成分的损失相关^[18]。

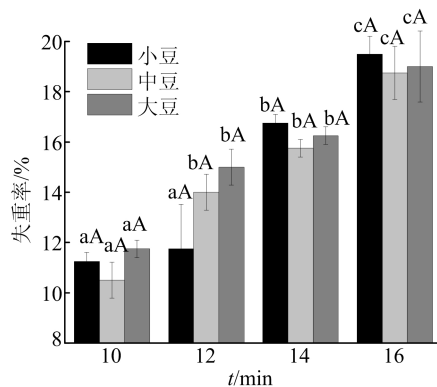


图 1 烘焙时间、咖啡豆粒径对失重率的影响

而咖啡豆粒径与失重率则没有直接联系($P > 0.05$),可能原因是咖啡豆中含水量是有固定范围的,失重率也主要与咖啡豆损失的水和有机物有关。当烘焙到一定程度时,咖啡则会达到一个稳定状态,最终的失重率将趋于一致,本文所测得最终平衡失重率范围为 19.0%±0.5%,因此咖啡豆粒径与失重率并无直接联系。

2.2 时间和粒径对小粒咖啡豆色差的影响

色泽是判断云南小粒咖啡豆的一个重要指标,能够直观判断咖啡品质差异与烘焙程度^[19]。不同粒径云南小粒咖啡豆色差分析结果见表 1 所列。由表 1 可知: L^* 在生豆中最高,并随着烘焙程度的增加而逐渐降低,这是由于烘焙过程中咖啡豆中的糖类、脂类、蛋白质和氨基酸等物质开始相互作用并结合、转化,产生大量深色物质,同时伴随着剧烈氧化,咖啡豆表面亮度降低; a^* 在生豆中最低,而在轻、中度烘焙咖啡豆中急剧增加,然而,随着焙烧程度的增加,该参数显著降低; b^* 在生咖啡豆中最高,并随着烘焙度的增加而降低,降低程度与 a^* 相似, b^* 逐渐降低为负值说明咖啡豆脱水过程中的黄绿色褪去、颜色变深,在 12 min 左右咖啡豆已经不再是土黄色而呈现稍浅的褐色,而到 16 min 左右咖啡豆颜色变为棕褐色甚至变黑褐色,这与文献[20]的研究结果一致;小豆色差 ΔE 较小,中、大豆总体较大,这是由于中、大豆中糖类物质和蛋白质质量分数较高,在相同烘焙时间下进行焦糖化和美拉德反应程度较大,从而形成更多的类黑精和褐色素物质,因此色

差更大。据报道, a^* 的增加归因于褐色素的形成,咖啡提取物的棕色度随着烘焙温度和时间的增加而增加^[21-22]。咖啡豆烘焙时间的延长导致类黑精、褐色素等物质的累积,咖啡豆颜色变深^[12]。

表 1 不同粒径云南小粒咖啡豆色差

等级	t/min	L^*	a^*	b^*	ΔE
大豆	0	67.33	7.14	18.91	
	10	36.77	11.15	12.96	45.55
	12	35.95	7.01	3.60	36.80
	14	33.84	5.76	1.57	34.36
	16	25.81	2.31	-1.74	25.97
中豆	0	68.01	5.92	18.17	
	10	43.11	11.36	13.65	45.98
	12	35.86	7.91	6.24	37.25
	14	31.09	5.83	1.65	31.67
	16	29.80	3.71	-1.17	24.12
小豆	0	65.04	7.74	19.72	
	10	38.28	9.97	11.00	39.72
	12	32.01	6.77	3.59	32.91
	14	29.85	5.72	1.43	30.43
	16	27.07	3.33	-1.52	27.32

2.3 时间和粒径对小粒咖啡豆 pH 值的影响

pH 值的增加会改变离子的电离度,从而改善咖啡饮料的口感,因此咖啡液的 pH 值在咖啡风味分析中占据重要地位^[23]。时间和粒径对小粒咖啡豆 pH 值的影响如图 2 所示。

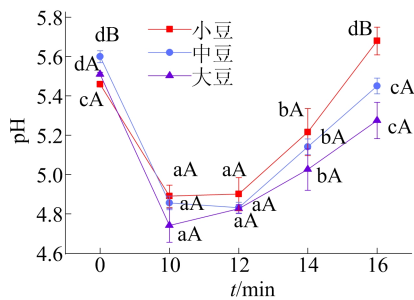


图 2 烘焙时间、咖啡豆粒径对 pH 值的影响

从图 2 可以看出,3 种粒径的云南小粒咖啡豆 pH 值都趋向于从生豆先降低,然后随着时间的延长而逐渐升高,说明在烘焙过程中必定有酸的挥发也有酸的生成,不同烘焙程度的咖啡豆 pH 值有显著差异,与文献^[23-24]的结果一致。

咖啡酸味的主要来源是咖啡在烘焙过程中产生的奎宁酸、苹果酸、绿原酸、柠檬酸^[25],随着烘焙时间的延长,最显著的差异是可滴定酸度的降低,由于柠檬酸、苹果酸和绿原酸在烘焙过程中被

降解,从而导致 pH 值上升^[26-30]。在烘焙前期,咖啡中的糖分和有机酸会生成大量的甲酸、乙酸、乳酸、富马酸、康宁酸等,后期随着烘焙时间的延长,绿原酸含量急剧降低,咖啡豆中酸含量减少,pH 值上升。

从图 2 还可以看出:生豆的中豆 pH 值明显大于小豆和大豆;10、12、14、16 min 时咖啡豆的 pH 值会随着粒径的增大而降低。豆子中的有机酸含量变化会因粒径不同导致受热产生差异,因此烘焙时的 pH 值变化可能也会有所不同^[25]。

2.4 时间和粒径对小粒咖啡豆灰分的影响

食物中的灰分质量分数代表矿物质和金属质量分数。灰分是从植物在生长过程中吸收的营养物质中获得的^[31]。咖啡豆中灰分的质量分数为 3.0%~4.5%,其中大部分是钾、镁和钙。烘焙时间、咖啡豆粒径与灰分质量分数的关系如图 3 所示。

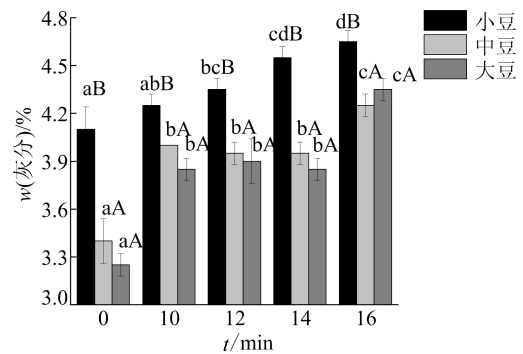


图 3 烘焙时间、咖啡粒径与灰分质量分数的关系

由图 3 可知,小豆、中豆及大豆的灰分质量分数均随着烘焙时间的延长呈现上升趋势,此结果与文献^[20]的实验结果一致。这是由于随着烘焙时间的延长,咖啡豆失重率增加,灰分质量分数增大;烘焙时间越长,向咖啡豆内部传递的热量越多,咖啡中的有机化合物发生热解反应,以 CO_2 的形式释放,导致灰分质量分数逐渐上升^[8,16]。

当烘焙时间相同时,随着粒径的增大,云南小粒咖啡豆中的灰分质量分数会逐渐下降,这是由于粒径决定了其表面积不同引起的。随着粒径增大,咖啡豆受热面积逐渐增大导致受热程度增加,灰分质量分数也随之出现差异化;但中豆和大豆的灰分质量分数在 10~14 min 阶段处于相对平衡的状态,这可能是还未到达快速发生热解反应而呈现出的结果。烘焙时间相同,不同粒径的咖啡豆烘焙程度仍存在差异,研究表明,烘焙程度对

咖啡豆的营养成分及品质均存在显著影响^[32-33]。这归因于烘焙过程中粒径大小和时间延长的相互作用。

2.5 时间和粒径对小粒咖啡豆脂肪的影响

咖啡豆的脂质将影响咖啡的着色和泡沫稳定性^[34]。在烘焙过程中,咖啡油质量分数为 10%,含有大部分的咖啡香气^[22]。同时酯类的降解产物为多种挥发性物质,产生的醛、酮等对咖啡风味产生影响。时间和粒径对小粒咖啡豆脂肪的影响如图 4 所示。

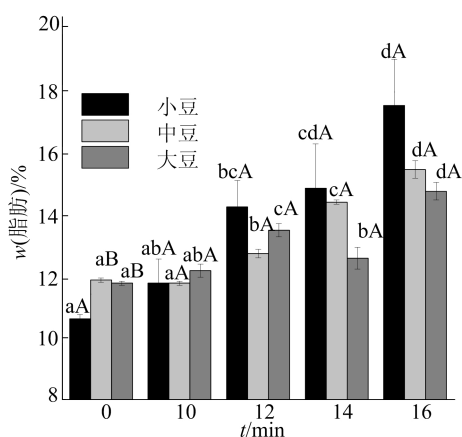


图 4 烘焙时间、咖啡豆粒径对脂肪质量分数的影响

由图 4 可知,随着烘焙时间的延长,云南小粒咖啡豆脂肪质量分数整体呈现上升趋势,在不同温度下,咖啡豆中的脂肪质量分数具有显著差异 ($P < 0.05$),与文献[4, 20]研究结果一致,这是由于部分新产生的物质溶解于油脂中^[35]。事实上,脂质是咖啡豆的主要成分之一,其中三酰甘油酯质量分数占咖啡总脂质的 75%。咖啡豆中的大部分酯类被束缚在细胞结构中,随着烘焙程度的增加,大部分细胞被破坏,脂质会迅速移动到表面。脂肪分解释放游离脂肪酸,游离脂肪酸比酯化脂肪酸更容易氧化,尤其是长链不饱和脂肪酸,研究表明,烘焙过程中脂肪从细胞内部释放到表面,导致脂肪质量分数随烘焙时间的增加而增加^[36]。

从图 4 可以看出,烘焙 12~16 min 时脂肪质量分数随着咖啡豆粒径的增加而减少,但没有显著关系,可能是由于在相同烘焙时间下,脂肪质量分数的变化与咖啡豆质量的变化规律不一致,两者共同作用使咖啡豆粒径与脂肪质量分数没有明显相关性^[37]。

2.6 时间和粒径对小粒咖啡豆蛋白质的影响

由于参与了烘焙过程中发生的美拉德反应,

咖啡豆蛋白质质量分数会随着烘焙过程的进行逐渐增高^[38-40],也有研究表明烘焙过程中咖啡豆总质量减少,使得蛋白质的质量分数有所上升^[20]。蛋白质作为激活剂或作为氨、硫化氢供体有助于挥发性物质的形成,对咖啡风味有重要贡献。本文研究了时间和粒径对小粒咖啡豆蛋白质的影响,结果如图 5 所示。

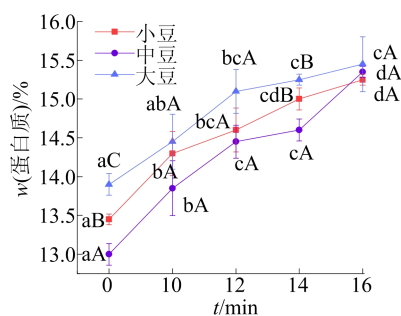


图 5 烘焙时间、咖啡豆粒径对蛋白质质量分数的影响

从图 5 可以看出,咖啡豆蛋白质质量分数均随着烘焙的进行而上升。本实验采用凯氏定氮原理测定蛋白质质量分数,蛋白质分解产生了含氮组分,该组分包括游离氨基酸、肽和蛋白质^[41]。烘焙过程中蛋白质的降解、含氮化合物的质量分数变化及总质量的降低,使得蛋白质质量分数上升。

烘焙后蛋白质质量分数与咖啡豆粒径没有明显关系,这可能是由于蛋白质质量分数受多种因素影响,其质量分数既取决于美拉德等反应分解的蛋白质量,又受制于分解产物中含氮组分的量。而在 12 min 后,大豆蛋白质质量分数均高于小豆和中豆。烘焙过程伴随着蛋白质的变性、蛋白质亚基与还原糖结合形成烘焙过程中形成的类黑精聚合结构^[39-40]、蛋白质与多糖热降解释放的化合物相互作用,产生挥发性物质等多种反应,这些反应增加了咖啡豆中含氮化合物的质量分数,使大豆中蛋白质质量分数增加^[41]。

2.7 云南小粒咖啡营养与品质的主成分分析

用 SPSS 软件对所测咖啡豆的失重率、pH 值以及灰分、蛋白质和脂肪的质量分数进行主成分分析,如图 6 所示。

由图 6 可知:主成分 1、2 贡献率达 86.1%;第 1 主成分贡献率为 62.6%,主要反映了失重率、灰分、蛋白质、脂肪的变异情况;第 2 主成分贡献率为 23.5%,主要反映了 pH 值的变异信息。失重率和脂肪、灰分、蛋白质质量分数主要分布于

第 1 主成分的正方向,而 pH 值则分布于第 2 主成分的正方向。其中脂肪质量分数影响最大,权重综合得分为 0.45,其次是灰分和蛋白质质量分数、失重率、pH 值。总的来说,不同测量成分对咖啡营养品质的影响存在差异。

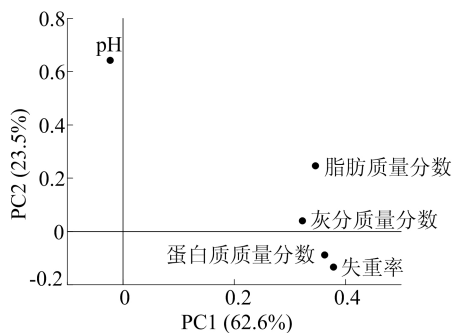


图 6 云南小粒咖啡豆营养与品质主成分分析图

3 结 论

灰分、脂肪、蛋白质是云南小粒咖啡的重要营养成分,失重率、pH 值、色度是评价其品质的重要指标。相同粒径的咖啡豆随着烘焙程度的增大其灰分质量分数呈上升趋势,这是由于咖啡豆中的有机化合物发生热解反应,以 CO_2 的形式释放导致的。由于烘焙产生的挥发性物质的溶解,随着烘焙时间的延长,脂肪质量分数明显上升,粒径则与脂肪质量分数无显著关系。蛋白质质量分数随烘焙时间的延长有所增加,且大豆中蛋白质质量分数呈现高于其余 2 组的趋势。实验结果表明,云南小粒咖啡豆小豆处于深烘阶段时营养含量相对更高。由于烘焙过程中水分的流失以及有机化合物等受热挥发,咖啡豆烘焙失重率随着烘焙时间的延长明显上升;不同粒径的咖啡豆在烘焙过程中失重率趋于一致。随着烘焙过程的进行,有机物受热挥发,咖啡豆 pH 值逐渐升高;粒径大小对 pH 值也有影响,普遍存在粒径越大,相同烘焙条件下 pH 值越低的现象。随着烘焙时间延长,亮度参数 L^* 逐渐降低即咖啡豆颜色变深,同时红色参数 a^* 和黄色参数 b^* 也相应降低,反映出咖啡豆颜色从黄绿色向棕褐色甚至黑褐色的转变过程。

本文分析烘焙时间对营养成分及品质的影响,也考虑了咖啡豆粒径对其共同的影响,为实际生产中咖啡豆进行大小分级给予相应的理论支撑,为实际精细化加工经验提供理论参考。

[参 考 文 献]

- [1] BILGE G. Investigating the effects of geographical origin, roasting degree, particle size and brewing method on the physicochemical and spectral properties of Arabica coffee by PCA analysis[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(9): 3345-3354.
- [2] 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.
- [3] 张方. 云南咖啡产业国际竞争力评价及影响因素研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2020.
- [4] 李梦丽. 小粒咖啡烘焙工艺优化及理化指标检测分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [5] 于森,董文江,胡荣锁,等. 海南兴隆地区不同烘焙度咖啡豆的滋味特性研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(4): 215-221.
- [6] YERETZIAN C, JORDAN A, BREVARD H, et al. On-line monitoring of coffee roasting by proton-transfer-reaction mass-spectrometry[J]. ACS Symposium, 2000, 763: 112-123.
- [7] LEE S J, B KIM M K, LEE K G. Effect of reversed coffee grinding and roasting process on physicochemical properties including volatile compound profiles[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 97-102.
- [8] CUONG T V, 张宗玲, 郭康权, 等. 咖啡豆的烘焙条件对其成分含量的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(1): 33-38.
- [9] ERNESTO I, LUCIANO N. Neglected food bubbles: the espresso coffee foam[J]. Food Biophysics, 2011, 6(3): 335-348.
- [10] 孔保华, 李菁, 刘睿. 美拉德反应产物抗氧化机理及影响因素的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(11): 9-13.
- [11] PEREIRA L L, MARCATE J P P, CALIMAN A D C, et al. Physical classification and sensory coffee analysis[M]// Quality determinants in coffee production. [S. l.]: Springer, 2021: 373-405.
- [12] PRAMUDITA D, ARAKI T, SAGARA Y, et al. Roasting and colouring curves for coffee beans with broad time-temperature variations[J]. Food & Bioprocess Technology, 2017, 10(8): 1-12.
- [13] 李梦丽, 张付杰, 杨薇, 等. 云南小粒咖啡烘焙工艺优化及总糖含量的测定[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 186-192.
- [14] 李晓莉. 聚酯切片色值测试准确率的影响因素探讨[J]. 合成纤维, 2015, 44(12): 46-49.
- [15] JOKANOVIC R, DŽINIĆ R, CVETKOVIC R, et al. Changes of physical properties of coffee beans during roasting[J]. Acta Periodica Technologica, 2012, 43: 21-31.
- [16] PERRONE D, DONANGELO R, DONANGELO C M, et al. Modeling weight loss and chlorogenic acids content in coffee during roasting[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(23): 12238-12243.
- [17] DUTRA E R, OLIVEIRA L S, FRANCA A S. A prelimi-

- nary study on the feasibility of using composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 47(3): 241-246.
- [18] ANESE M, NICOLI M C, VERARDO G, et al. Effect of vacuum roasting on acrylamide formation and reduction in coffee beans[J]. *Food Chemistry*, 2014, 145: 168-172.
- [19] 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.
- [20] KIM I, JUNG S, KIM E, et al. Physicochemical characteristics of Ethiopian *Coffea arabica* cv. Heirloom coffee extracts with various roasting conditions[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2021, 30(2): 235-244.
- [21] CHUNG H S, KIM D H, YOUN K S, et al. Optimization of roasting conditions according to antioxidant activity and sensory quality of coffee brews[J]. *Food Science & Biotechnology*, 2013, 22(1): 23-29.
- [22] FRIEDMAN M. Food browning and its prevention: an overview[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(3): 631-653.
- [23] DUARTE S M D S, ABREU C M P D, MENEZES H C D, et al. Effect of processing and roasting on the antioxidant activity of coffee brews[J]. *Ce Tecnologia de Alimentos*, 2005, 25(2): 387-393.
- [24] 刘兴勇, 陈兴连, 杜丽娟, 等. 多因素交互作用导致烘焙咖啡中绿原酸快速降解[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 7-14.
- [25] 王东旭, 王新财, 胡奇杰, 等. 基于 UPLC-MS/MS 探究烘焙程度对咖啡豆中有机酸含量影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(7): 268-273.
- [26] GLOESS A N, VIETRI A, WIELAND F, et al. Evidence of different flavour formation dynamics by roasting coffee from different origins; on-line analysis with PTR-ToF-MS[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2014, 365/366: 324-337.
- [27] ALVES R C, COSTA A S G, JEREZ M, et al. Antiradical activity, phenolics profile, and hydroxymethylfurfural in espresso coffee; influence of technological factors[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(23): 12221-12229.
- [28] BICHO N C, LEITÃO A E, RAMALHO J C, et al. Identification of chemical clusters discriminators of the roast degree in Arabica and Robusta coffee beans[J]. *European Food Research and Technology*, 2011, 233(2): 303-311.
- [29] SMRKE S, OPITZ S E W, VOVK I, et al. How does roasting affect the antioxidants of a coffee brew? Exploring the antioxidant capacity of coffee via on-line antioxidant assays coupled with size exclusion chromatography[J]. *Food & Function*, 2013, 4: 1082-1092.
- [30] ROMAN L, FIRAT Y E, ANIKA W, et al. Quantitative studies on roast kinetics for bioactives in coffee[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(49): 12123-12128.
- [31] WAHYUNI N L E, RISPIANDI R, HARIYADI T. Effect of bean maturity and roasting temperature on chemical content of robusta coffee[J]. *IOP Conference Series(Materials Science and Engineering)*, 2020, 830(2): 022019.
- [32] OLIVEIRA G, CORRÊA P, SANTOS F L, et al. Physical characterization of coffee after roasting and grinding[J]. *Semina(Ciencias Agrarias)*, 2014, 35(4): 1813-1828.
- [33] BICHO N C, LEITÃO A E, RAMALHO J C, et al. Use of colour parameters for roasted coffee assessment[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 32(3): 436-442.
- [34] ILLY E, NAVARINI L. Neglected food bubbles: the espresso coffee foam[J]. *Food Biophysics*, 2011, 6(3): 335-348.
- [35] VASCONCELOS A L S, FRANCA A S, GLÓRIA M B A, et al. A comparative study of chemical attributes and levels of amines in defective green and roasted coffee beans[J]. *Food Chemistry*, 2005, 101(1): 26-32.
- [36] VILA M A, ANDUEZA S, PEÑA M, et al. Fatty acid evolution during the storage of ground, roasted coffees[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2005, 82(9): 639-646.
- [37] FRANCA A S, MENDONÇA J C F, OLIVEIRA S D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2004, 38(7): 709-715.
- [38] MUZAIFA M, FEBRIANI D H, PATRIA A, et al. Chemical composition of green and roasted coffee bean of Gayo arabica civet coffee(*kopi luwak*)[J]. *IOP Conference Series(Earth and Environmental Science)*, 2020, 425: 012001.
- [39] CHU Y F. Coffee; emerging health effects and disease prevention[M]. [S. l. : s. n.], 2012.
- [40] GUO Y Y, NIE L Q, CHENG Z Y, et al. AdaVQA: overcoming language priors with adapted margin cosine loss[C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. [S. l. : s. n.], 2021: 387-394.
- [41] HWANG C F, CHEN C C, HO C T. Contribution of coffee proteins to roasted coffee volatiles in a model system[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(10): 2117-2126.

(责任编辑 闫杏丽)