

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050225

WANG Dongxu, WANG Xincai, HU Qijie, et al. Exploring the Effect of Roasting Degree on the Content of Organic Acids in Coffee Beans Based on UPLC-MS/MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 268–273. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050225

· 分析检测 ·

# 基于 UPLC-MS/MS 探究烘焙程度对咖啡豆中有机酸含量影响

王东旭, 王新财, 胡奇杰, 王凤丽, 厉芬, 陈褚建

(湖州市食品药品检验研究院, 浙江湖州 313000)

**摘要:** 为探究烘焙工艺对咖啡豆口感的影响, 本文研究了烘焙程度对咖啡豆中有机酸含量的影响。采用新建立超高效液质联用法 (UPLC-MS/MS) 测定不同烘焙条件下 7 种有机酸的含量。结果表明: 7 种有机酸化合物在 0.5~20.0 mg/kg 范围内线性关系良好, 决定系数均大于 0.990。7 种有机酸的加标回收率在 81.9%~104.7%, RSD 为 0.53%~6.64%。洪都拉斯咖啡豆样品检测结果显示随烘焙程度增加, 苹果酸和柠檬酸含量下降, 富马酸含量先升后降, 琥珀酸、酒石酸、莽草酸和奎尼酸含量上升。轻度烘焙下苹果酸与柠檬酸总量最高, 达到 1201.5 mg/kg, 酸度最佳; 奎尼酸含量最少, 为 1363.7 mg/kg, 湿度最低。肯尼亚、印尼、巴西、萨尔瓦多咖啡豆中有机酸在相同烘焙条件下表现相似。

**关键词:** 咖啡豆, 有机酸, 超高效液相质谱联用 (UPLC-MS/MS), 烘焙程度

中图分类号: TS255.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)07-0268-06

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2020050225](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050225)

## Exploring the Effect of Roasting Degree on the Content of Organic Acids in Coffee Beans Based on UPLC-MS/MS

WANG Dongxu, WANG Xincai, HU Qijie, WANG Fengli, LI Fen, CHEN Chujian

(Huzhou Institute for Food and Drug Control, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** The influence of roasting degrees of coffee beans on contents of organic acids which directly affect the coffee taste was investigated in this study, using a newly established ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) method to measure seven kinds of organic acids. The method showed a good linearity over the range of 0.5~20.0 mg/kg for 7 organic acids with  $R^2 > 0.990$ . Recovery rates of 7 organic acids were 81.9%~104.7% at three spiked levels in roasted coffee beans and the relative standard deviations were 0.53%~6.64%. Honduras coffee bean samples results showed that with increasing roasting degree, the contents of malic acid and citric acid decreased gradually, fumaric acid content first increased and then decreased, succinic acid, tartaric acid, shikimic acid as well as quinic acid gradually increased. Light roast had the highest total contents of malic acid and citric acid and lowest content of quinic acid at a concentration of 1201.5 mg/kg and 1363.7 mg/kg, respectively, showing the best taste. Organic acids of coffee beans from Kenya, Indonesia, Brazil and Salvador showed the similar regular changes in the roasting process.

**Key words:** coffee beans; organic acid; ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS); roasting degree

咖啡作为世界三大饮料之首, 深受各国人民的喜爱<sup>[1]</sup>。酸度是评价咖啡饮品品质的重要因素之一,

而咖啡中的酸度主要来自咖啡豆烘焙过程中产生的酸, 烘焙咖啡豆中含有水溶性绿原酸、奎尼酸、柠檬

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 湖州市公益性应用研究项目 (2017GY10); 浙江省食品药品监管系统科技计划项目 (2018005)。

作者简介: 王东旭 (1988-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 食品质量安全检测, E-mail: [11237122@zju.edu.cn](mailto:11237122@zju.edu.cn)。

酸、苹果酸、酒石酸、醋酸、甲酸、乳酸、甘醇酸等三十多种有机酸以及无机磷酸<sup>[2]</sup>。研究表明有机酸具有软化血管、促进微量元素吸收、帮助胃液消化等功能<sup>[3]</sup>。有机酸的含量受烘焙的温度及时间影响较大, 同时还受咖啡豆的种类影响<sup>[4]</sup>。与咖啡豆其他有效成分相比, 酒石酸、苹果酸、柠檬酸等有机酸在咖啡豆中含量并不高, 其总量约占 2.5%<sup>[5]</sup>, 目前对引起咖啡酸味的脂肪族酸含量的报道较少, 现有报道主要侧重于对烘焙咖啡豆中有机酸检测方法的报道<sup>[2,4,6]</sup>, 以及烘焙程度对咖啡豆中原有有机酸含量研究<sup>[7]</sup>。烘焙程度对多种有机酸尤其是新生成的有机酸含量影响还少有研究。有研究表明, 苹果酸和柠檬酸会形成温和愉悦性的酸味<sup>[2]</sup>, 高温下绿原酸降解产物奎尼酸会形成咖啡风味中的涩感<sup>[8]</sup>, 奎尼酸降解产物莽草酸是多种芳香化合物的前体物质<sup>[9]</sup>, 因此考察不同烘焙程度下咖啡豆中有机酸含量变化对于烘焙咖啡豆的口感控制极为重要。

目前, 有机酸的检测方法主要有分光光度法<sup>[10]</sup>、气相色谱法<sup>[11-12]</sup>、高效液相色谱法<sup>[13-16]</sup>、离子色谱法<sup>[17-18]</sup>和液质联用法<sup>[19-21]</sup>等。分光光度法检出限较高; 气相色谱法需要衍生处理; 高效液相色谱法可测定大多数有机酸, 但紫外灵敏度相对较低; 而液质联用法因具有高选择性和高灵敏度等优点而被广泛使用<sup>[20]</sup>。咖啡中的有机酸测定目前还是以液相色谱为主, 尚未见到液质联用技术用于咖啡中有机酸检测的报道。

本研究以产自洪德拉斯咖啡豆为原料, 经过不同程度(轻度、中轻度、中度、中深度、重度、重深度)的烘焙, 采用新建立的超高效液质联用法检测 7 种有机酸(富马酸、琥珀酸、苹果酸、酒石酸、莽草酸、奎尼酸、柠檬酸)含量。通过分析有机酸含量变化揭示不同烘焙程度对咖啡豆有机酸成分的影响, 研究 7 种有机酸含量变化的相互关系和烘焙中新生成的有机酸含量变化规律, 并对 4 种咖啡豆(分别产自肯尼亚、印尼、巴西、萨尔瓦多)进行验证, 完成开发基于酸感的烘焙工艺。该研究为进一步深入认识咖啡酸感形成的机制奠定了基础, 也对咖啡豆烘焙产品的开发有较强的指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

洪德拉斯 SHB 咖啡豆 产自洪都拉斯 NINFA LANZA 庄园; 肯尼亚 AA++ 咖啡豆 产自肯尼亚奇雅瓦姆鲁鲁; 印尼罗布斯塔咖啡豆 产自印度尼西亚爪哇; 巴西喜拉多咖啡豆 产自巴西喜拉多; 萨尔瓦多红波旁咖啡豆 产自萨尔瓦多 Loma La Gloria 庄园; 琥珀酸(succinic acid, 99.5%)、苹果酸(malic acid, 98.0%)、酒石酸(tartaric acid, 99.0%)、莽草酸(shikimic acid, 98%)、奎尼酸(quinic acid, 98.0%)、柠檬酸(citric acid, ≥99.5%) 标准品, 上海麦克林生化科技有限公司; 富马酸(fumaric acid, 99.5%) 上海阿

拉丁生化科技股份有限公司; 乙腈(CAN, 色谱纯)、甲醇(MeOH, 色谱纯)德国 Merck 公司; 甲酸(色谱纯) 上海麦克林生化科技有限公司; 试验用水 为超纯水。

ACQUITYTM 超高效液相色谱、XevoTM TQD 三重四极杆串联质谱仪 美国 Waters 公司; ME204E 型电子分析天平 瑞士 Mettler Toledo 公司; Genius 3 涡流混合器 德国 IKA 公司; KQ-500DB 型超声清洗仪 昆山市超声仪器有限公司; Allegra X-12R 型台式冷冻离心机 美国 Beckman Coulter 公司; Simplicity 型超纯水仪 美国 Millipore 公司; L9/11/B410 型马弗炉 德国 nabertherm 公司; JFSD-100 型粉碎机 上海嘉定粮油仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 混合对照品溶液的制备 分别称取富马酸、琥珀酸、苹果酸、酒石酸、莽草酸、奎尼酸和柠檬酸标准物质适量, 用水溶液配制成质量浓度均为 1.00 mg/mL 的单标储备溶液。再用纯水稀释成质量浓度为 10.0 μg/mL 的 7 种有机酸混合标准储备溶液。各对照品储备液和混合对照品储备液均置于 4 ℃ 冰箱中保存。根据需要移取混合标准储备溶液, 配制成浓度分别为 50.0、100、500、1000 和 2000 ng/mL 的混合标准工作溶液。取 1.00 mL 标准溶液经 0.22 μm 水相滤膜后供高效液相串联质谱检测。

1.2.2 供试品溶液的制备 随机选取咖啡豆平铺一层于坩埚盘中, 放入马弗炉固定位置烘焙。烘焙完成后, 立即取出冷却至室温。设定烘焙温度为 220 ℃, 烘焙时间分别为 10、20、30、40、50 和 60 min, 对应的咖啡豆烘焙程度为轻度、中轻度、中度、中深度、重度、重深度。收集烘焙咖啡豆样品, 用粉碎机将咖啡豆粉碎(粒径 1.00 mm), 供有机酸含量测定。

称取 1.00 g(精确至 0.01 g)咖啡豆粉置于 15 mL 离心管中, 加入 10.00 mL 纯水, 涡旋 2 min, 超声 20 min, 以 9000 r/min 转速离心 5 min。根据目标物含量再将上述溶液分别用纯水稀释 10 和 500 倍, 过 0.22 μm 水相滤膜。按仪器工作条件进行测定。

1.2.3 测定方法 分别精密吸取上述混合对照储备液各 5 μL, 注入高效液相串联质谱仪, 测定出峰面积, 以浓度(ng/mL)(X)为横坐标, 峰面积(Y)为纵坐标, 绘制 7 种有机酸化合物标准曲线图。精密吸取上述供试品溶液 5 μL, 注入高效液相串联质谱仪, 测定峰面积, 采用外标法定量。

1.2.4 色谱及质谱条件 色谱柱: Waters ACQUITY UPLC BEH C<sub>18</sub> (100 mm×2.1 mm, 1.7 μm); 流动相 A 为乙腈溶液, 流动相 B 为 0.2% 甲酸水(v/v, 下同)溶液, 梯度洗脱程序: 0.0~2.0 min, 3%A; 2.0~2.5 min, 3%~30%A; 2.5~3.5 min, 30%A; 3.5~3.6 min, 30%~3%A; 3.6~7.0 min, 3%A; 流速 0.35 mL/min; 进样体

积 5  $\mu\text{L}$ ; 柱温 40  $^{\circ}\text{C}$ 。

质谱条件: 电喷雾离子源(ESI)电离, 负离子多反应监测(MRM)模式检测; 毛细管电压为-2.5 kV; 离子源和脱溶剂气温度分别为 150 和 350  $^{\circ}\text{C}$ ; 脱溶剂气和锥孔气流速分别为 800 和 50 L/h; 碰撞气为氩气; 7 种化合物的定性定量离子对( $m/z$ )、锥孔电压及碰撞能量等质谱参数见表 1。

表 1 待测物的监测离子对及最佳质谱参数

Table 1 Selected transitions and optimized potentials of the target compounds

分析物	电离极性	离子对	锥孔电压(V)	碰撞能量(eV)
富马酸	ESI <sup>-</sup>	114.7>71.1 <sup>a</sup>	-20	-8
琥珀酸	ESI <sup>-</sup>	116.7>73.0 <sup>a</sup>	-25	-10
	ESI <sup>-</sup>	116.7>99.0 <sup>b</sup>	-25	-10
苹果酸	ESI <sup>-</sup>	132.7>71.0 <sup>b</sup>	-25	-10
	ESI <sup>-</sup>	132.7>115.0 <sup>a</sup>	-25	-14
酒石酸	ESI <sup>-</sup>	148.7>73.0 <sup>b</sup>	-25	-10
	ESI <sup>-</sup>	148.7>103.0 <sup>a</sup>	-25	-15
莽草酸	ESI <sup>-</sup>	172.8>93.0 <sup>a</sup>	-25	-15
	ESI <sup>-</sup>	172.8>137.0 <sup>b</sup>	-25	-11
奎尼酸	ESI <sup>-</sup>	190.7>85.0 <sup>a</sup>	-55	-20
	ESI <sup>-</sup>	190.7>93.0 <sup>b</sup>	-55	-20
柠檬酸	ESI <sup>-</sup>	190.8>87.0 <sup>b</sup>	-25	-10
	ESI <sup>-</sup>	190.8>111.0 <sup>a</sup>	-25	-15

注: a: 定量离子对; b: 定性离子对。

### 1.3 数据分析

采用 Origin 9.0 软件进行数据处理和图表的制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 液相质谱条件的选择

文献 [22] 表明, 因有机酸在反相色谱柱中的保留值较小, 酸性物质在高极性流动相(水相比例高)中会存在电离形式和未电离形式, 导致色谱图中同一物质出现多峰和拖尾现象, 影响检测精度; 控制流动相 pH 可以有效调控有机酸的测定形态, 避免多峰和拖尾现象。因此, 本研究考察了乙腈-水、乙腈-0.1% 甲酸溶液和乙腈-0.2% 甲酸溶液等 3 种流动相对测定的影响。结果表明: 7 种有机酸类化合物中酒石酸和柠檬酸在乙腈-水和乙腈-0.1% 甲酸溶液条件下, 出现明显拖尾现象, 见图 1; 而在乙腈-0.2% 甲酸溶液

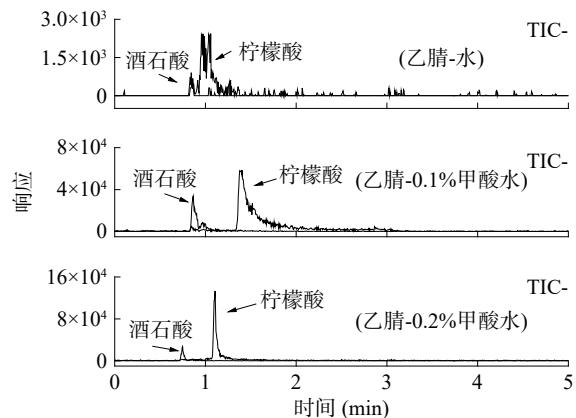


图 1 液相色谱条件优化

Fig.1 Optimization of UPLC conditions

作为流动相下, 7 种有机酸类化合物半峰宽小, 峰形对称尖锐, 满足测试要求。

### 2.2 标准曲线、线性范围和检出限

将有机酸混合对照溶液在上述液相质谱条件下进行测定, 绘制进样浓度为横坐标、定量离子对峰面积为纵坐标的 7 种有机酸类化合物标准曲线, 线性拟合得到线性方程和决定系数, 结果见表 2。由表 2 可知, 7 种有机酸线性拟合良好, 决定系数均大于 0.990。7 种有机酸对照品溶液色谱图见图 2。由图 2 可知, 7 种有机酸峰形良好, 目标峰周围无杂峰干扰, 满足定量检测要求。根据信噪比( $S/N$ )=3, 计算得到 7 种有机酸的检出限, 结果见表 2。

### 2.3 回收率和精密度实验

在烘焙洪都拉斯咖啡豆样品中分别加入 3 个浓度梯度的有机酸标准溶液, 按上述条件平行测定 6 次, 扣除本底含量后计算加标回收率和相对标准偏差(RSD), 结果见表 3。由表 3 可知, 采用该研究建立的方法测定 7 种有机酸的加标回收率为 81.9%~104.7%, RSD 为 0.53%~6.64%。7 种有机酸化合物精密度和回收率均满足定量检验需求。

### 2.4 烘焙程度及咖啡豆种类因素考察

对 7 种有机酸在不同烘焙程度下的含量变化进行研究, 通过检测洪德拉斯 SHB 咖啡生豆在 220  $^{\circ}\text{C}$  温度下有机酸随时间变化的含量, 得到 7 种有机酸的含量变化点线图, 结果见图 3。由图 3 可知, 7 种

表 2 回归方程和线性范围

Table 2 Linearity parameters and linear ranges of BPs

分析物	线性方程	决定系数	浓度范围(ng/mL)	检出限( $\mu\text{g/kg}$ )
富马酸	$Y=2.67042X+11.4635$	0.995	50.0~2000	45.5
琥珀酸	$Y=3.31166X+62.5362$	0.997	50.0~2000	28.9
苹果酸	$Y=10.0262X-202.479$	0.997	50.0~2000	9.1
酒石酸	$Y=1.56956X-36.654$	0.994	50.0~2000	160.0
莽草酸	$Y=2.07171X+31.6635$	0.996	50.0~2000	1.2
奎尼酸	$Y=1.8074X+43.5789$	0.990	50.0~2000	1.1
柠檬酸	$Y=9.18386X-187.335$	0.996	50.0~2000	36.4

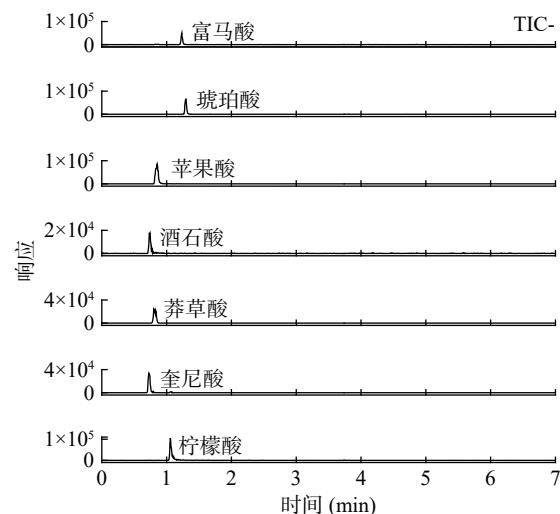


图 2 有机酸化混合标准溶液色谱图(50 ng/mL)

Fig.2 Chromatograms for the mixed standard solution of organic acids(50 ng/mL)

有机酸均有检出, 其中最主要的酸是奎尼酸、柠檬酸和苹果酸, 有机酸含量受温度因素影响较大。富马酸含量随烘焙时间的增加呈现先增加后降低的趋势, 在烘焙 40 min 时达到最大值, 含量为 15.47 mg/kg; 琥珀酸含量随烘焙时间的增加而增加, 烘焙前 30 min 含量变化较小, 烘焙 40 min 时开始快速增加, 60 min 烘焙含量最高; 苹果酸含量随烘焙时间增加而逐渐降低, 烘焙时间越长, 苹果酸含量越低, 烘焙 40 min 后降幅趋于平缓; 酒石酸含量随烘焙时间增加而增加, 烘焙 60 min 酒石酸含量最高, 为 8.93 mg/kg; 莽草酸

表 3 精密度与回收试验结果(n=6)

Table 3 Results of tests for recovery and precision (n=6)

分析物	本底值 (mg/kg)	加标水平 (mg/kg)	平均回收率 (%)	相对标准偏差 (%)
富马酸	0.55	2.00	100.9	5.09
		10.00	97.2	4.30
		20.00	95.6	3.29
琥珀酸	4.26	2.00	95.2	4.89
		10.00	104.7	3.58
		20.00	98.8	3.76
苹果酸	288.24	200.00	94.7	2.28
		500.00	92.4	2.21
		1000.00	89.3	1.49
酒石酸	0.74	2.00	93.2	6.64
		10.00	87.4	5.02
		20.00	82.8	4.24
莽草酸	0.00	2.00	85.6	4.97
		10.00	83.2	4.73
		20.00	81.9	2.01
奎尼酸	479.45	200.00	87.7	2.75
		500.00	86.9	1.73
		1000.00	83.6	0.53
柠檬酸	705.71	200.00	102.6	3.68
		500.00	98.7	3.41
		1000.00	95.5	1.27

含量变化较为特殊, 前 30 min 未检出, 30 min 之后开始检出, 烘焙 60 min 达到峰值; 奎尼酸含量随烘焙时间的增加而逐渐升高, 20 min 后变化幅度较小; 柠檬酸含量随烘焙时间的增加呈现先增加后大幅减少的变化趋势。根据主要的三种酸柠檬酸、苹果酸与奎尼酸的含量变化表现可以看出轻度烘焙下, 引起愉悦

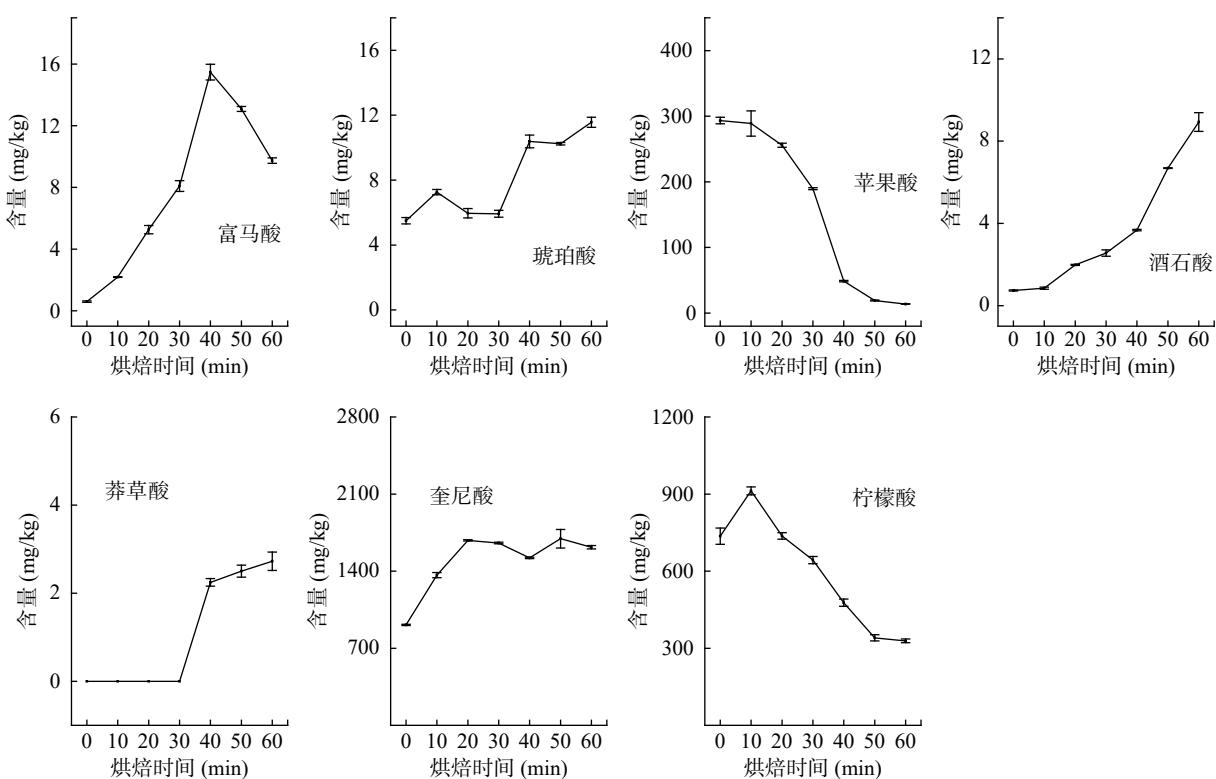


图 3 洪德拉斯咖啡豆不同烘焙程度下的有机酸含量变化(n=3)

Fig.3 Organic acid content of Honduras coffee beans with different roasting (n=3)

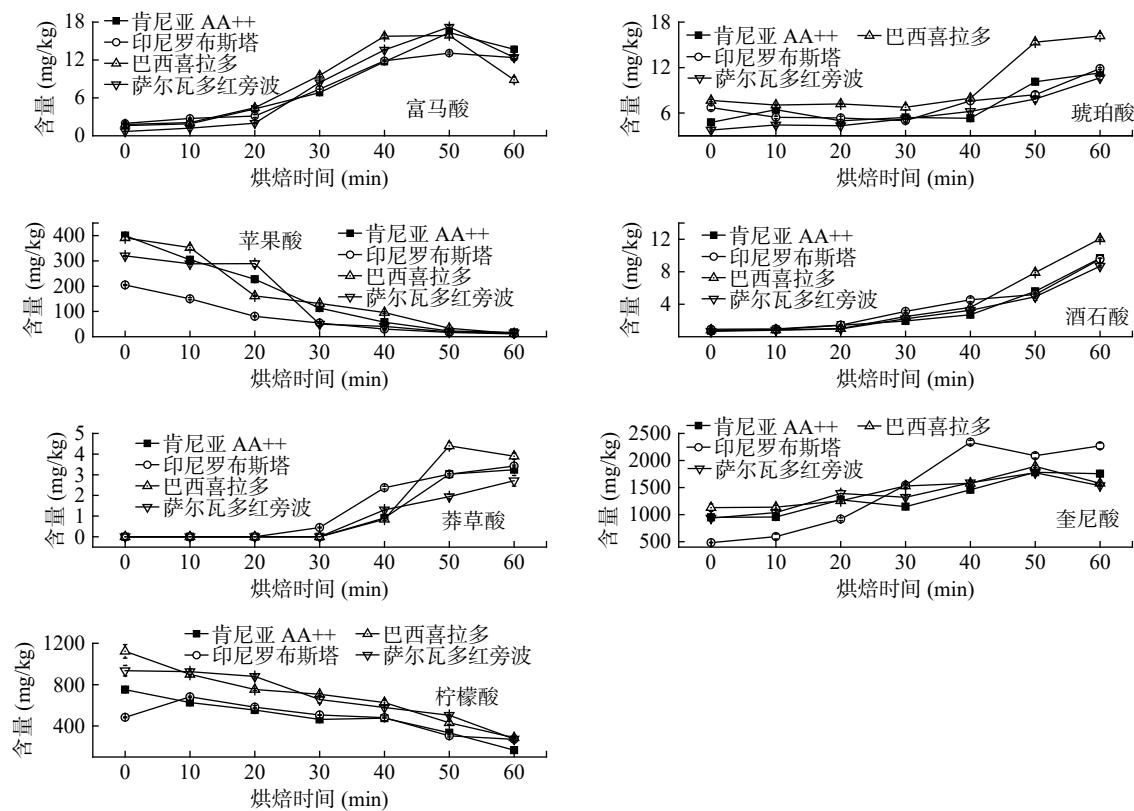


图 4 4 种咖啡豆不同烘焙程度下的有机酸含量变化(n=3)

Fig.4 Organic acid content of 4 coffee beans with different roasting (n=3)

味道的柠檬酸和苹果酸总量最高,达到1201.5 mg/kg,引起涩味的奎尼酸含量最低,为1363.7 mg/kg,因此轻度烘焙时咖啡豆的酸感最佳。

根据7种有机酸含量变化点线图结合文献报道<sup>[23-24]</sup>可以得到有机酸的相互关系和变化规律:苹果酸中 $\alpha$ 羟基受热易脱水转化为富马酸,造成苹果酸含量下降,富马酸含量上升;奎尼酸可以由绿原酸加热降解而来,莽草酸则由奎尼酸脱水生成,因此奎尼酸和莽草酸含量虽然都呈现上升趋势,但是莽草酸上升滞后于奎尼酸;柠檬酸在受热下则会分解成琥珀酸,造成柠檬酸与琥珀酸含量形成负相互关系;酒石酸则由葡萄糖氧化分解形成,造成含量上升。

基于洪都拉斯咖啡豆中有机酸变化规律和最佳酸度烘焙条件,本研究对市面上常见的其他产地咖啡豆进行了有机酸含量检测,验证上述规律及工艺。结果见图4,4种其他咖啡豆有机酸含量变化趋势与洪都拉斯咖啡豆相似,但含量有所差异。研究表明巴西喜拉多咖啡豆在中轻度烘焙酸度最高,印尼罗布斯塔咖啡豆则在烘焙过程中酸度最低。比较奎尼酸含量变化图发现,中轻度烘焙下,印尼罗布斯塔咖啡豆涩度最低;中深度到重深度烘焙过程中,印尼罗布斯塔咖啡豆涩度最高,但四种咖啡豆涩度差异较小。因此,本研究对烘焙过程中咖啡豆中有机酸变化规律具有普适性,满足咖啡豆的基于酸度口感的烘焙工艺要求。

### 3 结论

建立了以液质联用技术检测咖啡豆中7种有机

酸化合物的检测方法;该方法采用纯水作为提取溶剂、采用UPLC-MS/MS在负离子多反应监测(MRM)模式下检测,外标法定量。该分析方法满足方法学考察要求,操作简便,灵敏度好,准确度高,实用性强,为咖啡豆中有机酸含量测定提供了技术支持。咖啡豆的口味受有机酸影响较大,有机酸含量与烘焙条件密切相关,烘焙程度中对咖啡豆中7种有机酸含量影响的研究报道还较少,通过测定在6种烘焙条件下咖啡豆中7种有机酸含量,结果显示7种有机酸均有检出,其中最主要的酸是柠檬酸,奎尼酸和苹果酸。烘焙过程中洪都拉斯咖啡豆,柠檬酸、苹果酸含量下降,琥珀酸、酒石酸、莽草酸、奎尼酸含量上升,富马酸含量先增加后降低;以柠檬酸和苹果酸为指标显示,在轻度烘焙条件下,酸度口感最佳;考察4种常见产地咖啡豆发现,不同咖啡豆有机酸变化趋势大体相同,但有机酸含量略有差异,因此调控烘焙程度及咖啡豆产地,可以有效地改变咖啡的酸味及涩味,同时本研究也为改进咖啡烘焙工艺提供了一定的理论依据。

### 参考文献

- [1] 文志华,毕晓菲,鲁维艳.中国咖啡消费趋势浅谈[J].农产品加工,2018(1):69-70.
- [2] 武瑞瑞,李贵平,黄健,等.HPLC法同时测定4种焙炒咖啡豆中6种有机酸方法初探[J].江西农业学报,2018,30(3):112-115.
- [3] Tavarini S, Degl'Innocenti E, Remorini D, et al. Antioxidant capacity, ascorbic acid, total phenols and carotenoids changes during

- harvest and after storage of Hayward kiwifruit[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(1): 282–288.
- [4] Carla I R, Liliana M, Rodrigo M, 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.
- [5] 曾凡逵, 欧仕益. 咖啡风味化学 [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2014.
- [6] 段丽娜, 邱碧丽, 代丽玲, 等. HPLC 同时测定云南卡蒂姆咖啡中 7 种有机酸含量的方法[J]. 热带农业科学, 2018, 38(12): 100–104.
- [7] 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.
- [8] Grosch W. Flavour of coffee. A review[J]. *Food/Nahrung*, 1998, 42(6): 344–350.
- [9] 程兰香, 黄永光, 周文美, 等. 马尾松不同部位中莽草酸的含量分析[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(3): 260–262.
- [10] 牛金刚, 梁晓静, 刘霞, 等. 分光光度法测定水溶液中的有机酸含量[J]. 应用化学, 2010, 27(3): 342–346.
- [11] 王韦岗, 唐双双, 陆源. 气相色谱法测定食品中 12 种有机酸[J]. 化学分册, 2017, 53(11): 1313–1317.
- [12] 袁华伟, 杨泽刚, 兰著奎, 等. 气相色谱法测定己酸发酵液中的己酸等有机酸含量[J]. 酿酒科技, 2018(3): 102–105.
- [13] Kemme T, Kodama S, Yamamoto A, et al. Reversed phase liquid chromatographic determination of organic acids using on-line complexation with copper(II) ion[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, 886: 194–199.
- [14] 李珊, 阿依姑丽·艾合麦提, 孙鹏, 等. RP-HPLC 法同时测定新疆野山杏果肉中 10 种有机酸成分[J]. 食品工业科技, 2017, 38(20): 250–255.
- [15] Restuccia D, Spizzirri U G, Puoci F, et al. LC with evaporative light-scattering detection for quantitative analysis of organic acids in juices[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10(3): 704–712.
- [16] 张传, 金小青, 赵岳星. 基于新型立体结构的色谱固定相的高效液相色谱法检测分离 7 种有机酸[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(1): 167–172.
- [17] 宋卫得, 李兆杰, 杨立明, 等. 离子色谱法快速测定白酒中多种有机酸和阴离子[J]. 中国酿造, 2017, 36(11): 153–157.
- [18] Li F, Bao Y, Yu Y, Cui H, et al. Simultaneous determination of organic acids, inorganic anions, and alditols in wine with valve-switching ion chromatography[J]. *Chromatographia*, 2018, 81(7): 1103–1108.
- [19] Sandín-España P, Mateo-Miranda M, López-Goti C, et al. Development of a rapid and direct method for the determination of organic acids in peach fruit using LC-ESI-MS[J]. *Food Chemistry*, 2016, 192: 268–273.
- [20] 韩婉清, 王斌, 王莉, 等. UPLC-MS/MS 法测定凉茶饮料中的有机酸和黄酮类化合物[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 130–134.
- [21] 王思威, 刘艳萍, 王潇楠, 等. 基于高效液相色谱-三重四极杆串联质谱技术测定鲜荔枝果肉中 10 种有机酸含量[J]. 农药学报, 2019, 21(3): 359–365.
- [22] 赵景婵, 郭治安, 常建华, 等. 有机酸类化合物的反相高效液相色谱法的分离条件研究[J]. 色谱, 2001, 19(3): 260–263.
- [23] 吕文佳, 刘云, 杨剖舟, 等. 咖啡主要烘焙风味物质的形成及变化规律[J]. 食品工业科技, 2015, 36(3): 394–400.
- [24] Ginz M, Balzer H H, Bradbury A G W, et al. Formation of aliphatic acids by carbohydrate degradation during roasting of coffee[J]. *European Food Research and Technology*, 2000, 211(6): 404–410.