

基于HS-SPME-GC-MS、电子鼻与HPLC分析不同烘焙方式下咖啡豆风味化合物的变化

张述成^{1,2}, 刘会敏¹, 马海乐^{1*}, 刘晓霜¹, 陈文庆¹, 欧阳宁宁¹, 王武力¹, 张纪凯¹

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013)(2. 江苏大学农业工程学部, 江苏镇江 212013)

摘要: 为研究不同烘焙方式对咖啡豆风味化合物作用的差异。采用高效液相色谱法 (HPLC)、电子鼻、顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用 (HS-SPME-GC-MS) 技术分析催化红外 (CIR)、电红外 (EIR)、热风 (HA) 三种烘焙方式对咖啡豆风味化合物作用的不同。结果显示, 不同烘焙方式咖啡豆的总糖、总酚、脂肪、蛋白质、绿原酸、葫芦巴碱含量有极显著不同, 总酸、咖啡因含量无显著 ($P>0.01$) 不同; 电子鼻数据的正交偏最小二乘判别 (OPLS-DA) 模型预测指数 $R^2=0.858$; GC-MS 检测出 15 类共 196 种挥发性化合物, 以 GC-MS 数据中 104 种共有挥发性化合物建立的 OPLS-DA 模型预测指数最高, 为 0.926, 结合香气活度值 (OAV) 分析, 筛选出 2,3- 丁二酮、2,3- 戊二酮、醋酸呋喃甲酯、3,5- 二乙基 -2- 甲基吡嗪、异戊酸甲酯、羧基丙酮六种重要香气差异成分, CIR 组重要香气差异成分含量均高于另外两组; 能源成本分析表明, CIR 的能源成本比 HA 和 EIR 降低了 73.87% 和 23.68%。综上, CIR 可获得更高品质的咖啡豆且更加节能, 该研究为开发新型高品质咖啡烘焙技术提供理论依据。

关键词: 咖啡豆; 烘焙; 催化式红外; 风味; 节能

文章编号: 1673-9078(2026)4-254-264

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0185

Analysis of Flavor Compound Variations in Coffee Beans Subjected to Different Roasting Methods by Using HS-SPME-GC-MS, E-nose, and HPLC

ZHANG Shucheng^{1,2}, LIU Huimin¹, MA Haile^{1*}, LIU Xiaoshuang¹, CHEN Wenqing¹,

OUYANG Ningning¹, WANG Wuli¹, ZHANG Jikai¹

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. Faculty of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A comparative investigation of roasting methods by using catalytic infrared (CIR), electric infrared (EIR), and hot air (HA) was conducted to evaluate their distinct impacts on coffee bean flavor profiles through integrated analytical techniques, such as high-performance liquid chromatography, electronic nose, and headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). Significant inter-method variations ($P<0.01$) were identified in the contents of total sugars, polyphenols, lipids, proteins, chlorogenic acid, and trigonelline, whereas total acidity and caffeine levels remained statistically

引文格式:

张述成,刘会敏,马海乐,等.基于HS-SPME-GC-MS、电子鼻与HPLC分析不同烘焙方式下咖啡豆风味化合物的变化[J].现代食品科技,2026,42(4):254-264.

ZHANG Shucheng, LIU Huimin, MA Haile, et al. Analysis of flavor compound variations in coffee beans subjected to different roasting methods by using HS-SPME-GC-MS, E-nose, and HPLC [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 254-264.

收稿日期: 2025-02-14; 修回日期: 2025-04-08; 接受日期: 2025-04-09

基金项目: 省部共建现代农业装备与技术协同创新中心项目 (XTCX1008)

作者简介: 张述成 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品物理加工, E-mail: chengchengzhangZSC@163.com

通讯作者: 马海乐 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品物理加工, E-mail: mhl@ujs.edu.cn

comparable ($P>0.01$). Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) of electronic nose data showed a prediction reliability of $R^2=0.858$, whereas GC-MS characterization revealed 196 volatile compounds spanning 15 classes, with 104 shared volatiles establishing the most robust OPLS-DA model ($R^2=0.926$). Six pivotal aroma discriminators-2,3-butanedione, 2,3-pentanedione, furfuryl acetate, 3,5-diethyl-2-methylpyrazine, methyl isovalerate, and hydroxyacetone-were quantitatively prioritized via odor activity value assessment, all demonstrating elevated concentrations in CIR-processed beans. Energy efficiency analysis further highlighted CIR's superiority, exhibiting 73.87% and 23.68% cost reductions relative to HA and EIR, respectively. These findings collectively validate CIR as a dual-advantage roasting modality, simultaneously enhancing flavor complexity through targeted volatile compound preservation and optimizing energy utilization, thereby providing actionable insights for developing precision roasting technologies in specialty coffee manufacturing.

Key words: coffee beans; roasting; catalytic infrared radiation (CIR); flavor; energy-saving

咖啡豆经过脱皮、干燥、烘焙、萃取等加工步骤后可制成世界三大无酒精饮料之一的咖啡^[1]。咖啡不仅是具有多种保健作用和诱人风味的日常饮品，还是仅次于石油、水稻、小麦的世界第四大原料性出口贸易产品，具有极高的经济价值^[2,3]。

咖啡豆烘焙是咖啡加工过程中最重要的一环，被认为是影响咖啡品质的仅次于咖啡豆自身的关键因素，咖啡的香气、风味等品质指标的 70% 都取决于咖啡的烘焙过程^[4]。咖啡豆烘焙的目的是通过控制咖啡豆的受热，充分释放咖啡生豆的潜在风味物质与芳香组分，让咖啡的苦涩和酸涩之间建立平衡，为不同品种的咖啡找到其风味特性^[5]。咖啡豆在烘焙过程中发生了美拉德、焦糖化等反应，可产生令人愉快或不愉快的香气物质。同时，烘焙过程中咖啡豆的糖、酸、葫芦巴碱和绿原酸等风味及功能性物质也在发生变化^[6]。目前的咖啡豆烘焙技术中，热风烘焙在工业生产中最常用。直火与电红外烘焙因为在烘焙过程中热源会与咖啡豆粉尘接触，有安全隐患，不适用于工业大规模生产，这两项技术目前常用于少量烘焙场景。另外还有研究指出，微波^[7]与太阳能烘焙^[8]也具有一定的应用前景。

Freitas 等^[9]研究了热风烘焙对阿拉比卡咖啡豆和罗布斯塔咖啡豆化学成分和感官品质的影响，结果表明烘焙温度与时间会影响焙烤咖啡豆的糖、挥发性酸、pH 值、可溶性固形物含量等，感官评价结果指出较低烘焙温度的咖啡风味与香气更易被接受；王璐^[10]研究了小粒咖啡的微波烘焙工艺优化与微波烘焙对云南小粒咖啡活性成分的影响，结果表明微波烘焙对咖啡豆内有机酸影响大，有机酸在浅烘焙阶段既会检测不出，与电热对比，咖啡因、绿原酸、葫芦巴碱含量等均无显著差别 ($P>0.05$)。催化式红外辐射技术 (Catalytic Infrared Radiation, CIR) 是以天然气为能源，使其在钯、铂金等贵金属的催化作用下与空气中的氧气发生氧化反应，在不燃烧的情况下释放出无火焰的红外线，以

辐射传热的方式将热量传递给加热对象，副产物仅为少量的 CO_2 和水蒸气^[11]，具有节能、环保、高效率的优势^[12,13]。因此，CIR 是一种潜在的可获得高品质焙烤咖啡豆且高效节能的烘焙方法，但目前相关研究尚未见报道。

本研究主要以传统热风 (Hot Air, HA) 和电红外 (Electric Infrared Radiation, EIR) 作为对照，研究 CIR 烘焙下咖啡豆风味化合物的变化，并初步探讨其能耗效果。为此使用不同烘焙方式将咖啡豆焙烤至相同烘焙程度，通过 HPLC 检测咖啡豆主要非挥发性风味化合物的含量，电子鼻与 HS-SPMC-GC-MS 联合分析不同烘焙方式对咖啡豆挥发性风味化合物的影响，并建立挥发性化合物与不同烘焙方式之间的判别模型。研究结果有助于帮助理解不同烘焙方式下咖啡豆风味化合物的变化，为 CIR 技术应用于咖啡豆烘焙提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

罗布斯塔咖啡豆 (哥伦比亚产)，苏州金猫咖啡有限公司；甲醇、乙腈、乙酸、咖啡因、葫芦巴碱、绿原酸 (色谱纯)，上海源业生物科技有限公司；没食子酸 (分析纯)，北京沃凯生物科技有限公司；其余试验用试剂均为分析纯，购自国药化学试剂有限公司。

KMDJ-2A 型 咖 啡 豆 磨 豆 机，Cliton 公司；PROBATINO P01 型热风咖啡豆烘焙机，PROBAT 公司；狙击手 M2 型电红外咖啡豆烘焙机，KALEIDO 公司；催化红外咖啡豆烘焙机 (试做型)，镇江美博红外科技有限公司；PEN3 电子鼻，德国 Airsense 公司；TQ8040 型气相-质谱联用仪，日本岛津公司；Lighttells CM100 咖啡豆色度仪，上海大正器具有限公司；Agilent1260 高效液相色谱系统，美国 Agilent 公司；

TU1800 紫外分光光度计, 浦西通用仪表有限公司(中国上海)。

1.2 试验方法

1.2.1 咖啡豆烘焙工艺

咖啡生豆由苏州金猫咖啡有限公司提供, 参照企业经验, 采用中深烘焙程度(CM100 测量豆色 43~47, 豆粉色 42~46)作为咖啡豆理想状态进行对比, 通过不同的烘焙方式达到相同烘焙程度。其中 HA 烘焙采用苏州金猫咖啡有限公司提供的烘焙条件, EIR 与 CIR 烘焙采用实验室自有烘焙条件。HA 烘焙的条件为: 豆量 500.00 g、入豆温度 160.00 °C、功率 4.40 kW、烘焙时间 11.00 min。EIR 烘焙的条件为: 豆量 250.00 g、入豆温度 160.00 °C、功率 1.04 kW、烘焙时间 11.00 min。CIR 烘焙的条件为: 豆量 250.00 g、入豆温度 160.00 °C、天然气流量 1.50 L·min⁻¹、烘焙时间 16.00 min。所有样品均制备三次。

1.2.2 样品处理方法

咖啡粉制备方法: 烘焙咖啡豆用电动研磨机研磨后过 30.00 目筛, 获得咖啡粉。用于总糖、蛋白质、脂肪、咖啡因、绿原酸、葫芦巴碱、电子鼻与 GC-MS 分析。

咖啡液制备方法: 取 8.25 g 咖啡粉样品加入 150.00 mL 95.00 °C 的纯水中, 放入恒温加热磁力搅拌器萃取 5.00 min。过滤, 获得咖啡液, 保存至 4.00 °C 冰箱, 在 24.00 h 内完成总酚、总酸的测定。

1.2.3 指标检测方法

总糖测定方法: 参考李梦丽等^[14]的方法稍作修改。取 0.40 g 咖啡粉放入 10.00 mL 离心管, 准确移取 8.00 mL 纯水加入, 漩涡震荡 30.00 s, 4 000.00 r·min⁻¹ 离心 15.00 min, 取 2.00 mL 上清液纯水定容至 100.00 mL。取溶液样品 2.00 mL 加入 25.00 mL 比色管, 加入 5.00 wt.% 的苯酚 1.00 mL, 加 5.00 mL 硫酸, 10.00 min 后 25.00 °C 水浴 5.00 min 后取出。紫外分光光度计于 490.00 nm 处测定其吸光值。

总酚测定方法: 采用福林酚比色法^[15]。取 1.00 mL 咖啡液移至 100.00 mL 容量瓶, 纯水定容。取溶液样品 1.00 mL 于 25.00 mL 试管中, 加入 0.50 mL 福林酚试剂、2.00 mL 7.50 wt.% 碳酸钠溶液和 6.50 mL 水, 漩涡震荡 1.00 min, 70.00 °C 水浴中反应 30.00 min, 冷却后在紫外分光光度计 750.00 nm 波长下测定吸光度。

蛋白质测定方法: 采用国标 GB 5009.5-2016 中自动凯氏定氮仪法。

脂肪测定方法: 参照国标 GB 5009.6-2016 第一法索氏抽提法。

总酸测定方法: 采用酸碱滴定法^[16], 以绿原酸计。取 1.00 mL 咖啡液定容至 50.00 mL, 移取 20.00 mL 稀释溶液于 50.00 mL 锥形瓶中, 加入 3.00 滴 1.00 wt.% 酚酞指示剂, 用 0.10 mol·L⁻¹ 的 NaOH 标准滴定液进行滴定, 至样品呈现红色且 30.00 s 内不褪色。

$$A_1 = \frac{C_1 \times V \times K_1}{M} \times K_2 \quad (1)$$

式中:

A_1 ——总酸得率, wt.%;

C_1 ——NaOH 溶液浓度, mol·L⁻¹;

V ——消耗的 NaOH 体积, mL;

K_1 ——酸的换算系数, 绿原酸为 0.059;

K_2 ——百分比换算系数, 100%;

M ——移取的咖啡液对应咖啡粉的质量, g。

主要非挥发性风味化合物测定方法: 咖啡因参考国标 GB 5009.139-2014、绿原酸及葫芦巴碱参照 Liu 等^[17]的方法稍作修改。采用 Agilent1260 高效液相色谱系统, 色谱柱为 C18 柱(Welch-XB, 5.00 μm, 250.00 mm×4.60 mm, 美国 Agilent 公司)。称取 1.00 g 咖啡粉, 加入 100.00 mL 的 95.00 °C 去离子水, 室温超声(功率密度 520.00 W·L⁻¹, 频率 28.00 kHz)提取 20.00 min。转移至 250.00 mL 离心瓶, 5 000.00 r·min⁻¹ 离心 15.00 min。取出上清液, 过 0.45 μm 滤膜, 4.00 °C 冷藏备用。

电子鼻测定方法: 参考顾晨等^[18]的方法, 称取咖啡粉 4.00 g 加入 20.00 mL 顶空瓶, 60.00 °C 水浴孵化 30.00 min。电子鼻清洗时间 180.00 s, 归零时间 10.00 s, 样品准备时间 5.00 s, 测定时间 300.00 s, 载气流速 200.00 mL·min⁻¹, 进样流量 200.00 mL·min⁻¹。待响应值平稳后, 选取 x 秒、 $x+3$ 秒及 $x+6$ 秒三个时间点的响应值进行数据分析。

挥发性风味化合物测定方法: 参考 Wang 等^[19]的方法稍作修改。挥发性风味分析由三重四极杆气相色谱-质谱联用仪完成。取 1.00 g 咖啡粉样品于 20.00 mL 顶空瓶中, 加入 0.01 wt.% 3-庚酮的甲醇溶液 200.00 μL, 60.00 °C 平衡 20.00 min, 用已活化的萃取头顶空吸附 30.00 min。吸附完成后立即进气相色谱质谱联用仪解析测定。GC 条件: 气相室进样口温度为 250.00 °C。初始温度 40.00 °C, 以 5.00 °C·min⁻¹ 的速度从 40.00 °C 升至 150.00 °C, 不保持, 然后以 10.00 °C·min⁻¹ 的速度升至 230.00 °C 并保持 10.00 min, 再以 20.00 °C·min⁻¹ 升到 250.00 °C, 保持 5.00 min; 载气为 He, 流量 1.00 mL·min⁻¹, 压力 2.40 kPa, SPEM 顶空进样 2.00 min, 不分流。MS 条件: 电子轰击离子源; 电子能量 70.00 eV; 传输线温度 275.00 °C; 离子源温度

230.00 ℃；母离子 m/z 285.00；激活电压 1.50 V；质量扫描范围 m/z 35.00~550.00。

将检出的挥发性成分与 NIST17 和 NIST17s 谱库进行比对定性，去除空白对照组检出物质，保留匹配度 $SI > 80.00$ 以上检出物质。

采用内标法定量，本试验采用 3-庚酮为内标物，计算公式如下：

$$C_2 = \frac{A_2 \times C_i}{A_i} \quad (2)$$

式中：

C_2 ——检出挥发性物质的相对含量， $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ；

A_2 ——检出挥发性物质的色谱峰面积；

C_i ——内标物 3-庚酮的浓度， $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ；

A_i ——内标物 3-庚酮的色谱峰面积。

气味活度值 (Odorant Activity Value, OAV) 为挥发性物质相对含量与其气味感知阈值的比值。计算公式如下：

$$O = \frac{C_3 \times G}{C_i} \quad (3)$$

式中：

O ——OAV 值；

C_3 ——样品中挥发性物质的相对含量， $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ；

C_i ——相对应的阈值， $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ；

G ——单位换算系数，1 000。

1.2.4 能耗与能源成本计算

为了体现不同烘焙方式之间能耗的差异，HA（烘焙时间 11.00 min）、EIR（烘焙时间 11.00 min）、CIR（烘焙时间 16.00 min）能耗计算仅计算烘焙部分消耗的热量，忽略预热、风机、滚筒电机、控制系统等能量消耗。其中 HA（功率 4.40 kW）与 EIR（功率 1.04 kW）能耗计算参数来自设备自身铭牌。工业生产常用天然气，但实验室条件限制，CIR 使用液化石油气（98.00 wt.% 以上为丙烷）进行试验，消耗量由微型气体流量计测得（平均值 $1.50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ）。丙烷热值为 $93\,240.00 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ，密度 $1\,868.00 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。成本计算 HA 与 EIR 采用工业电价（1.00 元·kWh⁻¹），其中 kWh（kilowatt-hour, kWh）为电能单位（1 kWh=3.6×10⁶ J）。CIR 采用实验室购买价（11.11 元·kg⁻¹）。为方便比较，三种烘焙方式能耗及能源成本均换算为烘焙 1.00 kg 咖啡生豆的消耗量。

HA、EIR 能耗公式：

$$Q = \frac{W \times H \times K_3}{K_4} \quad (4)$$

式中：

Q ——能耗，kJ；

W ——功率，kW；

H ——烘焙时间，min；

K_3 ——电能转化系数，3 600；

K_4 ——时间单位换算系数，60。

CIR 能耗公式：

$$Q = \frac{F \times K_5 \times H \times C_4}{K_6} \quad (5)$$

式中：

Q ——能耗，kJ；

F ——流量， $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ；

K_5 ——丙烷换算系数，0.29；

H ——烘焙时间，min；

C_4 ——丙烷热值， $93\,240.00 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ；

K_6 ——体积换算系数，1 000。

HA、EIR 能源成本公式：

$$D = \frac{Q \times P_1}{K_3} \quad (6)$$

式中：

D ——能源成本，元；

Q ——能耗，kJ；

P_1 ——工业电价，1.00 元·kWh⁻¹；

K_3 ——电能转化系数，3 600；

CIR 能源成本公式：

$$D = F \times H \times C_5 \times P_2 \quad (7)$$

式中：

F ——流量， $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ；

H ——烘焙时间，min；

C_5 ——丙烷密度， $1\,868.00 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；

P_2 ——液化石油气价格，11.11 元·kg⁻¹。

1.3 数据处理

通过 SPSS 27.01 (IBM Corporation, NY, USA) 软件的单因素 ANOVA 检验功能和 K 均值分类进行试验数据的显著性分析和 K 均值预测，Excel 2016 (Microsoft, WA, USA) 进行试验数据初步处理与表格整理，由 Origin 2024 (Northampton, MA, USA) 进行柱状图、数据占比图、韦恩交集图的绘制，SIMCA 14.1 (Umetrics, Sweden) 进行 OPLS-DA 分析和得分图与置换检验图的绘制。本研究所有试验均重复三次。

2 结果与分析

2.1 营养指标分析

总糖、总酚、脂肪、蛋白质和有机酸是咖啡豆的主要营养物质，这些化合物同时与咖啡的口感与滋味

也有联系。Toci 等^[20]的研究表明，总糖含量提高可以让咖啡具有更多的甜感。总酸含量采用酸碱滴定法测得，高总酸代表着 pH 值偏低，这会让咖啡酸度增加^[20]。蛋白质是人体非常需要的膳食营养之一，但 Zhai 等^[16]的研究指出蛋白质与咖啡感官评价无显著性相关关系。脂肪含量提高会让咖啡的口感更顺滑，且具有更持久的香气^[16]。酚类物质具有抗炎症、抗氧化的作用，咖啡中的酚类物质还是咖啡涩味的来源之一^[16]。不同烘焙方式下咖啡豆的主要营养指标如表 1 所示。由表 1 可知，CIR 组具有最高的总糖（39.09 mg·g⁻¹）和总酸（5.47 wt.%）含量，最低的总酚（32.17 mg·g⁻¹）含量，其蛋白质（14.88 wt.%）与脂肪（13.40 wt.%）含量与 HA 组无显著差异（ $P>0.01$ ），可能具有更高的甜感与酸度、更顺滑的口感。EIR 组具有最多的总酚（39.67 mg·g⁻¹）、脂肪（14.86 wt.%）和蛋白质（15.72 wt.%），较低的总糖（28.86 mg·g⁻¹）与最低的总酸（3.35 wt.%），可能具有更多的脂肪类香气、更涩的口感。HA 组具有最低的总糖（25.26 mg·g⁻¹），较低的总酚（35.76 mg·g⁻¹）、总酸（4.19 wt.%），蛋白质（15.14 wt.%）与脂肪（13.24 wt.%）含量与 CIR 组无显著差异（ $P>0.01$ ），可能具有较低的甜感、更平衡的口感。

2.2 主要非挥发性风味化合物分析

咖啡豆中呈现咖啡特征性苦味与涩味的主要组分是咖啡因、葫芦巴碱与绿原酸^[21]。三组烘焙方式下咖啡因、绿原酸和葫芦巴碱的含量如图 1 所示。由图 1 可知，（1）咖啡因含量在三组试验中无显著性差异（ $P>0.01$ ），实验室测得咖啡生豆咖啡因含量平均为 16.60 mg·g⁻¹，与图 1 数据（平均为 16.51 mg·g⁻¹）无显著性差异（ $P>0.05$ ），主要原因是咖啡因的降解温度高于咖啡豆的烘焙温度，所以在烘焙过程中含量基本无变化^[22]；（2）绿原酸与葫芦巴碱含量 HA 组（绿原酸 6.56 mg·g⁻¹，葫芦巴碱 2.92 mg·g⁻¹）最多、EIR 组（绿原酸 5.97 mg·g⁻¹，葫芦巴碱 2.49 mg·g⁻¹）次之、CIR 组（绿原酸 5.19 mg·g⁻¹，葫芦巴碱 1.77 mg·g⁻¹）最低。绿原酸作为咖啡豆中最重要的风味前体物质与咖啡涩味的主要来源，在烘焙过程中不断降解、参与反应生成多

种咖啡酸与其它挥发性风味化合物，赋予了咖啡独一无二的感官体验^[22]，因此图 1 的数据说明 CIR 与 EIR 烘焙会使得更多的葫芦巴碱与绿原酸参与反应或者降解，可能会让咖啡具有更浓厚的香气与更低的苦味与涩味。

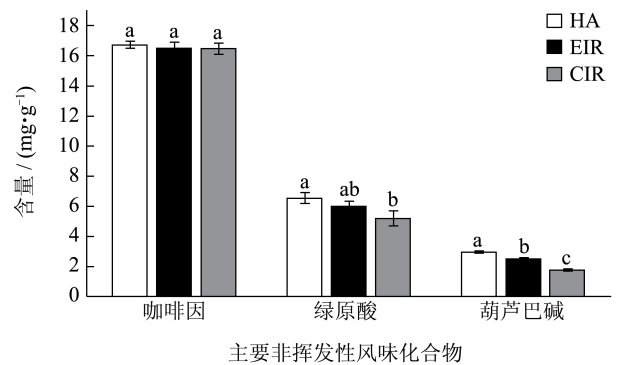


图 1 不同烘焙方式咖啡豆的主要非挥发性风味化合物含量
Fig.1 Key non-volatile flavor compounds in coffee beans subjected to different roasting methods

注：图中不同的小写字母表示具有显著差异（ $P\leq0.01$ ）。

2.3 挥发性风味化合物分析

2.3.1 电子鼻数据分析

电子鼻作为新型电子感官，其响应值是多种化合物共同作用的结果（表 2），是风味分析的量化手段之一^[23]。不同烘焙方式咖啡样品电子鼻响应值雷达图与响应值数据大小占比如图 2 所示。由图 2 可知，不同烘焙方式咖啡样品的电子鼻传感器响应区域相同，均在 W5S、W1W、W2W 三个传感器上有较高响应值（25.22~65.19 G·G₀⁻¹），数据大小占比在 19.28% 以上；在 W1S、W2S 两个传感器上有较小响应值（2.85~7.80 G·G₀⁻¹），数据大小占比在 3.92% 以下；其余传感器响应值极低（低于 1.07 G·G₀⁻¹），数据大小占比低于 1.00%。CIR 样品在 W1W、W2W、W5S、W1S、W2S 这五个传感器上具有三种烘焙方式中最高的响应值，这与前面主要非挥发性化合物分析结果吻合，CIR 与 EIR 这两种烘焙方式会在烘焙过程中消耗更多的葫芦巴碱与绿原酸，产生更多的风味化合物，使得电子鼻响应值更高，其中又以 CIR 最高。

表 1 不同烘焙方式咖啡豆的各营养指标含量

Table 1 Nutritional composition of coffee beans under different roasting methods					
烘焙方式	总糖/(mg·g ⁻¹)	总酚/(mg·g ⁻¹)	脂肪/(wt.%)	蛋白质/(wt.%)	总酸/(wt.%)
HA	25.26 ± 0.80 ^c	35.76 ± 0.57 ^b	13.24 ± 0.05 ^b	15.14 ± 0.21 ^b	4.19 ± 0.12 ^b
EIR	28.86 ± 0.59 ^b	39.67 ± 0.56 ^a	14.86 ± 0.04 ^a	15.72 ± 0.27 ^a	3.35 ± 0.35 ^c
CIR	39.09 ± 0.59 ^a	32.17 ± 0.78 ^c	13.40 ± 0.21 ^b	14.88 ± 0.23 ^b	5.47 ± 0.18 ^a

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P\leq0.01$ ）；CIR，催化红外；EIR，电红外；HA，热风。

由图 2 可知，三种烘焙方式均为 W1W 传感器响应值最高（在 $48.39\text{ G}\cdot\text{G}_0^{-1}$ 以上），由表 2 可知，W1W 传感器敏感物质为硫化物，这说明不同烘焙方式制得样品的风味组成中最容易被电子鼻检测到的均为硫化物。W2W、W5S 传感器响应值其次（ $25.22\sim 61.03\text{ G}\cdot\text{G}_0^{-1}$ ），W2W 传感器敏感物质为有机硫化物，W5S 传感器敏感物质为氮氧化合物，全部样品电子鼻数据中，W1W、W2W、W5S 三个传感器响应值合计数据大小占比最低 91.09%，这说明三种烘焙方式制得焙烤咖啡豆气味组成相似，主要由硫化物、有机硫化物、氮氧化合物组成。特别地，CIR 样品在 W1W、W2W、W5S 传感器上不仅响应值最高，而且响应值数据大小占比最均衡（比例最接近 1:1:1）。W1S 传感器敏感物质为烷类化合物，W2S 传感器敏感物质为醇、醛、酮，说明除了硫化物、有机硫化物与氮氧化合物之外，焙烤咖啡豆中还含有一部分可被电子鼻检测到的烷类化合物与醇、醛、酮，共同组成了焙烤咖啡豆的电子鼻数据空间。

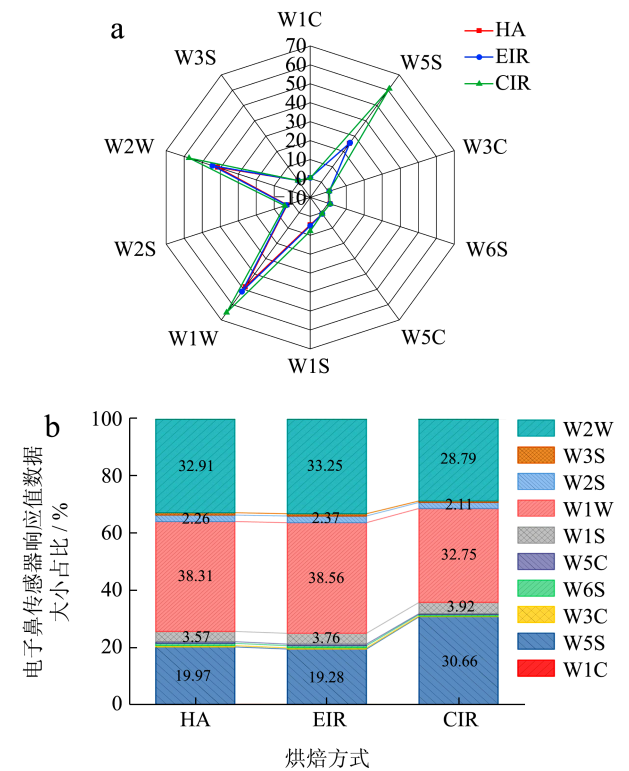


图 2 不同烘焙方式咖啡豆的电子鼻数据

Fig.2 E-nose data of coffee beans with different roasting methods

注：(a) 传感器响应值雷达图；(b) 传感器数据大小占比。

单一分析数据大小与占比无法全面体现三组烘焙方式的差异，因此对电子鼻数据进行了 OPLS-DA 分析，OPLS-DA 是一种有监督的识别方法，通过数据降维筛选出特征变量，建立判别模型并对观测值和变量进行

预测^[24]。缺点是会出现过拟合问题，因此需要对模型进行验证，确保不会出现过拟合的问题。

表 2 电子鼻各传感器对应编号及相应敏感物质与VIP值

Table 2 E-nose sensor numbers and sensitive substances and

VIP values for each sensor			
编号	传感器	检出物质	VIP 值
S1	W1C	芳烃化合物	0.90
S2	W5S	氮氧化合物	1.29
S3	W3C	氨、芳香分子	0.95
S4	W6S	氢化物	1.11
S5	W5C	短链烷烃芳香分子	0.92
S6	W1S	烷类化合物	0.94
S7	W1W	硫化物	0.91
S8	W2S	醇、醛、酮	0.87
S9	W2W	有机硫化物	0.95
S10	W3S	长链烷烃	1.09

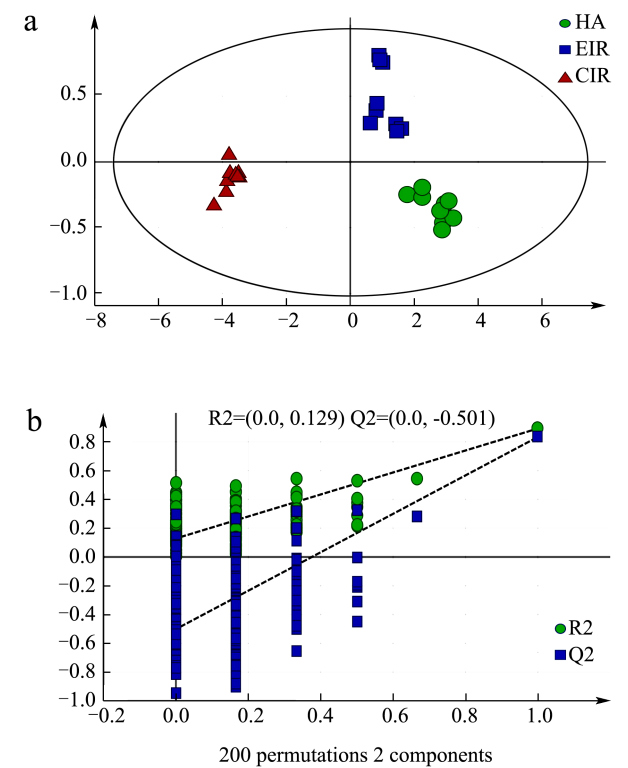


图 3 不同烘焙方式咖啡豆的电子鼻数据 OPLS-DA 分析

Fig.3 E-nose PCA analysis of coffee beans with different roasting methods

注：(a) 得分图；(b) 置换检验图。

基于样品电子鼻数据建立的 OPLS-DA 模型得分图与置换检验图如图 3a、图 3b 所示。自变量拟合指数 $R^2X=0.998$ ，因变量拟合指数 $R^2Y=0.909$ ，模型预测指数 $R^2=0.858$ ，均大于 0.5，模型拟合结果优秀。对模型进行 200 次交叉验证， Q^2 回归线与 Y 轴交点小于 0，

表明没有过拟合,模型验证成功,可用于表示三组不同烘焙方式焙烤咖啡豆的电子鼻数据特征。

由图3可知,三组样品电子鼻数据被准确区分,其中CIR与EIR和HA在X轴上区分良好,EIR与HA在Y轴上区分良好。说明三组不同烘焙方式焙烤咖啡豆的电子鼻数据之间存在一定的差异。变量投影重要性(Variable Importance for the Projection, VIP)是衡量变量在OPLS-DA模型中贡献度的常用标准,通常认为VIP值大于1的变量起到重要作用。由表2可知,W5S、W6S、W3S三个电子鼻传感器VIP值大于1,值得注意的是,W5S传感器不仅VIP值最高,对区分三组样品的电子鼻数据贡献最大。而且响应值在三组样品数据中占比在19.28%以上,是电子鼻数据空间的主要组成部分之一。

2.3.2 样品HS-SPME-GC-MS数据分析

2.3.2.1 样品HS-SPME-GC-MS检测结果分析

挥发性风味化合物是咖啡风味的重要组成部分,与非挥发性风味化合物一起,赋予了咖啡馥郁诱人的感官体验^[25]。如附表所示,通过HS-SPME-GC-MS共检测出了15类共196种挥发性风味化合物,其中醇类18种、酮类26种、含硫化合物10种、醛类10种、吡咯类7种、吡啶类12种、喹类18种、呋喃类15种、酸类12种、酯类18种、烃类21种、胺类16种、酚类6种、醚类2种、其它5种。醚类仅在EIR组中检出,其余14类挥发性化合物在三组中均被检出。CIR组总检出含量最高,为 $1\ 108.82\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,EIR组次之,为 $1\ 032.19\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,HA组最少,为 $883.41\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。数据符合主要非挥发性风味化合物数据分析结果,说明了CIR与EIR会消耗更多的咖啡豆风味前体物质,使得焙烤后咖啡豆挥发性风味化合物含量增加,两者中CIR作用最为明显。

CIR组检出14类共149种挥发性化合物、EIR组检出15类共149种挥发性化合物、HA组检出14类共134种挥发性化合物。在各种类挥发性化合物的含量对比上,CIR组在酮类、含硫化合物、吡咯类、吡啶类、喹类、呋喃类、酸类、酯类、烃类、胺类与其它化合物上含量最高,EIR组在醇类、醛类、酚类、醚类上含量最高。

如图4a所示,不同烘焙方式的样品HS-SPME-GC-MS数据各种类挥发性化合物组成占比有所差异。CIR与HA组含量最多,占比最大的是吡啶类挥发性化合物,占比16.16 wt.%以上;EIR组含量最多、占比最大的是酸类挥发性化合物,占比为14.76 wt.%。EIR与HA组醇类、酮类、醛类、吡啶类、喹类与酸类共六类挥发性化合物数据占比超过10.00 wt.%;CIR

组酮类、吡啶类、喹类与酸类共四类挥发性化合物数据占比超过10.00 wt.%。

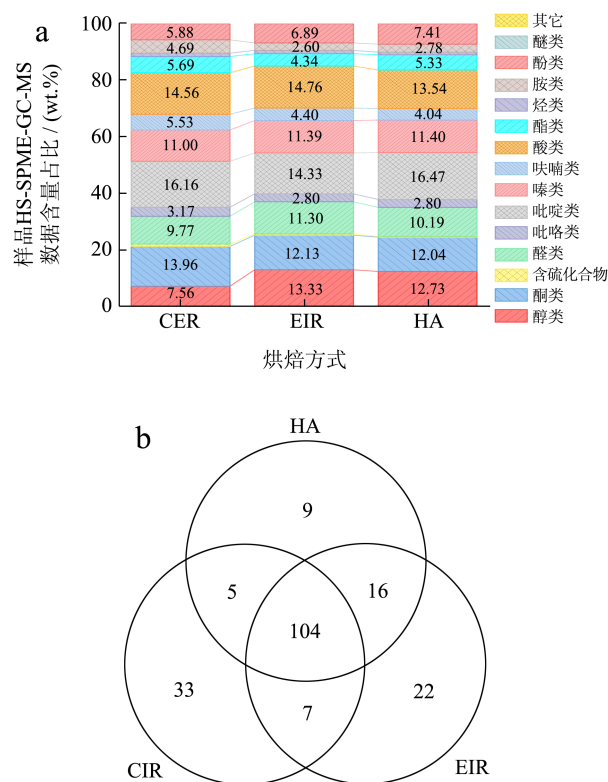


图4 不同烘焙方式咖啡豆的挥发性化合物

Fig.4 Volatile compounds in coffee beans of different roasting methods

注:(a)含量占比图;(b)韦恩交集图。

如图4b所示,不同烘焙方式的GC-MS检出挥发性化合物种类重合度也有所差异。三组样品均有的104种;CIR与HA组共有的5种;CIR与EIR组共有的7种;EIR与HA组共有的16种;CIR组独有的33种;EIR组独有的22种;HA组独有的9种。GC-MS数据统计中,104种共有挥发性化合物含量占比最低为97.88 wt.%,因此,这104种共有挥发性化合物是不同烘焙方式焙烤咖啡豆样品GC-MS数据的主要组成部分。另外,EIR与HA组挥发性化合物重合率最大,CIR组与HA和EIR组重合率基本一致。说明三组样品GC-MS数据之间HA与EIR组更为相似。

2.3.2.2 基于样本HS-SPME-GC-MS数据的OPLS-DA分析

为了进一步找出三组烘焙方式制得焙烤咖啡豆样品GC-MS数据之间的差异,建立基于样品GC-MS数据的OPLS-DA判别模型进行不同烘焙方式焙烤咖啡豆的挥发性化合物差异性分析。将196种挥发性化合物按照交集不同划分为三个变量集合,三种不同的变量集合建立的OPLS-DA模型自变量拟合指数 R^2X 、

因变量拟合指数 R^2Y 、模型预测指数 R^2 均大于 0.5, 200 次置换检验后 Q^2 均小于 0, 全部满足 OPLS-DA 模型分析要求, 可以用于样品 GC-MS 数据的差异性分析。值得注意的是, 在三个 OPLS-DA 模型中, 以 104 种共有挥发性化合物作为变量建立的 OPLS-DA 模型拟合度与区分效果最为优秀。自变量拟合指数 $R^2X=0.93$, 因变量拟合指数 $R^2Y=0.989$, 模型预测指数 $R^2=0.876$, 得分图如图 5a 所示, 不同烘焙方式焙烤咖啡豆样品的 GC-MS 数据被显著区分开, 200 次置换检验结果如图 5b 所示, Q^2 与 Y 轴交点为三种不同的变量集合建立的 OPLS-DA 模型中最小值。说明这 104 种共有挥发性化合物不仅是样品 GC-MS 数据的主要组成部分, 并且是样品 GC-MS 数据中差异性更大的部分挥发性化合物。

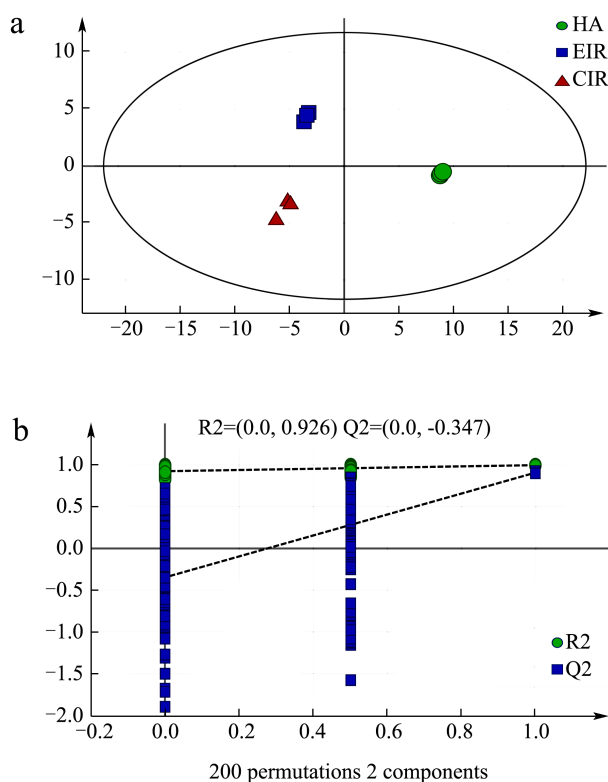


图 5 基于样品 HS-SPME-GC-MS 数据的 OPLS-DA 分析

Fig.5 OPLS-DA analysis based on sample HS-SPME-GC-MS data

注: (a) 得分图; (b) 置换检验图。

2.3.2.3 基于 OPLS-DA 分析结果的 OAV 分析

香气活度值 (Odor Activity Value, OAV) 是挥发性风味化合物与其香气阈值的比值, 常用来衡量挥发性风味化合物的香气贡献程度, 是一种有效表征关键香气成分的技术手段, 通常认为 OAV 值大于 1.00 的挥发性风味化合物对样品整体香气有贡献作用。

为了找出不同烘焙方式焙烤咖啡豆样品 GC-MS

数据中最具有差异性的香气成分, 选择区分度最高的以 104 种共有挥发性化合物建立的 OPLS-DA 模型进行差异性香气成分分析。以 $P<0.05$ 且 $VIP>1$ 为标准筛选出 43 种挥发性化合物, 结合文献报道的挥发性化合物香气阈值, 最终共有 18 种挥发性化合物可计算 OAV 值^[17,26-28], 结果如表 3 所示, 除去吡嗪与吡咯两种 OAV 值小于 1.00 的挥发性化合物, 共有 16 种挥发性风味化合物 OAV 值大于 1.00, 其中 6 种挥发性风味化合物 OAV 值大于 100.00。

16 种 OAV 值大于 1.00 的挥发性风味化合物中, 酮类有 5 种, 醛类 1 种, 吡咯类 1 种, 吡啶类 1 种, 噻类 3 种, 呋喃类 1 种, 酯类 2 种, 烃类 2 种。其中 OAV 值大于 100.00 的挥发性风味化合物中, 酮类 3 种, 噻类 1 种, 酯类 2 种。综合 GC-MS 检测结果分析来看, 酮类挥发性化合物不仅在三组烘焙方式样品 GC-MS 数据组成中占比至少 12.04%, 是除去吡咯类、酸类挥发性化合物之外含量第三多的挥发性化合物类别, 而且是 GC-MS 数据分析中差异性香气成分最多的类别。

在具体挥发性风味化合物 OAV 值上, CIR 与 EIR 组 OAV 值最高的是 2,3-丁二酮, HA 组 OAV 值最高的是醋酸呋喃甲酯。在 CIR 样品中, OAV 值大于 100.00 的有 6 种; 在 EIR 与 HA 样品中, OAV 值大于 100.00 的有 5 种, 差异出现在异戊酸甲酯与羟基丙酮两种挥发性风味化合物上, EIR 组异戊酸甲酯含量低于另外两组, HA 组羟基丙酮含量低于另外两组。三组之间香气差异成分含量具有一定的差异, 可能体现在焦糖、黄油味更强烈或者水果味更强烈上。

以 16 种 OAV 值大于 1.00 的挥发性风味化合物建立 K 均值判别模型, 判别成功率 77.78%; 以 6 种 OAV 值大于 100.00 的挥发性风味化合物建立 K 均值判别模型, 判别成功率 100.00%。综上所述, 2,3-丁二酮、2,3-戊二酮、醋酸呋喃甲酯、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪、异戊酸甲酯、羟基丙酮这六种 OAV 值大于 100.00 的挥发性风味化合物, 是不同烘焙方式均有的焙烤咖啡豆重要香气差异成分, 其中 CIR 组在六种重要香气差异成分含量上均显著高于另外两组。

2.4 能耗和能源成本计算

能耗和生产成本计算如表 4 所示, HA 的能耗与能源成本是最高的、CIR 是能耗与能源成本最低的烘焙方式, CIR 的成本是 HA 和 EIR 的 26.13% 和 76.32%, 即成本分别降低 73.87% 和 23.68%。这与 Zhu 等^[29]在鸡胸肉的干燥中的研究结论一致, CIR 可以显著降低咖啡豆烘焙的能耗与能源成本。

表 3 OPLS-DA分析的重要挥发性化合物OAV值

Table 3 Odor Activity Values (OAV) of key volatile compounds identified through OPLS-DA analysis						
编号	名称	阈值/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	OAV 值			气味
			CIR	EIR	HA	
1	吡嗪	75 000	0.11 ± 0.01^a	0.09 ± 0.00^b	0.08 ± 0.00^b	生坚果香、青香
2	吡咯	30 000	0.21 ± 0.01^a	0.14 ± 0.00^b	0.12 ± 0.00^c	焦香、烤香、甜香
3	2-乙基吡嗪	5 000	1.34 ± 0.10^a	0.99 ± 0.07^b	0.94 ± 0.03^b	坚果、木质香味
4	2-甲基呋喃	3 500	2.63 ± 0.19^a	1.38 ± 0.01^c	1.7 ± 0.10^b	甜香、巧克力味
5	5-甲基糠醛	6 000	4.02 ± 0.35^{ab}	4.9 ± 0.62^a	3.64 ± 0.10^b	焦糖香
6	2,3-二甲基吡嗪	1 000	4.99 ± 0.40^a	3.48 ± 0.34^b	3.33 ± 0.07^b	焙烤、奶油香
7	D-柠檬烯	200	7.73 ± 1.88^a	4.09 ± 0.23^b	4.98 ± 0.02^{ab}	柑橘、柠檬、甜味
8	3-己酮	50	5.13 ± 0.96^a	2.62 ± 0.22^b	3.28 ± 0.21^b	水果香
9	乙偶姻	750	7.51 ± 0.68^a	6.11 ± 0.46^b	5.45 ± 0.13^b	黄油味
10	吡啶	2 000	65.66 ± 3.17^a	51.45 ± 1.62^b	52.86 ± 1.08^b	酸味、烤味
11	月桂烯	15	69.06 ± 2.28^a	29.89 ± 1.56^b	32.39 ± 2.53^b	果香
12	1-糠基吡咯	100	87.26 ± 9.61^a	68.87 ± 10.36^{ab}	53.93 ± 1.26^b	榛子、咖啡香味
13	羟基丙酮	200	119.79 ± 11.06^a	117.85 ± 10.27^a	82.36 ± 2.89^b	焦糖香气
14	异戊酸甲酯	5	163.43 ± 20.19^a	84.45 ± 1.27^b	103.67 ± 3.73^b	苹果、菠萝味
15	3,5-二乙基-2-甲基吡嗪	8.6	177.77 ± 10.72^a	166.02 ± 12.59^{ab}	143.60 ± 6.48^b	坚果、花生香味
16	醋酸呋喃甲酯	66	415.22 ± 33.27^a	298.74 ± 27.54^b	309.30 ± 8.33^b	香蕉味
17	2,3-戊二酮	5	371.65 ± 49.08^a	241.81 ± 28.09^b	220.37 ± 13.18^b	黄油、焦糖香味
18	2,3-丁二酮	5	630.96 ± 69.95^a	354.05 ± 35.44^b	297.73 ± 8.74^b	焦糖香、黄油香味

注: CIR, 催化红外; EIR, 电红外; HA, 热风; $P \leq 0.05$ 。同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P \leq 0.01$)。

表 4 不同烘焙方式的能耗和能源成本
Table 4 Energy consumption and energy cost of different roasting methods

	能耗/($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)	用电或用气量	能源成本/(元· kg^{-1})
HA	7 989.00	2.22 kWh	2.22
EIR	2 745.60	0.76 kWh	0.76
CIR	2 595.80	27.84 L	0.58

2.5 讨论

Zhu 等^[29]的研究结果表明, CIR 与 EIR 可获得更高品质的干燥鸡胸肉, 其中 CIR 是四种干燥方式中能耗与成本最低的干燥方式; Chen 等^[30]的研究结果表明, 传送带式催化红外辐射 (Belt Catalytic Infrared Radiation, BCIR) 作为新型的中试热加工设备, 在烤制豆干的规模化生产中具有比 HA 效率高、品质好、节能的优点。本研究发现 CIR 在咖啡豆烘焙中可以获得比 EIR 与 HA 烘焙品质更高的咖啡豆, 且更加节能, 但受限于设备为实验室用试做型, 无法进行中试及以上规模的试验, 下一步计划制作实际中等规模生产量的 CIR 设备, 进一步推进 CIR 技术在咖啡豆烘焙中的应用。李钰莲等^[1]的研究结果表明, 中深度烘焙咖啡

风味的重要挥发性化合物有愈创木酚、2,6- 二甲基吡嗪、苯甲醛等, 多为烷烃类和酯类; Liu 等^[31]的研究结果表明, 通过 15.00 wt.% 果糖溶液预先处理的罗布斯塔咖啡豆拥有与阿拉比卡咖啡豆相似的香气, 在市场竞争中更加具有优势。本研究发现不同烘焙方式下咖啡豆挥发性化合物的含量与占比不同, CIR 与 HA 组含量最多的是吡啶类挥发性化合物, 占比 16.16 wt.% 以上; EIR 组含量最多的是酸类挥发性化合物, 占比为 14.76 wt.%。2,3- 丁二酮、2,3- 戊二酮、醋酸呋喃甲酯、3,5- 二乙基 -2- 甲基吡嗪、异戊酸甲酯、羟基丙酮这六种 OAV 值大于 100.00 的挥发性风味化合物, 是不同烘焙方式均有的焙烤咖啡豆重要香气差异成分; 试验结果表明, 不同的烘焙方式下咖啡豆挥发性化合物含量与种类会产生变化, CIR 烘焙可以获得挥发性风味物质含量更高的焙烤咖啡豆, 可能在市场竞争中更具优势。

3 结论

本研究使用了 HA、CIR 和 EIR 三种不同的热加工方式对咖啡豆进行了烘焙试验。各试验结果总结如下: 在主要营养指标与非挥发性风味物质试验方面得

出,不同烘焙方式焙烤咖啡豆的总糖、总酚、脂肪、蛋白质、绿原酸、葫芦巴碱含量有极显著($P<0.01$)差异,总酸、咖啡因含量无极显著($P>0.01$)差异;焙烤咖啡样品的电子鼻数据分析表明,焙烤咖啡豆在W5S、W1W、W2W三个传感器上具有高响应值(25.22~65.19 G-GO⁻¹),电子鼻数据的OPLS-DA分析可以将CIR、EIR、HA三组烘焙样品在数据空间上区分开,其中W5S对区分三组样品的贡献最大;通过HS-SPME-GC-MS检测出15类共196种挥发性化合物,其中醚类仅在EIR组中检出。CIR组检出14类共149种挥发性化合物、EIR组检出15类共149种挥发性化合物、HA组检出14类共134种挥发性化合物,建立基于样品GC-MS数据不同交集的OPLS-DA模型,发现以含量占比在97.88 wt.%以上的104种共有挥发性化合物作为变量的模型拟合度与区分效果最好。以GC-MS数据的OPLS-DA分析结果结合OAV分析,最终筛选出2,3-丁二酮、2,3-戊二酮、醋酸呋喃甲酯、3,5-二乙基-2-甲基吡嗪、异戊酸甲酯、羟基丙酮六种重要香气差异成分,其中CIR组在六种重要香气差异成分含量上均显著高于另外两组;能耗和能源成本计算得出,CIR是能耗与能源成本最低的烘焙方式,CIR的成本是HA和EIR的26.13%和76.32%,即成本分别降低73.87%和23.68%。综上所述,相比HA与EIR,CIR烘焙可以获得更高品质的焙烤咖啡豆且更节能,但目前缺乏成熟可靠的专用设备,需要在工业应用上进一步完善。

参考文献

- [1] 李钰莲,郑建伟,黄旭辉,等.多组学技术融合电子感官的咖啡风味品质分析[J].食品科学,2023,44(20):292-299.
- [2] ALCANTARA G M R N, DRESCH D, MELCHERT W R. Use of non-volatile compounds for the classification of specialty and traditional Brazilian coffees using principal component analysis [J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130088.
- [3] NEILSON J, WANG J-H Z. China and the changing economic geography of coffee value chains [J]. Singapore Journal of Tropical Geography, 2019, 40(3): 429-451.
- [4] 毕晓菲,李亚男,杨旸,等.小粒咖啡在烘焙加工过程中的相关技术参数初步研究[J].农产品加工,2022,22:38-40.
- [5] MARTINEZ S J, SIMAO J B P, PYLRO V S, et al. The altitude of coffee cultivation causes shifts in the microbial community assembly and biochemical compounds in natural induced anaerobic fermentations [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 671395.
- [6] 蒋天宁.烘焙度与水质对冷萃咖啡品质影响的研究[D].上海:上海应用技术大学,2021.
- [7] 张付杰,王璐,杨薇,等.小粒咖啡微波烘焙工艺优化及破裂力分析[J].食品与机械,2019,35(6):182-187,221.
- [8] MAJEED F, HUSNAIN S N, RAZA A, et al. Energy and exergy analysis of a solar coffee roaster using concentrating scheffler-reflector [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, 34: 101407.
- [9] FREITAS V V, BORGES L L R, CASTRO G A D, et al. Influence of roasting levels on chemical composition and sensory quality of Arabica and Robusta coffee: A comparative study [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 104171.
- [10] 王璐.小粒咖啡微波烘焙工艺研究及理化指标分析[D].昆明:昆明理工大学,2019.
- [11] 顾晨.香葱催化式红外联合干燥技术研究[D].镇江:江苏大学,2022.
- [12] VIDYARTHI S K, EL-MASHAD H M, KHIR R, et al. Tomato peeling performance under pilot scale catalytic infrared heating [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 246: 224-231.
- [13] SHI J, PAN Z, MCHUGH T H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1962-1972.
- [14] 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.
- [15] 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: 8440.
- [16] ZHAI X, YANG M, ZHANG J, et al. Feasibility of ultrasound-assisted extraction for accelerated cold brew coffee processing: characterization and comparison with conventional brewing methods [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 849811.
- [17] LIU H, LIU D, WANG W, et al. Dual-frequency countercurrent ultrasonic-assisted extraction of the cold brew coffee and in situ real-time monitoring of extraction process [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107118.
- [18] 顾晨,魏文莉,马海乐,等.基于电子鼻和GC-MS技术分析不同干燥方式对香葱挥发性物质的影响[J].中国调味品,2022,47(12): 148-153.
- [19] WANG Y, WANG X, HU G, et al. Comparative studies of fermented coffee fruits post-treatments on chemical and sensory properties of roasted beans in Yunnan, China [J]. Food Chemistry, 2023, 423: 136322.
- [20] TOCI A T, NETO V J M F, TORRES A G, et al. Changes in triacylglycerols and free fatty acids composition during storage of roasted coffee [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2013, 50(2): 581-90.
- [21] 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.
- [22] 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: 324-337.
- [23] SEVERINI C, RICCI I, MARONE M, et al. Changes in the aromatic profile of espresso coffee as a function of the grinding grade and extraction time: A study by the electronic nose system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(8): 2321-2327.

- [24] KANG C, ZHANG Y, ZHANG M, et al. Screening of specific quantitative peptides of beef by LC-MS/MS coupled with OPLS-DA [J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132932.
- [25] CARMONA-ESCUPIA R P, PONCE-ALQUICIRA E, GARCIA-PARRA M D, et al. Changes in the sensory odor profile during chorizo maturation and their relationship with volatile compound patterns by partial least square regression (PLS) [J]. Foods, 2023, 12(5): 932.
- [26] WANG M Q, MA W J, SHI J, et al. Characterization of the key aroma compounds in Longjing tea using stir bar sorptive extraction (SBSE) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), gas chromatography-olfactometry (GC-O), odor activity value (OAV), and aroma recombination [J]. Food Research International, 2020, 130: 108908.
- [27] HU W, WANG G, LIN S, et al. Digital evaluation of aroma intensity and odor characteristics of tea with different types-based on OAV-splitting method [J]. Foods, 2022, 11(15): 2204.
- [28] GUO X, SCHWAB W, HO C T, et al. Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS [J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131933.
- [29] ZHU R, CHEN W, ZHENG Y, et al. Comparison of four drying methods in terms of the drying efficiency and physicochemical properties of chicken meat [J]. Food Physics, 2024, 1: 100010.
- [30] CHEN W, SHEN C, JIANG Q, et al. Conveyor belt catalytic infrared radiation as a novel apparatus for dried tofu baking: Focus on evaluation of physicochemical qualities [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 95: 103703.
- [31] LIU C, YANG N, YANG Q, et al. Enhancing Robusta coffee aroma by modifying flavour precursors in the green coffee bean [J]. Food Chemistry, 2019, 281: 8-17.