喻好好, 付兴飞, 毕晓菲, 等. 广泛靶向代谢组学分析不同蜜处理加工方法对小粒咖啡非挥发性化合物的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 1−11. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020063
YU Haohao, FU Xingfei, BI Xiaofei, et al. Widely Targeted Metabolomics Analysis of Effects of Different Honey Treatment Processing Methods on Non-volatile Compounds in Yunnan Arabica Coffee[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 1−11. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020063

·特邀主编专栏—咖啡、可可、茶等特色饮料作物加工（客座主编: 董文江、许勇泉、付才力）·

广泛靶向代谢组学分析不同蜜处理加工方法对小粒咖啡非挥发性化合物的影响

喻好好[1,2], 付兴飞[1,2], 毕晓菲[1,2], 李忠贤[1], 董文江[3], 李贵平[1,2], 李亚男[1,2], 胡发广[1,2,*]
（1.云南省农业科学院热带亚热带经济作物研究所, 云南保山 678000;
2.云南省咖啡重点实验室, 云南保山 678000;
3.中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533）

摘　要: 为探究不同蜜处理加工方法中非挥发性化合物的代谢差异，采用 UPLC-MS/MS 广泛靶向代谢组学对不同脱胶率下（CH，脱胶率 100%；WH，脱胶率约 80%；YH，脱胶率为 40%~50%；RH，脱胶率为 20%~25%；BH，脱胶率 0%）的咖啡生豆进行系统分析。结果显示，在 5 种不同脱胶率处理的咖啡生豆中共鉴定到 1682 种代谢物，多元统计分析表明脱胶率明显改变了非挥发性化合物的代谢轮廓。以 VIP>1，$\log_2|FC|>1$ 和 $P<0.05$ 为阈值，筛选得到 192 种差异代谢物，其中氨基酸及其衍生物、有机酸、酚酸以及糖类是最主要的代谢物类别，在影响咖啡豆风味特性方面起着重要的作用。通过趋势分析，鉴定到 93 种非挥发性化合物的相对含量随脱胶率的降低而持续增加。京都基因与基因组百科全书（KEGG）结果显示，这些化合物在肌醇磷酸代谢、戊糖与葡萄糖酸的相互转化、半乳糖代谢、氨基糖和核苷酸糖代谢、链霉素的生物合成、吲哚生物碱生物合成以及碳水化合物消化吸收中显著富集（$P<0.05$）。根据最小二乘判别分析（PLS-DA）模型，确定了以 N-乙酰氨基酸为主的 10 种潜在标志性化合物以区分不同脱胶率的蜜处理方法。研究结果揭示了咖啡果胶对咖啡豆的非挥发性化合物的影响，为通过发酵控制提升咖啡风味特性提供了理论参考。

关键词: 广泛靶向代谢组学, 蜜处理法, 云南小粒咖啡, 非挥发性化合物
中图分类号: TS273　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0001−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020063
本文网刊:

Widely Targeted Metabolomics Analysis of Effects of Different Honey Treatment Processing Methods on Non-volatile Compounds in Yunnan Arabica Coffee

YU Haohao[1,2], FU Xingfei[1,2], BI Xiaofei[1,2], LI Zhongxian[1], DONG Wenjiang[3], LI Guiping[1,2], LI Yanan[1,2], HU Faguang[1,2,*]
（1.Tropical and Subtropical Cash Crops Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Baoshan 678000, China;
2.Yunnan Key Laboratory of Coffee, Baoshan 678000, China;
3.Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning 571533, China）

Abstract: To investigate the metabolic differences in non-volatile compounds across honey processing methods, UPLC-MS/MS-based widely targeted metabolomics was employed to analyze green coffee beans systematically under different mucilage removal rates (CH, 100%; WH, approximately 80%; YH, 40%~50%; RH, 20%~25%; BH, 0%). The results

收稿日期: 2025−02−12
基金项目: 云南省高层次科技人才及创新团队选拔专项——技术创新人才培养对象项目（202305AD160010）; 云南省农业联合基金面上项目（202401BD070001-088）; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金（1630012025119）。
作者简介: 喻好好（1998−）（ORCID: 0009−0003−7802−1557）, 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 咖啡生理学与生物化学, E-mail: y550570@163.com。
*** 通信作者:** 胡发广（1979−）, 男, 本科, 研究员, 研究方向: 咖啡关键技术研究与应用推广, E-mail: hfg2632@126.com。

revealed that 1682 metabolites were identified in green coffee beans subjected to five mucilage removal rate treatments; multivariate statistical analysis demonstrated that the removal rate significantly altered the metabolic profiles of non-volatile compounds. A total of 192 differential metabolites were screened using VIP>1, $\log_2|FC|>1$, and $P<0.05$ as thresholds. Among them, amino acids and their derivatives, organic acids, phenolic acids, and saccharides emerged as the most dominant metabolite categories, playing pivotal roles in influencing the flavor characteristics of coffee beans. Trend analysis detected 93 non-volatile compounds exhibiting progressively increased relative contents in correlation with decreasing mucilage removal rates. The Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (KEGG) results indicated that these compounds exhibited a significant enrichment ($P<0.05$) in inositol phosphate metabolism, pentose and glucuronate interconversions, galactose metabolism, amino sugar and nucleotide sugar metabolism, streptomycin biosynthesis, indole alkaloid biosynthesis, and carbohydrate digestion and absorption. Partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) model showed that ten potential marker compounds predominantly composed of N-acetyl amino acids were distinguished between honey processing methods with varying mucilage removal rates. The findings revealed the regulatory impact of coffee mucilage on the non-volatile compound profiles in coffee beans, providing a theoretical foundation for optimizing coffee flavor attributes through fermentation control strategies.

Key words: widely targeted metabolomics; honey processing method; Yunnan Arabica coffee; non-volatile compounds

咖啡因其独特的风味而备受消费者欢迎，与茶、可可并列为世界三大饮料。在中国，云南省是最大的咖啡产区，其种植面积、产量和产值均占据全国的 98% 以上，具有独一无二的产业发展优势[1]。2022 年，中国咖啡消费量 28.80 万吨，同比增长 14.29%，为全球增速的 31.07 倍[2]。随着国内咖啡热潮的兴起，消费者对咖啡风味质量的要求也不断增加。因此，为满足日益成熟的消费者需求，通过品种[3−4]、栽培管理[5]、初加工方式[6−7] 等因素改善咖啡豆的风味质量成为了咖啡生产上的重大挑战。

咖啡风味质量的关键因素之一是通过不同初加工方法获得用于烘焙的咖啡生豆[8]。据报道，咖啡生豆的成分非常复杂，包含 1000 多种具有不同化学性质的化合物[9]，例如，碳水化合物、脂质、含氮化合物（生物碱、氨基酸）等是咖啡生豆中重要的风味前体物质[10]。这些物质在烘焙过程中通过美拉德反应、焦糖化反应、脱水反应、脱碳反应等化学过程分解形成烘焙豆中重要的风味活性物质，为咖啡带来果酸、苦涩、甜感等特征风味[11]。此外，咖啡生豆中还含有许多生物活性物质，例如绿原酸、咖啡因、葫芦巴碱、萜类化合物等。这些物质不仅与人体健康密切相关，还具有一定的风味贡献[12]。蜜处理加工方法是一种新型初加工技术，能同时表现出水洗咖啡和日晒咖啡的风味特性。在这一工艺中，咖啡经过脱皮后保留果胶，并在发酵过程中被自然干燥[13]。果胶在发酵过程中形成的风味前体物质可能会渗入咖啡生豆中，改变其物质组成和风味特性。Aswathi 等[14] 研究表明，蜜处理加工方法会增加中粒咖啡中碳水化合物、有机酸和次生代谢物的含量。Zhai 等[15] 研究表明，蜜处理加工方法能增强小粒咖啡烘焙豆中焦糖、烘焙和黄油的风味。随着咖啡工业的不断发展，蜜处理加工方法根据脱胶量的不同已衍生出白蜜、黄蜜、红蜜、黑蜜等精品微批次处理法。这些处理法通过控制果胶发酵过程，提升产品质量，增加经济价值。然而，这些精品微批次的初加工方法引起的咖啡风味及活性物质的差异是未知的，有待进一步研究。

基于超高效液相-电喷雾-三重四极杆线性离子阱-串级质谱（ultra performance liquid chromatography-electrospray ionization-quadrupole-linear ion trap-tandem mass spectrometry，UPLC-ESI-Q TRAP-MS/MS）的广泛靶向代谢组学具有高通量、高灵敏度、高覆盖度的技术优势，已被广泛用于食品科学领域的化合物定性、定量、鉴定、分类等方面[16]。目前，利用代谢组进行咖啡初加工研究的报道越来越多，例如，不同初加工方法造成的风味差异[9]，或使用酵母或真菌进行咖啡豆发酵[17]。然而，对于单一初加工方法的发酵控制却鲜见报道。本研究以 5 种不同脱胶率的咖啡生豆为研究对象，采用代谢组学方法全面分析不同蜜处理加工方法对咖啡生豆中非挥发性物质的影响，挖掘其特征成分及代谢通路，以期阐明主要差异代谢物的风味特性。研究结果有助于进一步理解咖啡果胶发酵过程中的质量控制，并为进一步提升咖啡风味特征提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

供试品种为小粒咖啡（*Coffea arabica* L.）栽培品种卡蒂姆（Catimor） 2023 年 3 月采集于中国云南省保山市潞江镇新寨村（25°1'35"N，98°49'51"E，海拔 1200 m）；HPLC 级溶剂（甲醇、乙腈、乙醇、甲酸） 美国 Merck 集团；标准品（HPLC 级溶剂） 美国 Sigma-Aldrich 集团。

AFJG-2000 咖啡脱皮机 云南澳福实业有限公司；AM-CF800 咖啡脱胶机 武汉艾克美农业科技有限公司；DRC-1X 咖啡脱壳机 巴西 Pinhalense 公司；Forma995 型超低温冰箱 美国 Thermo Fisher Scientific 公司；Scientz-100F 冷冻干燥机 宁波新芝冻干设备有限公司；MM400 研磨仪 德国 Retsch 公司；MS105DM 电子天平 瑞士 METTLER TOLEDO 集团；5424R 离心机 德国 Eppendorf 公司；ExionLC™ AD 超高效液相色谱、Applied

Biosystems 4500 Q TRAP 串联质谱　美国 SCIEX 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　蜜处理加工工艺　预处理：将收集的咖啡鲜果仔细分类，剔除未成熟、过熟和有缺陷的鲜果，获得颜色一致、大小均匀的鲜果作为待测样品。为确定单次脱胶量，使用脱皮机将咖啡鲜果去皮，将得到的咖啡豆进行称重（认为此时未脱胶），重量记为 W_1。然后，使用脱胶机将咖啡豆完全机械脱胶后称重（认为此时果胶已完全去除），重量记为 W_2。单次脱胶量的计算公式如下：

$$单次脱胶量 = (W_1 - W_2) \times R$$

式中，R 为单次脱胶率（%），通过调节机械脱胶机的松紧度控制在 20%~25% 之间（目前生产上常用的咖啡脱胶机精度有限，只能达到范围值）。

样品制备：将样品分成 5 份，每份重 10 kg，分别用于 5 种不同脱胶量的五种处理。根据预实验得到的单次脱胶量，按照脱胶次数的增加来达到不同处理的脱胶量，并通过称重进行验证。脱胶后将咖啡豆静置 40 min，然后戴上无菌手套手动搅拌，确保果胶均匀分布在每颗咖啡豆上。随后，将咖啡豆置于晾晒架上自然干燥（无雨水环境），直至水分含量达到 11.0± 1.0 g/DW 后结束干燥过程（一般来说，脱胶率越低的处理，需要更长的干燥时间）。最后，使用脱壳机去除外壳，获得咖啡生豆，以便进一步分析。

根据脱胶量的差异区分五种处理：CH，水洗法完全去除果胶，即水洗处理；WH，脱胶 3 次，脱胶率约为 80%，即白蜜处理；YH，脱胶两次，脱胶率为 40%~50%，即黄蜜处理；RH，脱胶 1 次，脱胶率为 20%~25%，即红蜜处理；BH，不脱胶，即黑蜜处理，这也是咖啡生产上传统的蜜处理方法。所有样品设置 3 个生物学重复，将 CH、WH、YH、RH、BH 共 5 组样品进行广泛靶向代谢组检测。

1.2.2　样品预处理　取出样品置于冷冻干燥机中真空冷冻干燥，随后使用研磨仪研磨（30 Hz，90 s）至粉末状。称取 50 mg 样本粉末，加入 1200 μL 预冷的 70% 甲醇水内标溶液（−20 ℃，2-氯苯丙氨酸，1 PPM）后涡旋（每 30 min 涡旋 1 次，每次持续 30 s，持续 6 次）和离心（12000 r/min，3 min），吸取上清液后使用微孔滤膜（0.22 μm）过滤样品，保存于进样瓶中，用于 UPLC-MS/MS 分析。

1.2.3　UPLC 条件　色谱柱：Agilent SB-C_{18} 1.8 μm，2.1 mm×100 mm；流动相：A 相为超纯水（加入 0.1% 的甲酸），B 相为乙腈（加入 0.1% 的甲酸）；洗脱梯度：0.00 min 时 B 相比例为 5%，9.00 min 内 B 相比例线性增加到 95% 并维持 1 min，10.00~11.10 min 时 B 相比例降为 5% 并维持至 14 min；流速、柱温和进样量分别设定为 0.35 mL/min、40 ℃ 和 2 μL。

1.2.4　ESI-Q TRAP-MS/MS 条件　电喷雾离子源（ESI）设置为：温度 550 ℃；离子喷雾电压（IS）为 5500 V（正离子模式）/−4500 V（负离子模式）；离子源气体（GS Ⅰ）为 50 psi；气体Ⅱ（GS Ⅱ）为 60 psi；气帘气（CUR）为 25 psi，碰撞诱导电离参数设置为高。三重四极杆（QQQ）扫描使用多反应监测（MRM）模式，碰撞气体（氮气）设置为中等，根据优化的去簇电压（DP）和碰撞能（CE）扫描检测各个 MRM 离子对。

1.3　数据处理

基于迈维代谢自建数据库（metware database）对二级谱信息进行物质定性并去除同位素信号与重复信号。利用三重四极杆质谱（QQQ TRAP-MS/MS）的多反应监测（MRM）模式进行代谢物定量。获得不同处理的代谢物质谱分析数据后，对所有物质色谱峰进行峰面积积分，并对同一代谢物在不同样本中的质谱出峰进行积分校正。

使用主成分分析（principal component analysis，PCA）和层次聚类分析（hierarchical clustering analysis，HCA）评估样本质量与重现性。通过正交偏最小二乘法判别分析（orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）确定两组间数据的分离性，并获得 VIP 值（variable importance in projection）。将 VIP>1，$\log_2|FC|>1$ 和 $P<0.05$ 作为筛选条件区分差异代谢物（differential metabolites，DMs）。使用 STEM（版本 1.3.11）进行代谢物趋势分析（trend analysis）。基于 KEGG 数据库（http://www.kegg.jp）注释差异代谢物，获得显著变化的代谢通路。

使用 Excel 2019 软件进行数据整理和分析。利用 Metware Cloud 云平台（https://cloud.metware.cn/）和 Prism Graphpad 软件（版本 8.0.2）进行图表制作。通过 Adobe Illustrator 2019 软件进行图形布局排版。

2　结果与分析

2.1　非挥发性代谢物轮廓分析

通过对五种蜜处理加工方法获得的咖啡生豆进行广泛靶向代谢组分析，共鉴定到 1682 个代谢物，包括 366 种氨基酸及其衍生物（21.76%）、254 种酚酸（15.10%）、212 种其它类（12.60%，包括 82 种糖和 19 种维生素等）、184 种脂质（10.94%）、159 种生物碱（9.45%）、118 种黄酮（7.02%）、109 种有机酸（6.48%）、106 种萜类（6.30%）等（图 1a）。其中，许多代谢物是烘焙过程中产生的挥发性化合物的风味前体物质，也是咖啡中具有重要营养价值和保健功能的次生代谢物[18]。

通过主成分分析（PCA）研究五种处理的非挥发性代谢物轮廓差异。如图 1b 所示，PCA 分数图显示了组内 3 个重复的聚集，并通过 PC1（23.33%）和 PC2（14.09%）进行区分。根据图中结果，CH、WH、YH 三个处理组间分离度不明显，其二维分布均位于 PC1 左侧。RH 与 BH 的二维分布则位于 PC1 右侧，与其余三个处理间存在明显的分离。而 RH 与 BH 间主要通过 PC2 分离，其置信区间存在一定的交

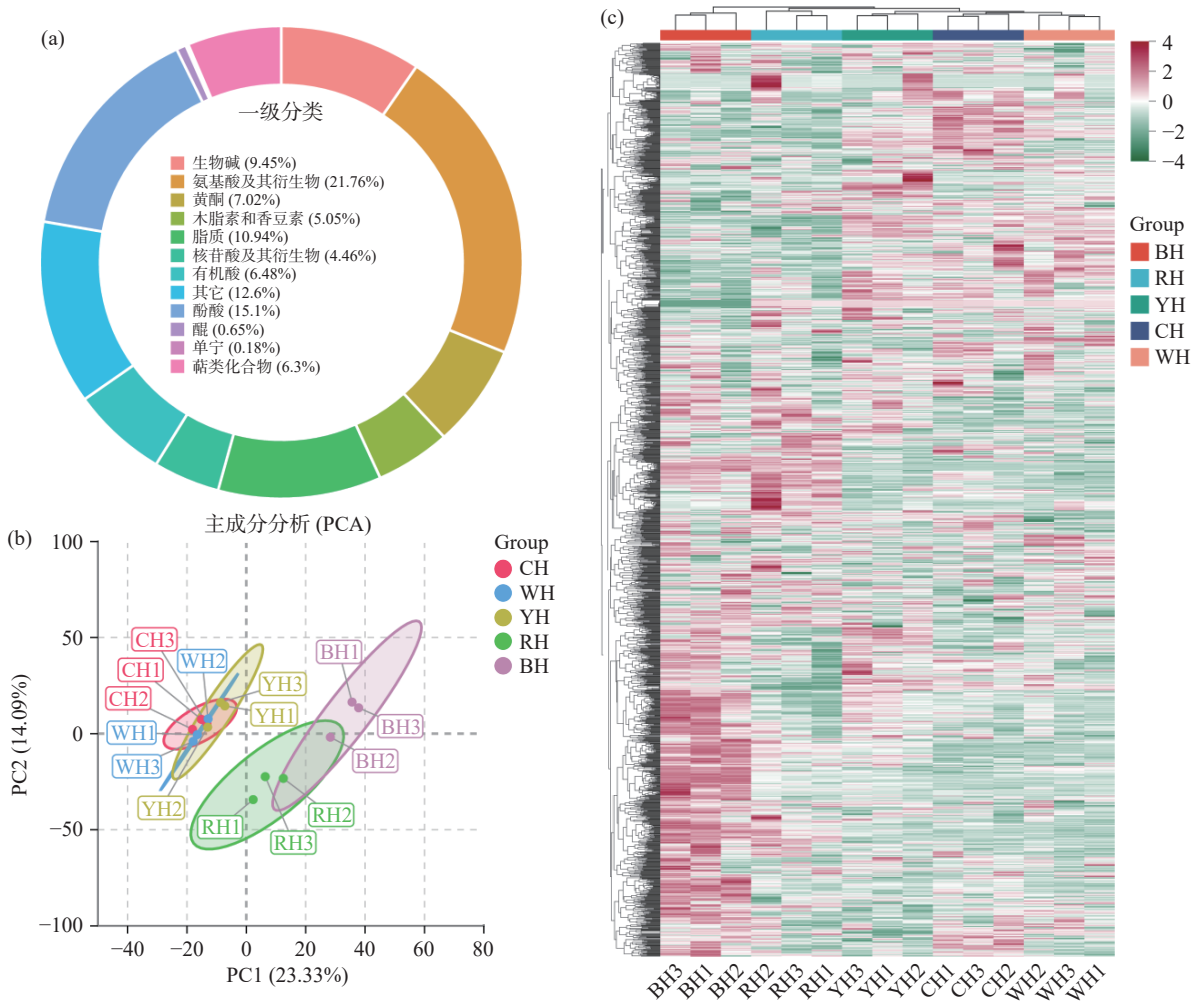


图 1　不同蜜处理加工方法的咖啡生豆代谢物特征分析

Fig.1　Characterization of metabolites in green coffee beans with different honey processing methods

注: (a)代谢物一级分类饼图; (b)主成分分析图; (c)层次聚类热图。

集。层次聚类分析(HCA)显示(图 1c), 组内重复性高证实了代谢组数据的可靠性(重现性良好), 而不同处理样品间明显分离表明蜜处理加工方法明显改变了代谢物轮廓组成。正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)是一种有监督的多元统计方法, 适用于分离判别并放大两组代谢数据间的类别差异并最大程度地去除与类别分离无关的信息[19]。通过交叉验证确定最佳的正交组分数(R^2X、R^2Y、Q^2Y), 可以确保模型的预测性能。其中, R^2X 和 R^2Y 分别表示模型中 X 和 Y 矩阵的解释率, Q^2Y 表示模型的预测能力。其中, R^2Y 和 Q^2Y 越接近 1, 模型越稳定。结果表明, CH vs. WH(图 2a)、CH vs. YH(图 2b)、CH vs. RH(图 2c)、CH vs. BH(图 2d)这 4 个不同脱胶量的对比组中, R^2Y 分别为 0.996、1、1、1, Q^2Y 分别为 0.730、0.858、0.928、0.961。总的来说, R^2Y 均超过了 0.99, 而 Q^2Y 在 0.73~0.961 之间, 具有良好的数据分离度与模型可靠性。此外, 通过 OPLS-DA 模型得出的 VIP 值可用于筛选差异代谢物。

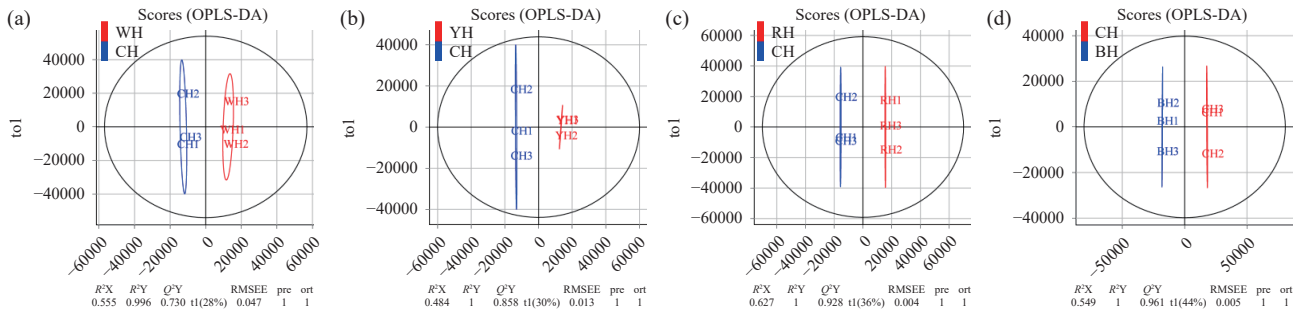


图 2　正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)

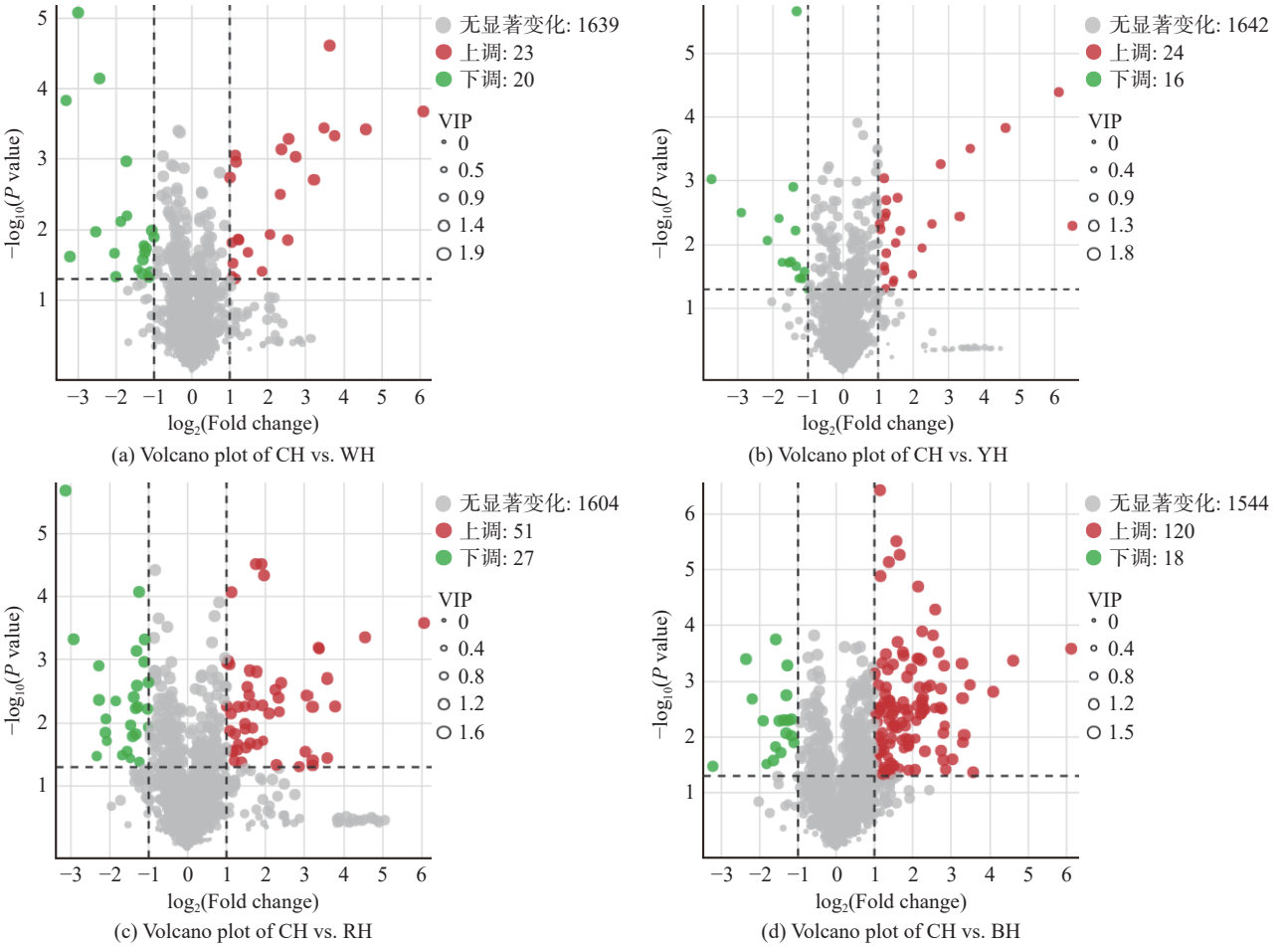
Fig.2　Orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA)

注: (a)CH vs. WH; (b)CH vs. YH; (c)CH vs. RH; (d)CH vs. BH。

2.2　差异代谢物的鉴定

为明确不同蜜处理加工方法的咖啡生豆中代谢物的显著差异，根据 VIP>1，P<0.05 和 $\log_2|FC|>1$ 的筛选条件鉴定差异代谢物。结果显示，在 CH vs. WH 组中(图 3a)鉴定出 43 种差异代谢物(23 种上调代谢物和 20 种下调代谢物)，包括 20 种氨基酸及其衍生物、10 种酚酸和 4 种有机酸等(表 1)。在 CH vs. YH 中(图 3b)，共鉴定出 40 种差异代谢物(24 种上调代谢物和 16 种下调代谢物)，包括 22 种氨基酸及其衍生物、5 种酚酸和 3 种糖等(表 1)。在这两个对比组中，$\log_2|FC|>3$ 的差异代谢物均为氨基酸及其衍生物，分别有 8 种和 6 种。在 CH vs. RH 组中(图 3c)，共鉴定出 78 种差异代谢物，包括 51 种上调代谢物和 27 种下调代谢物。其中，氨基酸及其衍生物最多(38 种)，其次为酚酸(8 种)、萜类化合物(7 种)、生物碱(7 种)、有机酸(5 种)等(表 1)。有 13 种代谢物的 $\log_2|FC|>3$，包括 8 种氨基酸及其衍生物、4 种三萜和 1 种生物碱。在 CH vs. BH 组中(图 3d)，鉴定到 138 种差异代谢物(120 种上调代谢物和 18 种下调代谢物)，主要包括氨基酸及其衍生物(58 种)、有机酸(17 种)、酚酸(14 种)、糖(14 种)等(表 1)。大量有机酸以及糖类物质表现出显著的差异。这些物质已被证明在咖啡风味质量中有重要的贡献，能为咖啡提供酸味、甜味和果味[20]。火山图显示了不同蜜处理方法中非挥发性化合物的总体差异，差异代谢物的数量随脱胶率的降低而逐渐增加。结合 PCA 分析，结果表明在脱胶率较低时，脱胶的差异会更显著地影响咖啡豆中的非挥发性化合物。因此，在咖啡生产中，进行黄蜜、红蜜或黑蜜处理时有必要更严格地控制果胶发酵，这或许有助于保持精品咖啡产品的一致性。

总的来说，在 4 个不同脱胶量对比组中的生豆样品中共鉴定到 192 种差异代谢物，包括 76 种氨基酸及其衍生物、23 种酚酸、20 种有机酸、17 种糖、12 种生物碱、8 种黄酮、8 种萜类化合物、7 种核苷酸及其衍生物、6 种脂质、4 种木脂素和香豆素和 11 种其它物质(表 1)。韦恩图显示了不同对比组中各种差异代谢物的交叉与分离(图 4a)。其中，鉴定到苏氨酰-异亮氨酰-谷氨酰胺、L-亮氨酰-L-天冬氨酰-L-谷氨酰胺、谷氨酸-异亮氨酸-亮氨酸、咖啡酸乙酯、3,4-二甲氧基肉桂酸、洋川芎内酯 K 共 6 种代谢物在不同蜜处理与对照间均表现出显著的差异，这或许可以作为区分蜜处理与水洗处理的潜在生物标志物。峰面积图显示(图 4b)，随着脱胶率的降低，非挥



(a) Volcano plot of CH vs. WH　(b) Volcano plot of CH vs. YH

(c) Volcano plot of CH vs. RH　(d) Volcano plot of CH vs. BH

图 3　不同蜜处理加工方法的差异代谢物的火山图

Fig.3　Volcano plot of differential metabolites for different honey processing methods

注：(a)CH vs. WH；(b)CH vs. YH；(c)CH vs. RH；(d)CH vs. BH。

表 1　不同对比组中差异代谢物的分类

Table 1　Classification of differential metabolites in different comparison groups

一级分类物质	CH vs. WH	CH vs. YH	CH vs. RH	CH vs. BH	所有差异代谢物
氨基酸及其衍生物	20	22	38	58	76
酚酸	10	5	8	14	23
有机酸	4	0	5	17	20
糖	0	3	4	14	17
生物碱	2	2	7	6	12
黄酮	0	2	2	4	8
萜类化合物	1	1	7	6	8
核苷酸及其衍生物	3	1	3	3	7
脂质	0	1	1	4	6
木脂素和香豆素	0	1	1	2	4
其它	3	2	2	10	11
总计	43	40	78	138	192

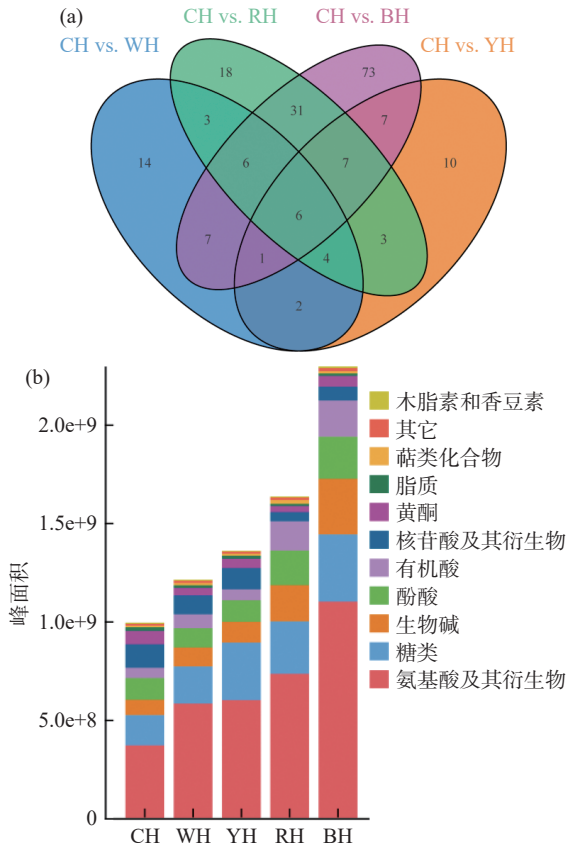


图 4　不同蜜处理加工方法的差异代谢物的代谢特征

Fig.4　Metabolic characterization of differential metabolites for different honey processing methods

注: (a)韦恩图; (b)峰面积图。

发性化合物主要呈上调趋势, 代谢物丰度逐渐增加。其中, 氨基酸及其衍生物是最主要的差异代谢物, 其次是以糖类、有机酸为主的初生代谢物以及酚酸为主的次生代谢物。

2.3　差异代谢物的类别分析

2.3.1　氨基酸及其衍生物　在不同蜜处理加工方法中, 氨基酸及其衍生物是观察到的最丰富的差异非挥发性化合物。氨基酸类化合物在咖啡烘焙中扮演了重要的角色, 是美拉德反应中产生吡啶、吡咯等芳香化合物的重要前体物质[21]。这些芳香化合物与坚果、巧克力等风味以及丝滑的口感密切相关[22]。本研究鉴定的差异氨基酸及其衍生物主要包括支链氨基酸和芳香氨基酸, 这些氨基酸衍生物大多在蜜处理样品中上调表达(图 5a)。例如, 组氨酸-脯氨酸-丙氨酸、甘氨酸-亮氨酸-苯丙氨酸、谷氨酸-缬氨酸-异亮氨酸、L-组氨酸-L-缬氨酸-L-缬氨酸和 L-异亮氨酸-L-脯氨酸-L-异亮氨酸在 WH 中明显高于其他处理。相比 CH 和 BH 组, 甘氨酸-甘氨酸-亮氨酸、L-异亮氨酸-L-脯氨酸-L-精氨酸和 L-丙氨酰-L-异亮氨酰-L-苯丙氨酸在 YH 处理中表现出增加的趋势。这是由于在发酵过程中, 一些多肽会在发酵时间久的处理中被分解为更小的肽或氨基酸, 从而提高蛋白质的利用率, 并影响咖啡风味。N-乙酰-L-酪氨酸、N-乙酰-L-谷氨酸、N-乙酰-L-蛋氨酸、N-乙酰基-DL-苯丙氨酸和 N-乙酰基-DL-蛋氨酸五种乙酰化氨基酸衍生物在 RH 和 BH 中至少增加了 3 倍。研究表明, N-乙酰氨基酸是普洱茶发酵过程中的关键上调代谢物, 并具有潜在的神经保护活性[23]。因此, 在本研究中 N-乙酰氨基酸或许可以作为区分果胶量差异的关键代谢物, 并且可能增加蜜处理咖啡豆的生物活性。此外, 有 36 种氨基酸及其衍生物在 BH 组中明显高于其余处理, 与 Priyadi 等[24] 的研究结果类似。其中, N-(1-脱氧-1-果糖基)丙氨酸、N-(1-脱氧-1-果糖基)苯丙氨酸、N-(1-脱氧-1-木糖基)缬氨酸、N-(1-脱氧-1-果糖基)亮氨酸、N-(1-脱氧-1-果糖基)天冬酰胺可能会增强美拉德反应, 通过与糖类物质发生一系列反应并脱水分解产生吡嗪等挥发性化合物[25−26]。据报道, 蜜处理加工方法相比传统水洗处理具有更高的谷氨酸含量[27]。一般来说, 发酵过程会增加咖啡豆中氨基酸及其衍生物的含量, 这可能是由于微生物发酵分解蛋白质引起的。例如, 通过 *Rhizopus oligosporus* 发酵处理后的咖啡生豆中天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、脯氨酸、苯丙氨酸的浓度会显著高于未发酵的咖啡豆[28]。

2.3.2　酚酸　酚酸是咖啡中重要的生物活性化合物, 被报道为对人体健康有益的抗氧化剂[29]。在本研究中, 在不同脱胶量的蜜处理加工方法间共检测到 23 种酚酸类化合物(图 5b)。与 CH 组相比, WH 组中发现了 10 种差异表达的酚酸类化合物。其中, 对香豆酸乙酯、咖啡酸苯乙酯和 4-羟基苯甲酸乙酯的代谢丰度分别上调了 6.69、5.05 和 4.18 倍, 这些化合物在脱胶率较高的蜜处理方法中(WH、YH)丰度较高。然而, 对于大部分检出的酚类差异代谢物来说, 均在脱胶率低的处理中(RH、BH)具有较高的代

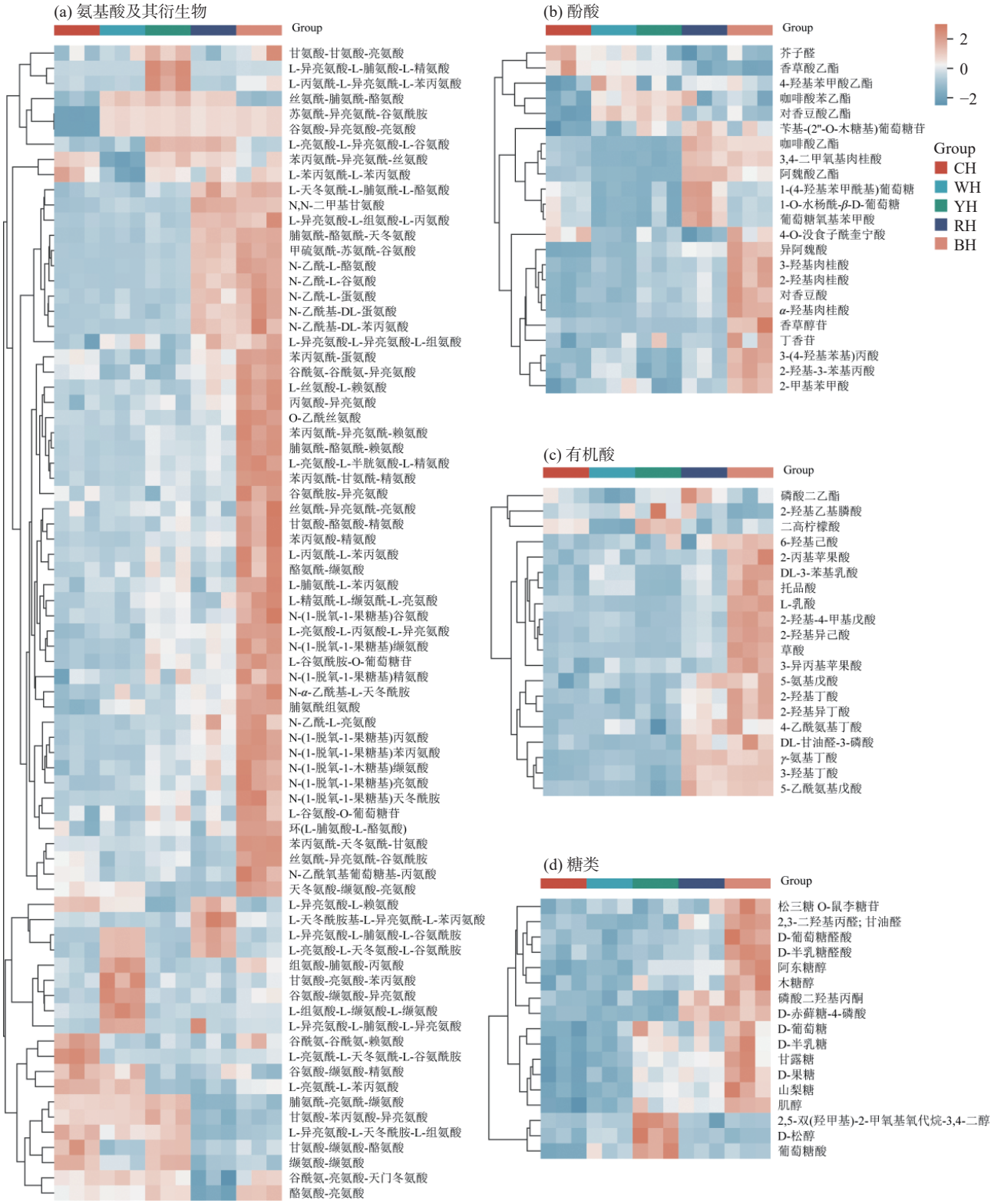


图 5　差异代谢物的聚类热图

Fig.5　Clustering heatmap of differential metabolites

注：(a)氨基酸及其衍生物；(b)酚酸；(c)有机酸；(d)糖类。

谢丰度。例如，在 RH 和 BH 组中检出的咖啡酸乙酯、3,4-二甲氧基肉桂酸、阿魏酸乙酯的代谢丰度均为 CH 组的 2.5~3.5 倍。此外，4-O-没食子酰奎宁酸、异阿魏酸、3-羟基肉桂酸、2-羟基肉桂酸、对香豆酸、α-羟基肉桂酸、香草醇苷、丁香苷、3-(4-羟基苯基)丙酸、2-羟基-3-苯基丙酸、2-甲基苯甲酸这 11 种酚酸类化合物在 BH 组中的相对丰度高于其它处理。这些结果表明，果胶发酵能促进酚类物质的合成，从而增加咖啡制品的生物活性。在另一项研究中，低脱胶率的咖啡生豆主要受真菌(主要包括酵母菌和丝状真菌)的影响[30]。有研究表明，这或许是在干燥过程中真菌通过分泌 β-葡萄糖苷酶促进酚酸的

转化与合成[9]。然而，对于咖啡来说，需要更多的研究来评估这些酚酸类化合物对咖啡风味质量的影响。此外，在不同脱胶量的蜜处理方法中均检出了高水平的绿原酸、咖啡酸等咖啡中重要的酚类化合物。然而这些化合物在各处理中均保持稳定，表明果胶的去除与否并不会对这些咖啡中典型的活性化合物产生影响。

2.3.3 有机酸 通常来说，酸含量会随着发酵过程而增加，这是由乳酸菌通过乳酸发酵导致的[31]。本研究结果表明，不同脱胶率的蜜处理加工方法中有机酸含量具有较大差异（图 5c）。这一现象的原因是微生物会分解果胶中的碳水化合物从而释放出大量的有机酸（碳水化合物代谢中重要的中间体化合物）以及糖类[32−33]。因此，低脱胶率的咖啡豆可能会产生更多的碳代谢产物。在检出的所有 20 种差异表达的有机酸中，CH vs. BH 组中鉴定到了 17 种，16 种为上调表达（表 1）。其中，草酸、L-乳酸、DL-3-苯基乳酸的差异倍数最高，分别达到了 9.68、5.79、4.77 倍。这些有机酸化合物可作为风味前体物质随果胶迁移到种子中，赋予咖啡烘焙豆额外的风味[17]。研究表明，乳酸会显著增加咖啡制品的果酸味，例如“乳酸”“柠檬酸”等风味，这有利于提升咖啡的杯测质量，从而获得更高的杯测分值[34]；而草酸被认为与“苦涩”的风味呈正相关[12]，这可能会给精品咖啡的风味品质带来影响。此外，在各比较组中均鉴定到了 γ-氨基丁酸。γ-氨基丁酸是一种植物中天然存在并具有多种生理功能的生物活性化合物，对人体具有多种健康功效，特别是作为中枢神经系统中的主要抑制性神经递质[35]。研究表明，γ-氨基丁酸与逆境胁迫密切相关，咖啡生豆的自然干燥过程可能会导致其显著积累[36]。

2.3.4 糖类 如前所述，咖啡果胶中含有大量的碳水化合物。咖啡内源微生物（主要包括乳酸菌等）通过释放有机酸、降低酸度加速果胶降解，这有助于降低黏性并增加单糖，为咖啡增加甜味和果酸味[14]。在本研究中，共有 17 种糖类物质在不同处理组间差异表达，其变化趋势与有机酸类似，主要在 BH 组中被检出（14 种）。这些糖类物质主要包括 D-葡萄糖、山梨糖、D-果糖、甘露糖、D-半乳糖、D-葡萄糖醛酸、D-半乳糖醛酸等，与 CH 组相比，分别增加了 2.19、2.13、2.70、2.68、2.40、2.90 以及 2.85 倍（表 1，图 5d）。这些重要的糖类物质属于果胶成分的一部分，可以通过酶促反应降解，并对咖啡的香气以及杯测质量产生积极影响[37]。在烘焙过程中，糖类物质的热降解是形成焦糖化产物的主要原因。同样地，还原糖还与氨基酸通过美拉德反应相互作用，形成吡嗪和吡啶等重要的咖啡芳香族化合物，从而影响咖啡饮料的烘焙香气和坚果感官特性[38]。此前的研究已有报道，不同类型的咖啡加工方法会导致咖啡生豆中的糖含量表现出显著差异。例如，相比水洗处理法以及日晒处理法，蜜处理加工法会保留更高的蔗糖以及其余单糖含量[39]。然而，本研究发现，高糖含量似乎仅在常规的蜜处理法（BH 组）中表现出来。在不同脱胶量的其余处理中，均与完全脱胶的 CH 组无明显差异。

2.4 差异代谢物的变化规律分析

将对照（CH）、白蜜（WH）、黄蜜（YH）、红蜜（RH）、黑蜜（BH）共五个不同脱胶率处理的咖啡生豆进行代谢物变化规律分析。选择所有检出的 192 个差异代谢物进行趋势分析，共获得 10 个趋势谱。根据代谢物趋势分析的显著性检验（$P<0.05$），仅获得 1 个目标趋势谱（profile9），随着脱胶率的降低而不断上调（图 6a）。目标趋势谱（profile9）中包含 93 种代谢物。其中，氨基酸及其衍生物数量最多（39 种），其次为糖类（14 种）、有机酸（13 种）、酚酸（10 种）、生物碱（6 种）等。

随后，将 profile9 中包含的 93 种代谢物进行 KEGG 通路富集分析。前 20 条富集的 KEGG 通路如图 6b 所示，显著富集（$P<0.05$）的通路有 7 条，分别为肌醇磷酸代谢、戊糖和葡萄糖醛酸的相互转化、半乳糖代谢、氨基糖和核苷酸糖代谢、链霉素的生物合成、吲哚生物碱生物合成以及碳水化合物消化吸收。其中，肌醇磷酸代谢、戊糖和葡萄糖醛酸的相互转化、半乳糖代谢以及氨基糖和核苷酸糖代谢均属于碳水化合物代谢（Carbohydrate metabolism）。这些途径中包含了许多显著变化的糖类物质，例如，磷酸二羟基丙酮、D-半乳糖醛酸、D-葡萄糖醛酸、阿东糖醇、甘露糖、肌醇、木糖醇、D-半乳糖、D-葡萄糖。随着脱胶率的降低，这些糖类物质持续上调积累，在咖啡豆的自然发酵过程中参与碳水化合物代谢。未处理的咖啡果胶具有高度的甲酯化，包含约 60% 的半乳糖醛酸，这些物质必须在发酵过程中被降解[40]。通过自然发酵处理（包括日晒处理、蜜处理）后的咖啡豆，往往具有更强烈的甜感，这与糖类物质积累密切相关。代谢物引起的风味变化与微生物活动联系紧密，例如咖啡果胶中的糖类物质会通过酵母菌发酵产生挥发性化合物，这有利于咖啡的香气属性[34]。这在另一项研究中已被观察到，酵母在自然发酵后期会提升咖啡的醇香、花香和坚果等香气[30]。链霉素的生物合成以及吲哚生物碱生物合成均属于次生代谢物的生物合成（Biosynthesis of other secondary metabolites）。在本研究中，这主要与色胺的生物合成相关，色氨酸通过色氨酸脱羧酶转化为色胺，并参与吲哚生物碱的生物合成。色胺对人体健康具有许多有益作用，包括抗氧化、在人体内转化为血清素以改善睡眠质量以及维护肠道健康等[41]。此外，在前 20 条富集的通路中，还鉴定到许多与微生物活动相关的途径，例如碳水化合物消化吸收、群体感应、微生物在不同环境中的新陈代谢、减数分裂-酵母等。这表明微生物对不同脱胶率下的咖啡发酵过程中的代谢物积累具有重要作用。

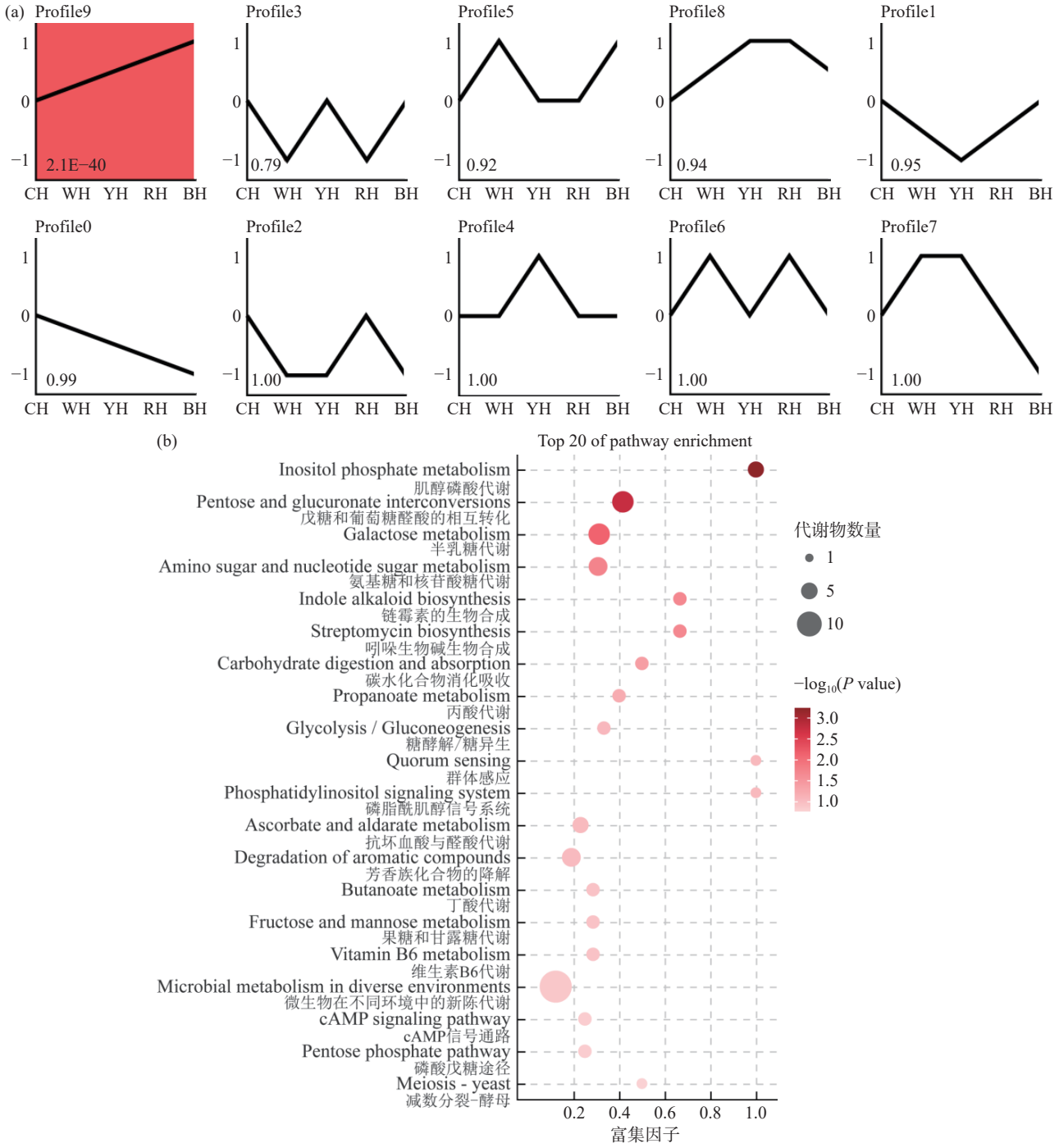


图 6　差异代谢物的变化规律分析

Fig.6　Analysis of variation pattern in differential metabolites

注：(a)差异代谢物趋势分析；(b)目标趋势谱的 KEGG 分析。

为了在不同脱胶率的蜜处理方法中鉴定关键的非挥发性化合物，本研究针对 CH、WH、YH、RH、BH 共 5 个处理组建立了最小二乘判别分析(partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA)模型以确定各代谢物的 VIP 得分。高 VIP 得分代表各组间非挥发性化合物的差异越显著，并且更有利于用于组别间的分类。如表 2 所示，本研究选取了目标趋势谱中 VIP 得分最高的 10 种代谢物，分别为 N-乙酰-L-酪氨酸、N-乙酰基-DL-苯丙氨酸、1-[2-(呋喃-2-基)-2-氧代乙基] 哌啶-2-one、L-亮氨酸-L-半胱氨酸-L-精氨酸、D-赤藓糖-4-磷酸、甲硫氨酰-苏氨酰-谷氨酸、L-精氨酰-L-缬氨酰-L-亮氨酸、N-乙酰-L-谷氨酸、N-乙酰-L-亮氨酸和 N-(1-脱氧-1-果糖基)天冬酰胺。这些代谢物随着脱胶率的降低而持续上调，并且可作为区分使用不同果胶量制备咖啡豆的蜜处理方法的潜在标志性化合物。在这 10 种代谢物中，包括了 8 种氨基酸及其衍生物、1 种生物碱和 1 种糖类。其中，包含了 N-乙酰-L-酪氨酸、N-乙酰基-DL-苯丙氨酸、N-乙酰-L-谷氨酸、N-乙酰-L-亮氨酸共 4 种 N-乙酰氨基酸。如前所述，N-乙酰氨基酸是具有潜在的神经保护活性的生物活性化合物，这可能会增加蜜处理加工后咖啡豆的生物活性[42]。根据 PLS-

表 2 目标趋势谱中 VIP 值最高的 10 个代谢物

Table 2 Top 10 metabolites with the highest VIP score in the target trend profile

编号	物质	物质一级分类	离子模式	VIP得分
mws0520	N-乙酰-L-酪氨酸	氨基酸及其衍生物	$[M+H]^+$	2.94
MWSslk120	N-乙酰基-DL-苯丙氨酸	氨基酸及其衍生物	$[M+H]^+$	2.84
Yamp002343	1-[2-(呋喃-2-基)-2-氧代乙基]哌啶-2-one	生物碱	$[M+H]^+$	2.75
MW0107715	L-亮氨酸-L-半胱氨酸-L-精氨酸	氨基酸及其衍生物	$[M+H]^+$	2.56
Zmzn000079	D-赤藓糖-4-磷酸	糖类	$[M-H]^-$	2.52
MW0153675	甲硫氨酰-苏氨酰-谷氨酸	氨基酸及其衍生物	$[M+H]^+$	2.51
MW0105683	L-精氨酰-L-缬氨酰-L-亮氨酸	氨基酸及其衍生物	$[M+H]^+$	2.46
pme0075	N-乙酰-L-谷氨酸	氨基酸及其衍生物	$[M-H]^-$	2.46
pme0253	N-乙酰-L-亮氨酸	氨基酸及其衍生物	$[M+H]^+$	2.43
Wayn000341	N-(1-脱氧-1-果糖基)天冬酰胺	氨基酸及其衍生物	$[M-H]^-$	2.42

DA 模型得出的 VIP 得分，N-乙酰氨基酸也可作为区分不同果胶量制备咖啡豆的蜜处理方法的潜在标志性化合物。

3 结论

本研究采用基于 UPLC-MS/MS 的广泛靶向代谢组学技术分析 5 种不同脱胶率的蜜处理方法的代谢物组成差异，共获得 192 种差异非挥发性化合物。其中包括了 76 种氨基酸及其衍生物、23 种酚酸、20 种有机酸、17 种糖、12 种生物碱、8 种黄酮、8 种萜类化合物、7 种核苷酸及其衍生物、6 种脂质、4 种木脂素和香豆素和 11 种其它物质。在 RH 以及 BH 处理中，脱胶率差异会更显著地影响咖啡豆中的非挥发性化合物。在不同对比组中，氨基酸及其衍生物的差异代谢物数量均为最多，且随着脱胶率的降低而逐渐增加，其次是以糖类、有机酸为主的初生代谢物以及以酚酸为主的次生代谢物。热图显示，这些非挥发性化合物在脱胶率较低的蜜处理方法中会保持更高的丰度。通过烘焙过程中的一系列反应，这些化合物可能给咖啡豆带来更加丰富的“醇香”“果酸”“甜感”等风味特征以增加咖啡豆的附加价值。此外，趋势分析鉴定到 93 种代谢物随着脱胶率降低而持续上调。这些代谢物主要参与了磷酸肌醇代谢、戊糖与葡萄糖酸的相互转化、半乳糖代谢、氨基糖和核苷酸糖代谢、链霉素的生物合成、吲哚生物碱生物合成等与咖啡豆的风味物质合成以及生物活性密切相关的代谢通路。根据最小二乘判别分析模型，确定了以 N-乙酰氨基酸为主的 10 种潜在标志性化合物以区分不同果胶量的蜜处理方法。以此提出，保留不同的果胶量的蜜处理方法会显著影响咖啡生豆的非挥发性代谢物，且在脱胶率低时更加明显。研究结果为进一步理解咖啡果胶对代谢物的影响提供了理论依据，可为今后咖啡豆的发酵控制以及风味改善等方面提供一定的参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 黄家雄, 李维锐, 夏兵, 等. 云南咖啡产业高质量发展对策初探[J]. 热带农业科技, 2022, 45(3): 21−29. [HUANG Jiaxiong, LI Weirui, XIA Bing, et al. Strategies on how to promote the development of coffee industry with high quality in Yunnan Province[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2022, 45(3): 21−29.]

[2] 黄家雄, 吕玉兰, 李维锐, 等. 中国咖啡产业发展报告(2022)[J]. 热带农业科技, 2023, 46(4): 1−5. [HUANG Jiaxiong, LÜ Yulan, LI Weirui, et al. Report on China coffee industry in 2022[J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2023, 46(4): 1−5.]

[3] HALL R D, TREVISAN F, de VOS R C H. Coffee berry and green bean chemistry–Opportunities for improving cup quality and crop circularity[J]. Food Research International, 2022, 151: 110825.

[4] 王曦奥, 廖振阳, 闫林, 等. 咖啡遗传育种研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(10): 1874−1884. [WANG Xi'ao, LIAO Zhenyang, YAN Lin, et al. Research progress in genetic breeding of coffee[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2024, 54(10): 1874−1884.]

[5] HAO Kun, LIU Xiaogang, WANG Xiukang, et al. Optimizing shade cultivation method and irrigation amount to improve photosynthetic characteristics, bean yield, and quality of coffee in a subtropical monsoon climate[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 848524.

[6] BASTIAN F, HUTABARAT O S, DIRPAN A, et al. From plantation to cup: Changes in bioactive compounds during coffee processing[J]. Foods, 2021, 10(11): 2827.

[7] FEBRIANTO N A, ZHU F. Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties[J]. Food Chemistry, 2023, 412: 135489.

[8] VINÍCIUS de MELO PEREIRA G, SOCCOL V T, BRAR S K, et al. Microbial ecology and starter culture technology in coffee processing[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(13): 2775−2788.

[9] de MELO PEREIRA G V, de CARVALHO NETO D P, MAGALHÃES A I J, et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans–A review[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 441−452.

[10] MUNYENDO L M, NJOROGE D M, OWAGA E E, et al. Coffee phytochemicals and post-harvest handling: A complex and delicate balance[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 102: 103995.

[11] 吕文佳, 刘云, 杨剑舟, 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. [LÜ Wenjia, LIU Yun, YANG Kaizhou, et al. Formation and characteristics of the main roasted coffee flavour compounds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(3): 394−400.]

[12] ZHAI Huinan, DONG Wenjiang, FU Xingfei, et al. Integra-

tion of widely targeted metabolomics and the e-tongue reveals the chemical variation and taste quality of Yunnan Arabica coffee prepared using different primary processing methods[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101286.
[13] ASWATHI K N, SHIRKE A, PRAVEEN A, et al. Functioning of *Saccharomyces cerevisiae* in honey coffee (*Coffea canephora*) and their effect on metabolites, volatiles and flavor profiles[J]. Food Research International, 2024, 180: 114092.
[14] ASWATHI K N, SHIRKE A, PRAVEEN A, et al. Pulped natural/honey robusta coffee fermentation metabolites, physicochemical and sensory profiles[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136897.
[15] ZHAI Huinan, DONG Wenjiang, TANG Yumei, et al. Characterization of the volatile flavour compounds in Yunnan Arabica coffee prepared by different primary processing methods using HS-SPME/GC-MS and HS-GC-IMS[J]. LWT, 2024, 192: 115717.
[16] 黄昆, 李宝才, 王文辉, 等. UPLC-MS 技术在食品安全分析检测方面的应用[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(8): 105−109. [HUANG Kun, LI Baocai, WANG Wenhui, et al. Application of the ultra-high performance liquid chromatography and mass spectrometry technology in food safety analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(8): 105−109.]
[17] JANNE C F L, de SOUZA G M, MACIEL de OLIVEIRA L, et al. Coffee fermentation process: A review[J]. Food Research International, 2023, 169: 112793.
[18] AYSELI M T, İPEK AYSELI Y. Flavors of the future: Health benefits of flavor precursors and volatile compounds in plant foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 48: 69−77.
[19] ZHOU Peng, HU Ou, FU Haiyan, et al. UPLC-Q-TOF/MS-based untargeted metabolomics coupled with chemometrics approach for Tieguanyin tea with seasonal and year variations[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 73−82.
[20] 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.
[21] 苗玥, 谭超, 彭春秀, 等. 基于 UHPLC-QE-MS 代谢组学分析小粒种咖啡豆特征成分[J]. 中国食品学报, 2022, 22(11): 355−367. [MIAO Yue, TAN Chao, PENG Chunxiu, et al. Metabolomic analysis of the characteristic components of *Coffea arabica* L. based on UHPLC-QE-MS[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(11): 355−367.]
[22] HAILE M, BAE H M, KANG W H. Comparison of the antioxidant activities and volatile compounds of coffee beans obtained using digestive bio-processing (elephant dung coffee) and commonly known processing methods[J]. Antioxidants, 2020, 9(5): 408.
[23] CHEN Zhongai, GENG Yangyang, WANG Mei, et al. Relationship between microbial community and flavor profile during the fermentation of chopped red chili (*Capsicum annuum* L.)[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102071.
[24] PRIYADI D A, PRAYOGO G S, NUR K M. Smallholder farmers' perceptions of coffee bean processing using the honey method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 672(1): 012025.
[25] NASHALIAN O, YAYLAYAN V A. *In situ* formation of the amino sugars 1-amino-1-deoxy-fructose and 2-amino-2-deoxy-glucose under Maillard reaction conditions in the absence of ammonia [J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 489−495.
[26] ZHAN Huan, CUI Heping, YU Junhe, et al. Characteristic flavor formation of thermally processed N-(1-deoxy-*α*-d-ribulos-1-yl)-glycine: Decisive role of additional amino acids and promotional effect of glyoxal[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131137.
[27] AMALIA F, ADITIAWATI P, YUSIANTO, et al. Gas chromatography/mass spectrometry-based metabolite profiling of coffee beans obtained from different altitudes and origins with various postharvest processing[J]. Metabolomics, 2021, 17(7): 69.
[28] LIANG Jianfeng, WU Hailin, LU Mingfei, et al. HS-SPME-GC-MS untargeted metabolomics reveals key volatile compound changes during Liupao tea fermentation[J]. Food Chemistry, 2024, 23: 101764.
[29] LIAO Y C, KIM T, SILVA J L, et al. Effects of roasting degrees on phenolic compounds and antioxidant activity in coffee beans from different geographic origins[J]. LWT, 2022, 168: 113965.
[30] HU Faguang, YU Haohao, FU Xingfei, et al. Characterization of volatile compounds and microbial diversity of Arabica coffee in honey processing method based on different mucilage retention treatments[J]. Food Chemistry, 2025, 25: 102251.
[31] de MELO PEREIRA G V, de MELLO SAMPAIO V, WIELE N, et al. How yeast has transformed the coffee market by creating new flavors and aromas through modern post-harvest fermentation systems[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 151: 104641.
[32] de MELO PEREIRA G V, SOCCOL V T, PANDEY A, et al. Isolation, selection and evaluation of yeasts for use in fermentation of coffee beans by the wet process[J]. International Journal of Food Microbiology, 2014, 188: 60−66.
[33] WANG Huajie, HUA Jinjie, YU Qinyan, et al. Widely targeted metabolomic analysis reveals dynamic changes in non-volatile and volatile metabolites during green tea processing[J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130131.
[34] de MELO PEREIRA G V, NETO E, SOCCOL V T, et al. Conducting starter culture-controlled fermentations of coffee beans during on-farm wet processing: Growth, metabolic analyses and sensorial effects[J]. Food Research International, 2015, 75: 348−356.
[35] HOU Dianzhi, TANG Jian, FENG Qiqian, et al. Gamma-aminobutyric acid (GABA): A comprehensive review of dietary sources, enrichment technologies, processing effects, health benefits, and its applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(24): 8852−8874.
[36] BYTOF G, KNOPP S E, SCHIEBERLE P, et al. Influence of processing on the generation of *γ*-aminobutyric acid in green coffee beans[J]. European Food Research and Technology, 2005, 220(3): 245−250.
[37] LEE L W, CHEONG M W, CURRAN P, et al. Coffee fermentation and flavor–An intricate and delicate relationship[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 182−191.
[38] MONTAVON P, MAURON A F, DURUZ E. Changes in green coffee protein profiles during roasting[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(8): 2335−2343.
[39] DUARTE G S, PEREIRA A A, FARAH A. Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods[J]. Food Chemistry, 2010, 118(3): 851−855.
[40] AVALLONE S, GUIRAUD J P, GUYOT B, et al. Fate of mucilage cell wall polysaccharides during coffee fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(11): 5556−5559.
[41] YILMAZ C, GÖKMEN V. Neuroactive compounds in foods: Occurrence, mechanism and potential health effects[J]. Food Research International, 2020, 128: 108744.
[42] CHEN Shengshuang, FU Yu, BIAN Xiqing, et al. Investigation and dynamic profiling of oligopeptides, free amino acids and derivatives during Pu-erh tea fermentation by ultra-high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131176.