# 咖啡风味成分研究进展

周永秀[1]，卢开华[1,2]，刘秦明[1]，刘贝宁[1]，段　仪[1]，李　宏[1]，胡永金[1,*]
（1.云南农业大学食品科学技术学院，云南 昆明　650201；2.曲靖师范学院后勤基建处，云南 曲靖　655000）

**摘　要：**作为全球消费量最大的饮料之一，咖啡因其化合物的复杂多样性而具有独特风味。咖啡风味的相关研究早在20世纪初期就已成为咖啡研究领域的重要内容，人们对咖啡风味物质的认识由最初简单的感官评定进步到如今的精密仪器分析。咖啡风味受到从产地到咖啡饮料终端产品各个环节的影响，本文对咖啡品种及产地、新兴加工方法、发酵剂、烘焙、萃取和贮藏条件对咖啡风味的影响进行评价；了解这些过程对咖啡风味的影响，有利于控制咖啡豆风味的一致性。组学技术将成为分析咖啡香气成分及其品质的重要手段，将豆类化学性质与咖啡饮料感官属性联系起来，可以更好地掌握咖啡质量甚至消费者偏好背后的化学成分，以此为咖啡风味的研究提供理论参考。

**关键词：**咖啡；风味物质；机理；采后加工；组学技术

## Research Progress on Coffee Flavor Components

ZHOU Yongxiu[1], LU Kaihua[1,2], LIU Qinming[1], LIU Beining[1], DUAN Yi[1], LI Hong[1], HU Yongjin[1,*]
(1. College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming　650201, China;
2. Logistics Infrastructure Department, Qujing Normal University, Qujing　655000, China)

**Abstract:** As one of the most consumed beverages in the world, coffee has a unique flavor due to its complex and diverse chemical composition. Since the early 20$^{th}$ century, coffee flavor has been an important aspect in the field of coffee research. People's understanding of coffee flavor substances has evolved from simple sensory evaluations to today's precise instrumental analyses. Coffee flavor is affected by various factors ranging from its origin to the final cup. This article evaluates the influence of variety, geographical origin, new processing techniques, starter cultures, roasting methods, extraction procedures and storage conditions on coffee flavor, which is crucial for maintaining consistent coffee bean flavor. Omics technology will become an important tool for analyzing coffee aroma components and quality. By linking the chemical properties of coffee beans with the sensory properties of coffee, we can gain a deeper insight into the chemical components underlying coffee quality and even consumer preference, thereby providing a theoretical reference for the study of coffee flavor.

**Keywords:** coffee; flavor substances; mechanism; postharvest processing; omics technology
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240620-145
中图分类号：TS273　　文献标志码：A　　文章编号：1002-6630（2025）10-0387-10
引文格式：
周永秀, 卢开华, 刘秦明, 等. 咖啡风味成分研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(10): 387-396. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240620-145.　http://www.spkx.net.cn
ZHOU Yongxiu, LU Kaihua, LIU Qinming, et al. Research progress on coffee flavor components[J]. Food Science, 2025, 46(10): 387-396. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240620-145.　http://www.spkx.net.cn

咖啡是茜草科、咖啡属植物，原产于埃塞俄比亚，和茶叶、可可并称为世界三大饮料作物[1]。咖啡的产量、产值和消费量均居三大饮料作物之首，在国际贸易中是仅次于石油的原料型产品[2]。咖啡具有提神醒脑、抗氧化、抗抑郁、抗菌、保护DNA和抗癌等生物活性，与其咖啡因、绿原酸、葫芦巴碱、二萜类、酚类和挥发性有

收稿日期：2024-06-20
第一作者简介：周永秀（1998—）（ORCID: 0009-0003-7283-1970），女，硕士研究生，研究方向为食品微生物。
E-mail: 2899392477@qq.com
*通信作者简介：胡永金（1971—）（ORCID: 0000-0001-9097-1895），男，教授，博士，研究方向为食品微生物。
E-mail: huyjin@126.com

机化合物等化学成分[3-5]密切相关。咖啡的化学成分，特别是挥发性有机化合物，被认为是影响咖啡质量和消费者接受度的最重要因素之一。

咖啡的特征风味源于咖啡豆的化学成分。18世纪末国外开始对咖啡的香气成分进行研究，因技术限制，对咖啡香气成分的分离和鉴定并不理想[6]。20世纪60年代，质谱和核磁共振陆续进入实验室，这些设备的运用加速了咖啡挥发性风味物质的分析鉴定，70年代报道了生咖啡豆中风味前体与烘焙咖啡中香气成分的相关性，80年代在咖啡风味化合物中鉴定出13 种新化合物，并阐明咖啡的特征风味由酯类、醇类、酚类、含硫化合物、吡嗪、呋喃和吡咯等多种化合物组合而成，而不是单一化合物[6-8]。傅里叶变换红外吸收光谱证实了与咖啡香气相关的主要有机功能团，如芳香酸、酮、醛和脂肪酸酯[9]。到目前为止，从咖啡中鉴定分离出1 000多种挥发性物质，包括硫化物、吡嗪、吡啶、恶唑、吡咯、呋喃、醛、高级醇、酮、酯和酚。生咖啡豆的化学成分会直接影响最终产品的质量和价值，然而，只有很少一部分对咖啡香气和风味有贡献作用[10]。

咖啡基质上含有细菌、丝状真菌和酵母[11]，然而，这些真菌物种在发酵过程中的作用尚未得到很好研究，并且对咖啡质量的贡献在很大程度上仍然未知。目前，组学技术联用能更好追踪并表征咖啡风味成分，为风味物质的全面解析提供技术支撑[12]。咖啡风味成分不仅取决于品种和产地、收获后加工、烘焙、萃取和贮藏条件，还受到发酵剂的影响，本文讨论这些因素间的相互作用导致的咖啡化学成分的变化、改善咖啡风味的策略，以及黏液降解过程中产生的微生物衍生代谢产物。

## 1 咖啡风味成分及形成机理

### 1.1 咖啡风味成分概述

咖啡风味物质包括挥发性成分和非挥发性成分。挥发性成分主要决定咖啡独特的香气，而非挥发性成分则影响咖啡饮料的滋味[13]。咖啡豆的主要香气前体物是纤维素和半纤维素等不溶性碳水化合物、阿拉伯糖、果糖、半乳糖、葡萄糖、蔗糖、棉子糖和水苏糖等可溶性碳水化合物，以及脂质、绿原酸和含氮化合物[14]。其中蔗糖、葡萄糖和果糖有助于在烘焙过程中形成酸和其他挥发性化合物。此外，多糖是保留挥发物的重要成分，是构成咖啡风味的基础。含氮化合物，如生物碱（咖啡因和葫芦巴碱）和蛋白质，以及非挥发性脂肪酸（柠檬酸、苹果酸和奎尼酸）和挥发性酸（乙酸、丁酸、癸酸、甲酸、己酸、异戊酸和丙酸）也以高浓度存在于生咖啡豆中。这些化合物在烘焙过程中分解，产生重要的风味活性代谢物，如吡啶和吡咯[15]。咖啡的脂质部分主要由甘油三酯、固醇、咖啡二醇、阿拉伯树胶和生育酚组成[16]。酚类化合物、硫醇[17]和矿物质也构成咖啡成分，而矿物质主要是钾、磷、镁和钙，其与土壤构成及其他环境因素有关，如海拔、湿度、温度和咖啡果实形成期间的遮光。

咖啡的特征性风味物质主要分为五大类[18]，即：1）醛酮类物质，与焦糖味或甜味有关；2）含硫化合物，与硫磺或焙炒气味有关；3）吡嗪类化合物，与泥土气味有关；4）酚、醛类化合物，与烟熏/酚类香味有关；5）呋喃酮类化合物，与辛辣味有关。

### 1.2 咖啡风味物质形成机理

咖啡风味形成复杂，其机理包括多种途径，主要是美拉德反应[19]、前体物质在加热过程中的降解[20]、脂质氧化分解[21]以及它们之间的相互反应，产生各种挥发性化合物。

#### 1.2.1 美拉德反应

美拉德反应是指蛋白质和还原糖之间的反应，生成糖的降解产物，使咖啡风味物质变得更加复杂，如图1。其在咖啡香气中发挥主要作用，研究重点在于其机理及衍生的芳香化合物，产生多种挥发性风味化合物，如吡嗪类、噻吩类、咪唑、吡啶及环烯硫化物[22]。不同的$\alpha$-氨基酸和还原糖的加热反应能按Strecker降解生成各种特殊醛类，如乙二醛、乙醇醛等[23]。

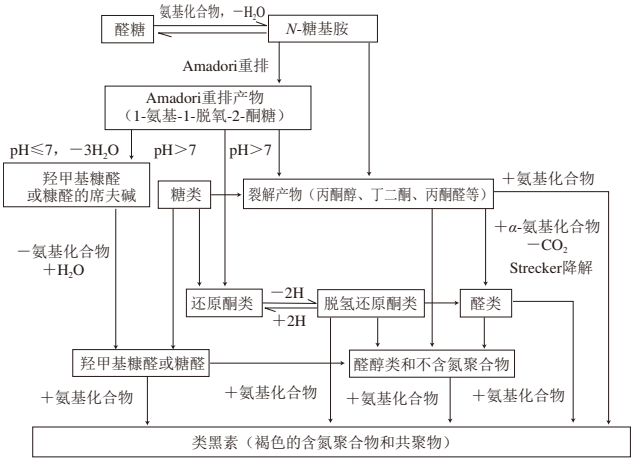



**图 1 美拉德反应的机理**

**Fig. 1 Mechanism of the Maillard reaction**

#### 1.2.2 前体物质降解

前体物质的降解主要包括蛋白质、碳水化合物、绿原酸和葫芦巴碱，如图2。蛋白质降解[24]产生氨基酸，特别是含硫氨基酸[25]，除了生成$H_2S$、$NH_3$和半胱胺酸等物质外，还生成生咖啡豆中没有的噻唑类、噻吩类及其衍生物，是咖啡烘焙过程中较为重要的芳香物质。碳水化合物的降解反应有裂解、分子内脱水、异构，反应中单糖和双糖等产生低分子质量醛、酮、焦糖素等，如

5-甲基呋喃醛；纤维素降解生成呋喃、糠醛、麦芽酚等，中间产物多为二酮、醛、醇、呋喃及其衍生物，糖类降解形成有机酸，如甲酸、乙酸、柠檬酸和苹果酸等，使咖啡风味中带有辛辣感和酸味；绿原酸降解生成奎尼酸[26]，奎尼酸部分降解形成苯甲酸类和酚类，绿原酸与其他非挥发性酚类衍生物如5-阿魏酰奎宁酸一起水解，产生羟基肉桂酸衍生物。实时质谱监测技术显示，羟基肉桂酸（如阿魏酸）进一步发生脱羧和其他化学反应，从而形成有效的挥发性酚类化合物，如愈创木酚、对乙烯基愈创木酚和酚类，具有酚味和烟熏味，其中间体主要是咖啡酸、阿魏酸、奎宁酸和绿原酸内酯。葫芦巴碱降解产生烷基吡嗪衍生物和吡咯[27]，是咖啡烘焙阶段的增香剂。还有一些矿物质，如钾、锰、铁和铜等金属可能催化发生在烘焙和贮藏过程中的反应，当前咖啡中这类组分的研究相对较少，其对咖啡滋味感官品质的影响尚不明确。

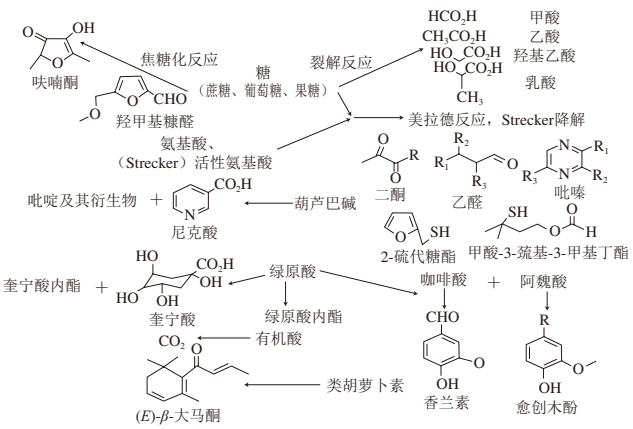



**图 2 生咖啡豆中的前体物质与烘焙过程之间的关系**

**Fig. 2 Relationship between precursors in green coffee beans and the roasting process**

1.2.3 脂质氧化

油脂是烘焙咖啡豆中最重要的成分之一，被认为是烘焙香气和风味的重要载体[28]。咖啡豆中的脂质氧化主要包括两方面：一是不饱和脂肪酸的双键氧化生成过氧化物，进一步分解为香气阈值很低的酮、醛、酸等挥发性羰基化合物；二是羟基脂肪酸水解后生成羟基酸，经过加热脱水、环化生成内酯化合物，主要揭示了亚油酸和亚麻酸的氧化。

## 2 影响咖啡风味成分的因素

2.1 咖啡品种与产地对咖啡风味的影响

世界市场上主要有2 种咖啡：阿拉比卡咖啡和罗布斯塔咖啡。阿拉比卡咖啡原产于埃塞俄比亚，而罗布斯塔咖啡原产于中非。罗布斯塔咖啡豆的咖啡因含量大约是阿拉比卡咖啡豆的2 倍[29]。阿拉比卡咖啡具有低纬度、高海拔、昼夜温差大等气候地理条件的独特性，有香气浓郁、口感醇厚、浓而不苦等特点，这与其含有较高比例的酸、吡啶、呋喃和醛有关，而罗布斯塔咖啡由于较高含量的吡嗪或其衍生物而显示出泥土和辛辣的烘焙香气[30]。根据经验已知海拔影响咖啡植物的光合和蒸腾作用，并因此影响挥发性和非挥发性组合物，这与咖啡风味形成直接相关。在高海拔地区，咖啡往往含有高含量的绿原酸，其在烘焙阶段产生绿原酸内酯并增加咖啡冲泡物的苦味[31]。在高海拔地区，可采用浆状或天然咖啡的自发发酵过程获得高质量的感官特征，这是因为海拔高、温度较低，咖啡豆成熟时间相对延长，咖啡果的新陈代谢变慢，更有助于咖啡果产生和积累更多感官和质量相关的代谢产物[32]；低温已被认为有利于咖啡香气前体在成熟过程中的积累。在低海拔地区，咖啡豆含有更多的咖啡因和绿原酸，在饮料中形成可感知的稠度和苦味。此外，在低海拔地区，使用发酵剂可以提高质量[33]；发酵剂的使用改变了咖啡豆的组成成分及产生新的风味前体。海拔对咖啡风味的影响是一个多变量的研究，它们之间的具体关系无法解释清楚，因此，有必要采用相同的发酵方法对不同海拔的咖啡果进行加工，以深入探讨不同海拔咖啡果香气品质差异的形成机理。

Liu Chujiao等[34]开发了一个模型系统，使用糖溶液预处理罗布斯塔生咖啡豆，旨在改变香气物质的含量，结果表明，将经果糖处理的80%罗布斯塔咖啡豆与阿拉比卡咖啡豆混合，具有与100%阿拉比卡咖啡豆最相似的香气。目前改善罗布斯塔咖啡风味的方法主要是通过改变或增加风味前体糖和羧酸的含量，从而影响烘烤过程中物理和化学反应途径。通过前体调制和烘焙技术改进，罗布斯塔咖啡和质量较差的阿拉比卡咖啡的感官特性可以得到改善。无论是阿拉比卡咖啡豆还是罗布斯塔咖啡豆都有许多品种，这些品种都有可能影响咖啡饮料的香气和最终品质，值得进一步研究。

周斌等[35]对不同产地咖啡豆香气成分组成进行分析，发现不同地区的咖啡豆挥发性香气成分基本相似，但含量有差别。巴西咖啡微苦、清淡温热、热带风味奔放；哥伦比亚咖啡圆润、酸甜可口、香味浓郁、口感厚重[36]；中国云南省的阿拉比卡咖啡略带果酸味、香而不烈。许多研究报道了咖啡中的一些关键香气化合物，如2-甲基丁醛、2-乙基-6-甲基吡嗪、4-乙基愈创木酚、2-糠基硫醇、5-甲基糠醛和2,5-二甲基吡嗪等[27]，其含量与地理来源、气候、海拔高度等相关。不同产地的咖啡果中单糖种类和含量的差异直接影响美拉德反应、酚类化合物和类黑精的生成，从而可能对烘焙咖啡风味物质的产生和含量有影响。

2.2 加工方式对咖啡风味的影响

收获后咖啡豆的加工方法影响咖啡豆的化学成分和最终质量。加工过程中的发酵已成为改善咖啡品质和改变感官特征的途径。咖啡发酵过程中发生的化学变化主要是果胶降解和微生物从碳水化合物中产生有机酸、乙醇、酯和其他代谢产物，有利于烘焙过程中产生新的化合物和挥发物，最终导致咖啡风味物质改变[37]。若发酵得到控制，则产生有机酸、乙醇、酯和其他代谢产物；发酵失败则导致腐败微生物的繁殖，对咖啡的香气和风味产生不利影响，通常这种发酵产生的咖啡豆被称为“臭”豆[38]。发酵不足的咖啡豆含有残留的黏液，阻止干燥，并为腐败细菌和真菌的发展创造了有利的环境。过度发酵[36]会导致产生不需要的化合物，特别是丙酸和丁酸，这些化合物会产生异味，如洋葱味。此外，过度发酵也可能产生短链脂肪酸及其酯，如2-甲基丁酸乙酯、3-甲基丁酸乙酯和环己酸乙酯。因此，采取适当的加工方法控制发酵非常重要，如干法处理、湿法处理、蜜处理和消化生物发酵，以及其他新的加工方法，包括碳浸渍技术、自诱导厌氧发酵和厌氧发酵等[37-38]。每种加工方法都有其自身的特点，最终导致烘焙咖啡豆的不同风味。

咖啡干法加工的特征在于完全有氧和整个咖啡果的发酵，其在果实中保留更高含量的葡萄糖和果糖，最终形成的咖啡风味更甜，口感也更丝滑。而在湿法加工中黏液被洗去，葡萄糖和果糖含量显著降低。这种结果可能与糖代谢有关，湿法处理的缺氧条件引起的醇或乳酸发酵和种子萌发过程中的相互转化[39]有关。关于咖啡的综述[40-42]表明，经水洗处理的咖啡豆中有更多的芳香化合物形成。这与Elhalis等[43]得出的结论（湿法加工的咖啡比干法加工的咖啡具有更高的酸度和更多的香气）一致。湿法加工产生较少的缺陷豆并且能够保持咖啡豆的内在品质。感官属性的差异很有可能归因于湿法加工中黏液去除所涉及的发酵过程，导致咖啡内的糖和游离氨基酸的不同代谢活动所引起。然而，湿法加工中黏液去除和浸泡的附加值是有争议的，因为发酵对咖啡香气的影响尚未完全阐明，而发酵的主要作用通常被认为是去除黏液。干法加工咖啡无浸泡情况，高黏液量增强了发酵效果，并且可以保留在咖啡豆上。游离氨基酸和糖含量的变化可以解释湿法加工和干法加工咖啡豆的香气特征之间的差异。

厌氧发酵与干法和湿法加工相比，发酵持续时间更长，这可能有利于风味前体的形成，从而增加烘焙过程中美拉德反应相关风味的形成。Martins等[44]发现厌氧发酵增加了细菌活性，导致产生更多的细菌代谢产物。这些细菌代谢产物和厌氧条件限制了导致过度发酵的真菌感染。酵母和细菌可以在厌氧条件下生存，产生代谢物，然而，对于咖啡需要进行更多的研究，以评估这些代谢物对最终产品质量的直接影响。厌氧条件优化了酵母的乙醇生产。同时，乳酸菌在厌氧条件下主要通过乳酸脱氢酶途径产生乳酸。在植物组织和果实中，细胞转换为无氧糖酵解以弥补有氧能量的缺乏。这些发酵途径可导致细胞质酸化，并从丙酮酸产生乙醇、丙氨酸、苹果酸和琥珀酸[45]。延长的酵母发酵也可能有助于形成更多的酯，其中较长的发酵时间与水果味更浓和酸性更强的咖啡饮料相关。

Evangelista等[46]研究表明，与干法加工咖啡豆相比，蜜处理加工咖啡豆的半乳糖醇和谷氨酸含量较高，这有利于调节烘焙过程中的风味发展。Ribeiro等[47]研究半干法工艺中的酵母菌群，得出异常毕赤酵母、黏红酵母、贝酵母和德氏圆孢霉为发酵过程中的优势种。关于咖啡黏液的降解，目前不清楚是由于酵母、细菌、酸化作用还是内源酶的作用，需要进一步研究细菌和酵母菌在体内降解黏液的能力。但有研究[48]表明，与咖啡相关的酵母菌株能够通过产生不同的水解酶，如果胶甲基酯酶、果胶裂解酶和多聚半乳糖醛酸酶，促进果胶分解。果胶的水解释放出葡萄糖、鼠李糖、*L*-阿拉伯糖和*D*-半乳糖醛酸等单糖作为酵母代谢和香气形成的额外碳源。但微生物衍生的高级醇与咖啡品质之间的直接关系仍不清楚。另外，黏液中含有丰富的糖，这使微生物生长并代谢咖啡豆中的蔗糖、葡萄糖、果糖和柠檬酸，导致乳酸含量增加，产生次级代谢物[49]，如图3所示。它们的代谢产物会扩散到咖啡豆上，特别是芳香酯类，从而间接影响咖啡最终质量。然而，作为中间种子的咖啡豆也具有代谢活性，并且这些内源性活性将进一步限定生豆化学成分[50]；尽管扩散机制到目前仍未阐明，但文献中经常提到挥发性有机化合物扩散到咖啡豆中的动态。未来需要进一步研究挥发物在烘焙期间如何保存并到达最终的咖啡产品。

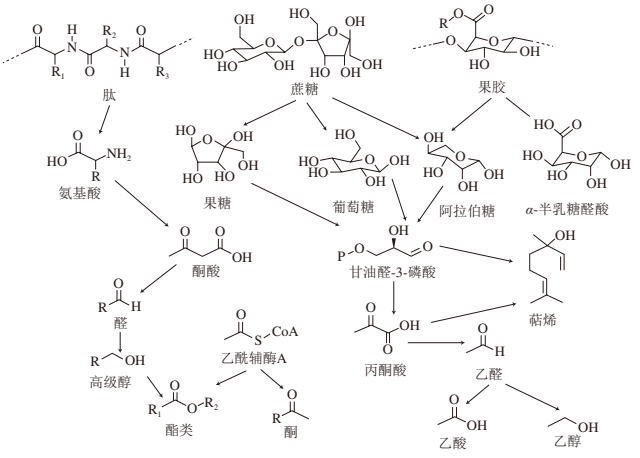



**图 3 咖啡黏液降解与代谢物之间的关系**

**Fig. 3 Relationship between coffee mucus degradation and metabolites**

自诱导厌氧发酵[51-52]是针对收获后咖啡加工发生在不受控制的环境中，导致发酵停滞和缺乏咖啡豆质量的可预测性而提出的一种新兴加工技术。自诱导厌氧发酵中的生物反应器是控制发酵过程和提高咖啡质量的有效方案。生物反应器是控制、增强、优化发酵过程、缩短发酵时间、避免微生物污染并有助于结果再现的有价值的工具。自诱导厌氧发酵由于微生物活性而实现厌氧，发酵过程中的氧浓度影响饮料的质量，其利用剩余的氧气进行代谢反应，释放$CO_2$、挥发性和非挥发性化合物；$CO_2$影响甘油、乙醇、琥珀酸、乙酸和乳酸的产生[53]，此技术提高了乳酸菌和酵母的发酵性能，增加了代谢产物的数量。有研究指出，咖啡的干法和半干法加工属于有氧加工，而半厌氧是湿法加工，厌氧条件下发酵的咖啡比在有氧和半厌氧条件下有更高的感官评分[54]。不同的氧浓度导致微生物活性不同，微生物活性促进了咖啡豆的自诱导厌氧发酵，从而产生更强烈的果味属性咖啡。

碳浸渍技术[55]最早应用于葡萄酒加工过程，探索完整水果对封闭环境适应性的过程，剥夺氧气并充满二氧化碳，使果实从有氧呼吸转变为无氧呼吸，无氧发酵分解糖并增加酸度，为最终产品增加水果味和花香味。但是咖啡果具有不同于葡萄的物理特性。前者质地较硬，含糖的果肉比后者少。碳浸渍加工最不可能为咖啡提供与葡萄酿酒中相似的环境条件。咖啡果的结构可能会影响去浆、发酵和干燥性能，从而影响咖啡豆的质量。这种加工强调的是碳浸渍随发酵时间和温度的变化，添加$CO_2$以获得富含$CO_2$的无氧环境，从而影响咖啡果代谢。高浓度的$CO_2$降低了咖啡豆的呼吸活动，并延迟了果实成熟，导致果实代谢从呼吸模式转变为发酵模式[56]。果实成熟的延迟导致细胞内发酵过程的时间较长。这种代谢的变化可能是影响咖啡豆风味形成的主要原因。低氧浓度下，植物组织中的糖酵解途径使丙酮酸转化为乳酸、乙醛、乙醇和乙酸乙酯[57]。发酵过程中的碳水化合物、脂质和氨基酸代谢导致咖啡豆中有机酸含量降低，乙醇和糖醇含量升高，脂质和氨基酸组成发生变化[58]。

在咖啡加工过程中，无论何种加工方法都涉及微生物发酵，对发酵过程中产生的代谢物进行鉴定和定量，映射代谢过程，可以提高对这一过程的认识。近年来已有利用非靶向代谢组学[59]、代谢组学[60]和多组学技术联用追踪咖啡发酵过程产生的代谢物对风味的影响研究，并定量咖啡烘焙后仍有多少物质存在于咖啡中。咖啡中风味物质的检测技术如表1所示。

表 1 咖啡中风味物质的检测技术

Table 1 Detection techniques for flavor substances in coffee

| 检测技术 | 应用 | 参考文献 |
|---|---|---|
| 近红外光谱 | 得到含样品成分含量信息的光谱图，运用化学计量学软件确立理化值与光谱图的对应关系，可实现对未知样品的快速检测 | [5] |
| 核磁共振 | 快速、准确对样品进行高通量分析，在一次分析中能同时鉴定多种化合物 | [61] |
| 质子转移反应质谱 | 监测采收高度、发酵时间和烘焙程度对咖啡粉香气释放的影响 | [62] |
| 电子鼻和电子舌 | 鉴别同一产地果子狸咖啡香气成分 | [63] |
| 傅里叶变换红外吸收光谱 | 鉴别挥发性化合物、识别咖啡发酵后产生的不同挥发性基团及产品溯源 | [64] |
| 气相色谱-质谱 | 检测包括糖、糖醇、有机酸、氨基酸、脂肪酸及大量次级代谢物在内的数百种化合物 | [65] |
| 超高效液相色谱-质谱联用 | 同时测定多种糖组分，还检测挥发性酸类化合物，如草酸、酒石酸、苹果酸、抗坏血酸、乙酸、柠檬酸等 | [66] |
| 气相色谱-离子迁移谱联用 | 在咖啡加工中检测到挥发性化合物正己醛、辛醇、呋喃等 | [67] |
| 气相色谱-嗅闻-质谱 | 通过气味强度和气味活度值分析鉴定重要香气化合物 | [68] |
| 顶空-固相微萃取 | 对烘焙咖啡豆的风味指纹图谱进行检测 | [69] |

消化法[70]是指咖啡豆被动物如果子狸和大象食用，并通过宿主胃肠道期间经历酶促、酸性和发酵处理。肠道微生物群和消化酶的结合是影响咖啡豆质量最重要的因素之一。咖啡豆在消化过程中发生各种化学变化，这些变化与感官品质密切相关[71]；如生咖啡豆中检测到蛋白质降解，与传统的咖啡工艺相比，这被认为在烘焙后引起苦味的减少并改善感官特征。虽然这种加工方法获得的咖啡具有独特的感官品质，如光滑、坚果、低苦味和巧克力味，但此类型的咖啡豆产量极低，市场价格昂贵。针对消化法当前的研究策略是体外模拟动物肠道消化系统，追踪动物肠内的微生物或酶，进一步研究利用具有特定化学产生能力的微生物菌株来获得具有目标感官或功能特性的咖啡豆。

咖啡发酵过程中的微生物群落取决于所涉及的加工方法和加工过程，这导致发酵过程中咖啡香气品质不一致[72]。因此，新的咖啡加工趋势集中在通过接种发酵剂培养物控制生咖啡豆的发酵，选择正确的发酵剂[73]和发酵容器。Shankar等[74]接种毕赤酵母发酵阿拉比卡咖啡，在烘焙豆中，观察到接种发酵比自然发酵表现出更高的糖、蛋白质、多酚、绿原酸、咖啡因和葫芦巴碱含量，以及更多挥发性物质的风味分子，如呋喃、酮和吡嗪。并且感官分析突出了蜂蜜、麦芽和浆果的味道。Prakash等[75]接种酿酒酵母发酵的可尼隆咖啡产生的挥发性化合物对饮料感官特性有积极贡献。以上结果证实了通过选择合适的发酵剂培养物控制生咖啡豆发酵在风味改良中的重要性。然而，要确定一种发酵剂是否适合某种品种或某种产地来源，甚至某种加工咖啡的方法，往往需要测定咖啡的非挥发性成分、感官品质或其他指标，综合评价后才能得出结论。

### 2.3 烘焙条件对咖啡风味的影响

生咖啡豆经过烘焙，绿原酸和其他酚类化合物发生分解，多糖、寡糖和葫芦巴碱损失，以及产生大多数芳香族化合物[76]。咖啡的风味主要取决于烘焙过程和烘

焙工艺，但是如果处理不恰当，可能会导致咖啡出现烧焦的气味。Czerny等[77]发现咖啡豆的焙烤风味、烟味及泥土味与烘焙程度呈正相关，随着烘焙程度的增加而增强。Akiyama等[78]研究表明，在烘焙过程中咖啡中有机酸、脂质、含氮化合物等前体物质发生不同程度的美拉德反应、焦糖化反应和热解化学反应，生成呋喃类、吡嗪类、醇类、吡咯类、吡啶类、醛酮类、硫化物、酚类及酯类等挥发性香气化合物。正是这些烘焙过程新产生的化合物赋予咖啡独特的颜色、香气和滋味；焦糖风味随着烘焙程度的加深而愈发明显，但甜感和酸感与烘焙程度呈现明显的负相关。吕文佳等[79]研究咖啡主要烘焙风味物质的形成及变化规律表明，在极浅度～浅中度时咖啡豆中的挥发性成分主要为吡嗪类和呋喃类，有助于巧克力和焦糖风味。

在烘焙咖啡中，有机酸类物质是影响咖啡酸度的主要物质。而柠檬酸和苹果酸是生咖啡豆中最主要的酸类物质，影响咖啡的酸涩味和果味[80]，但其他在烘焙时形成的甲酸、乙酸和乳酸等影响甜味和酸度，从而干扰咖啡的感官特性；但咖啡中最主要的挥发性酸是乙酸，乙酸具有强烈的刺鼻气味，由于其挥发性较高导致其含量随着烘焙程度的增加而下降，在深度烘焙咖啡中未检测到乙酸的存在。宋璐琦等[81]研究烘焙速率对咖啡理化性质的影响，结果表明，随着烘焙速率的加快，水分、氨基酸、绿原酸含量及色度值逐渐降低，但对咖啡因含量影响较小。刘莉萍等[82]研究烘焙方式对咖啡豆氨基酸的影响，结果显示，烘焙温度越高、时间越长，对氨基酸的影响越大。通常，烘焙时间长短、程度深浅及速度快慢均会对咖啡风味产生影响。生咖啡豆含有一些挥发性风味物质，但咖啡饮料中大部分挥发性风味物质都是由生咖啡豆含有的风味前体物质在较高的烘焙温度下发生美拉德反应、焦糖化反应和热反应形成的，特别是噻吩类化合物、恶唑类化合物和噻唑类化合物在生咖啡豆中没有，仅存在于焙炒咖啡的挥发性香气成分中[83-84]。

2.4 萃取参数对咖啡风味的影响

近年来，国内外学者就萃取参数对咖啡风味的影响进行了一系列研究[85-86]，包括萃取方式、萃取水温、萃取水质、萃取水压和咖啡研磨颗粒度等，这些因素直接影响咖啡挥发性成分与理化成分。

Cordoba等[87]通过对哥伦比亚中等烘焙度的阿拉比卡冷萃咖啡和热萃咖啡挥发物的对比研究发现，冷萃咖啡的总呋喃和吡喃丰度高于热萃咖啡。冷萃与热萃工艺的主要区别在于萃取温度和萃取时间，较高的温度增加了可溶性固形物、咖啡因和绿原酸的含量。由于脂类在低温下不易萃出，这使得冷萃出的咖啡热量更低，味道更香甜[88]，这与Rao等[89]提出的冷萃咖啡比热冲咖啡的酸度更低结果一致。与热萃咖啡相比，冷萃咖啡通过咖啡粉在长时间的低温环境下与水进行充分萃取，焦苦感弱，花果香明显，酸感清澈，更好保留咖啡本身的风味。陈仲娜等[90]利用热脱附联合气相色谱-质谱提取到冷萃咖啡中的香气化合物111 种，冷萃咖啡所对应的咖啡豆烘焙加工适宜采用较浅烘焙度，浅烘焙可保留咖啡豆本身的风味及口感，且苦味及焦烟味感较少，冲泡后具有明显的酸感及清爽口感。咖啡的研磨度和萃取时间对冷萃咖啡的风味及理化特性有很大影响，由于焙炒过程中咖啡豆内存在高压，粉碎时易挥发，风味物质大量散失，使咖啡感官质量降低。不同的冲泡水也会影响热萃咖啡甜味和巧克力香味强度[91]，用软化水冲泡咖啡会导致过度萃取并带来咸味。在冷萃低温生产环境下，咖啡中的单宁分解速率被有效抑制，极大减少了其分解产生的苦涩感。

2.5 贮藏条件对咖啡风味的影响

生咖啡豆贮藏条件的潜在影响不应被低估。Rendón等[92]报道了贮藏对带壳生咖啡豆和生咖啡豆感官特性的影响，测定了咖啡油脂游离脂肪酸含量及羰基数，表明咖啡豆贮藏后品质下降可能与其氧化过程有关。在不同的加工和贮藏处理后，咖啡豆中发生的生物化学变化可能归因于内源性活动和代谢[93]。烘焙咖啡在长期贮藏期间可能会发生一系列不良的物理和化学反应，这可能会降低咖啡豆和咖啡的质量。挥发性有机化合物和脂类是最容易变质的咖啡成分，挥发性有机化合物的损失，特别是含硫气味剂及氧化反应形成的异味，是咖啡降解的主要原因[94]。已证明几种挥发性有机化合物与贮藏期间烘焙咖啡的变质有关，包括有机酸、硫醇、醛、2,3-丁二酮和己醛，会产生酸败味，是烘焙咖啡贮藏过程中的标志化合物[95]。采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用和电子鼻技术对生咖啡豆贮藏过程中挥发性成分进行分析，共鉴定出56 种挥发性物质，随着贮藏时间的延长，酸类物质含量先增大后减少，酯类物质含量逐渐增大，醛类物质含量先减小后增大[96]。王茜[97]研究发现：烘焙咖啡豆贮藏过程中苹果酸在贮藏10 d降低到最低点；奎尼酸在贮藏15 d后迅速增加到峰值。苹果酸的涩味对咖啡的风味不利，奎尼酸影响苦味，且分解产物可以提高咖啡的风味。随贮藏时间延长，生咖啡豆的脂质、氨基酸和酚类化合物的构成发生改变，且生咖啡豆的组成可指示咖啡冲泡物的感官品质，酯类对咖啡饮料风味具有较大贡献，但目前针对干燥和贮藏过程中的挥发性成分变化没有详细研究。

## 3 结 语

总之，咖啡从产地到饮料的过程中与风味存在错综复杂的关系。本文主要阐述了咖啡风味物质形成机理、咖啡加工与微生物之间的作用以及技术进步对风味的贡

献。未来研究应侧重于咖啡加工与微生物之间的作用产生的化合物扩散到咖啡豆中的动态，并确定微生物发酵对咖啡饮料质量的实际作用。

微生物发酵对咖啡地域风味的塑造优势突出，针对微生物群落的发酵机制、微生物发酵剂选择、微生物可控发酵的研究前景广阔。目前针对咖啡发酵中微生物多样性的研究多集中于传统培养法，即针对酵母菌、丝状真菌及细菌等具体的微生物类别进行菌株的分离及鉴定，通过免培养法揭示全发酵进程中微生物群落结构动态变化的相关研究较缺乏。对咖啡发酵中微生物群落的多样性进行分析，选择表型菌株创造多样化的质地和风味，并将其应用于调节发酵剂的发酵过程，提高咖啡风味与品质。不同地区所生产的咖啡采用的接种剂及发酵条件均存在一定差别，因此对发酵过程中微生物结构、发酵环境与风味形成的关联性进行研究，对于咖啡品质的稳定性控制具有重要意义。

虽然受控发酵的咖啡在风味改良上越来越受到重视，但发酵机制和条件仍然需要进一步阐明和优化。为了获得全面和科学的结果，对咖啡的理化特性和风味的研究往往通过获得生咖啡豆后的加工与其原产地和品种，甚至与农艺措施相结合来进行。此外，要寻求新的和有针对性的加工方法，以产生复杂和独特的咖啡香气和滋味。发酵过程与代谢组学、转录组学和蛋白质组学等组学技术相结合将是未来咖啡发酵研究的一个趋势，因为目前的技术还具有一定的盲目性和随意性，发酵过程的许多机理还缺乏合理的解释。

**参考文献：**


[1] 沈晓静, 字成庭, 辉绍良, 等. 咖啡化学成分及其生物活性研究进展[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(1): 112-122. DOI:10.11926/jtsb.4249.

[2] MURTHY P S, NAIDU M M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition: a review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 66: 45-58. DOI:10.1016/j.resconrec.2012.06.005.

[3] HU G L, WANG X, ZHANG L, et al. The sources and mechanisms of bioactive ingredients in coffee[J]. Food & Function, 2019, 10(6): 3113-3126. DOI:10.1039/c9fo00288j.

[4] FERNANDA M, MANUEL A C, MARIA D D C, et al. Mechanisms of action of coffee bioactive compounds: a key to unveil the coffee paradox[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023: 21-23. DOI:10.1080/10408398.2023.2221734.

[5] CHEN Z, XUE Y, DENG J, et al. Determination of butylated hydroxytoluene in edible oil using near-infrared spectroscopy combined with multivariate analysis[J]. Infrared Physics and Technology, 2024, 140(5): 105362-105368. DOI:10.1016/j.infrared.2024.105362.

[6] GETACHEW A T, CHUN B S. Coffee flavor[M]//MELTON L, SHAHIDI F, VARELIS P. Encyclopedia of food chemistry. Amsterdam: Elsevier, 2019: 48-53. DOI:10.1016/B978-0-08-100596-5.21658-2.

[7] BUFFO R A, CARDELLI-FREIRE C. Coffee flavour: an overview[J]. Flavour & Fragrance Journal, 2004, 19(2): 99-104. DOI:10.1002/ffj.1325.

[8] BADMOS S, LEE S H, KUHNERT N, et al. Comparison and quantification of chlorogenic acids for differentiation of green Robusta and Arabica coffee beans[J]. Food Research International, 2019, 126: 108544. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108544.

[9] CRAIG A P, FRANCA A S, OIVERIA L S. Evaluation of the potential of FTIR and chemometrics for separation between defective and non-defective coffees[J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1368-1374. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.11.121.

[10] MAHMUD M, SHELLIE R, KEAST R. Unravelling the relationship between aroma compounds and consumer acceptance: coffee as an example[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2380-2420. DOI:10.1111/1541-4337.12595.

[11] WANG C, SUN J, LASSABLIERE B, et al. Coffee flavour modification through controlled fermentations of green coffee beans by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia kluyveri*: Part I. Effects from individual yeasts[J]. Food Research International, 2020, 136: 109588. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109588.

[12] 李钰莲, 郑建祎, 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230306-053.

[13] 张梦娇, 王蓓, 李妍, 等. 咖啡中的特征风味组分研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(16): 7-10. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2016.16.052.

[14] 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. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.1.046.

[15] MUSSATTO S I, MACHADO E M S, MARTINS S, et al. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(5): 661-672. DOI:10.1007/s11947-011-0565-z.

[16] KLLING-SPEER, ISABELLE, KURZROCK, et al. Formation of a new substance in the lipid fraction during storage of green coffee beans[C]//Proceedings of EURO FOOD CHEM XIII, 2005-01-01.

[17] DULSAT-SERRA N, QUINTANILLA-CASAS B, VICHI S. Volatile thiols in coffee: a review on their formation, degradation, assessment and influence on coffee sensory quality[J]. Food Research International, 2016, 89: 982-988. DOI:10.1016/j.foodres.2016.02.008.

[18] MURTHY P S, SNEHA H P, BASAVARAJ K, et al. Modulation of coffee flavor precursors by *Aspergillus oryzae* serine carboxypeptidases[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113(1): 108312. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108312.

[19] 董聪慧, 董文江, 程金焕, 等. 咖啡豆烘焙过程中油脂脂肪酸组成、挥发性风味及活性成分的演变规律[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 210-222. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220302-023.

[20] 张欢, 黄友谊, 王成柳, 等. 茶叶厌氧发酵中咖啡碱的降解途径研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 226-233. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2024.04.032.

[21] RIBEIRO E F, POLACHINI T C, PEREIRA A R L, et al. Storage stability of spray- and freeze-dried chitosan-based Pickering emulsions containing roasted coffee oil: color evaluation, lipid oxidation, and volatile compounds[J]. Processes, 2023, 11(4): 32-39. DOI:10.3390/PR11041048.

[22] YU H, SEOW Y X, ONG P K C, et al. Effects of high-intensity ultrasound on Maillard reaction in a model system of *D*-xylose and *L*-lysine[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 34(5): 154-163. DOI:10.1016/j.ultsonch.2016.05.034.

[23] MARI C, TRUGO L, NETO F, et al. Composition of green coffee water-soluble fractions and identification of volatiles formed during roasting[J]. Food Chemistry, 1996, 55(3): 203-207. DOI:10.1016/0308-8146(95)00104-2.

[24] CHINDAPA N, PUANGNGOEN C, DEVAHASTIN S. Profiles of volatile compounds and sensory characteristics of Robusta coffee beans roasted by hot air and superheated steam[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(8): 3814-3825. DOI:10.1111/ijfs.14997.

[25] 王燕华, 王晓婷, 龚加顺, 等. 基于HS-GC-IMS对8 种咖啡豆烘焙前后挥发性有机物成分分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(23): 124-130. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.23.020.

[26] RIZZI P G. The strecker degradation of amino acids: newer avenues for flavor formation[J]. Food Reviews International, 2008, 24(4): 416-435. DOI:10.1080/87559120802306058.

[27] DORFNER R, FERGE T, KETTURP A, et al. Real-time monitoring of 4-vinylguaiacol, guaiacol, and phenol during coffee roasting by resonant laser ionization time-of-flight mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(19): 5768-5773. DOI:10.1021/jf0341767.

[28] STEFAN S, ANIA S, LUIGI P, et al. Discovery of polyhydroxyalkyl pyrazine generation upon coffee roasting by in-bean labeling experiments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(23): 6636-6649. DOI:10.1021/acs.jafc.1c01894.

[29] SALOJARVI J. The genome and population genomics of allopolyploid coffea arabicareveal the diversification history of modern coffee cultivars[J]. Nature Genetics, 2024, 56(4): 721-731. DOI:10.1038/s41588-024-01695-w.

[30] RODRIGUEZ Y F B, GUZMAN N G, HERNANDEZ J G. Effect of the postharvest processing method on the biochemical composition and sensory analysis of arabica coffee[J]. Engenharia Agrícola, 2020, 40(2): 177-183. DOI:10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p177-183/2020.

[31] PEREIRA M D V G, NETO C D P D, JUNIOR M I A, et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans: a review[J]. Food Chemistry, 2019, 272(30): 441-452. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.08.061.

[32] MARTINS P, BATIST N, MIGUEL M, et al. Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and the quality of fermented coffees[J]. Food Research International, 2020, 129: 108872. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108872.

[33] PEREIRA B A P, MARTINEZ S J, BATISTA N N, et al. Co-inoculation of yeasts starters: a strategy to improve quality of low altitude Arabica coffee[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 13013. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130133.

[34] LIU C J, YANG N, YANG Q, et al. Enhancing Robusta coffee aroma by modifying flavour precursors in the green coffee bean[J]. Food Chemistry, 2019, 281(30): 8-17. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.12.080.

[35] 周斌, 任洪涛. 不同产地咖啡豆香气成分分析[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(2): 128-132. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2016.02.032.

[36] DOS S, HEMERSON D A, YASMIN A B, et al. $^{1}$H NMR metabolic fingerprinting of Chapada Diamantina/Bahia (Brazil) coffees as a tool to assessing their qualities[J]. Microchemical Journal, 2020, 152(1): 104293. DOI:10.1016/j.microc.2019.104293.

[37] LUDWIG I A, BRAVO J, DE PEÑA M P, et al. Effect of sugar addition (torrefacto) during roasting process on antioxidant capacity and phenolics of coffee[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(2): 553-559. DOI:10.1016/j.lwt.2012.12.010.

[38] BASTIAN F, HUTABARAT O S, DIRPAN A N F H, et al. From plantation to cup: changes in bioactive compounds during coffee processing[J]. Foods, 2021, 10(11): 2827. DOI:10.3390/foods10112827.

[39] JOEET T, LAFFARGUE A, DESCROIX F, et al. Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans[J]. Food Chemistry, 2015, 118(3): 693-701. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.05.048.

[40] GILBERTO V D M P, 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, 2015, 57(13): 2775-2788. DOI:10.1080/10408398.2015.1067759.

[41] WANG X Y, WANG Y B, HU G L, et al. Review on factors affecting coffee volatiles: from seed to cup[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 102(4): 1341-1352. DOI:10.1002/jsfa.11647.

[42] MEDEIROS P, BIANCHI A, WOICIECHOWSKI, 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. DOI:10.1016/j.foodres.2015.06.027.

[43] ELHALIS H, COX J, FRANK D, et al. The role of wet fermentation in enhancing coffee flavor, aroma and sensory quality[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(2): 485-498. DOI:10.1007/s00217-020-03641-6.

[44] MARTINS P M M, BATISTA N N, MIGUEL M G D C P, et al. Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and the quality of fermented coffees[J]. Food Research International, 2020, 129: 108872. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108872.

[45] BENKEBLI N. Physiological and biochemical response of tropical fruits to hypoxia/anoxia[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12(16): 670803. DOI:10.3389/fpls.2021.670803.

[46] EVANGELISTA S R, SILVA C F, MARIA G P D C M, et al. Improvement of coffee beverage quality by using selected yeasts strains during the fermentation in dry process[J]. Food Research International, 2014, 61(7): 183-195. DOI:10.1016/j.foodres.2013.11.033.

[47] RIBEIRO L S, GABRIELA D C P M, EVANGELISTA S R, et al. Behavior of yeast inoculated during semi-dry coffee fermentation and the effect on chemical and sensorial properties of the final beverage[J]. Food Research International, 2017, 92: 26-32. DOI:10.1016/j.foodres.2016.12.011.

[48] MASOUD W, JESPERSEN L. Pectin degrading enzymes in yeasts involved in fermentation of *Coffea arabica* in East Africa[J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 110(3): 291-296. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.030.

[49] ALCINE Z M C, MINGZHAN T, QUAN S L. Growth, survival, and metabolic activities of probiotics *Lactobacillus rhamnosus* GG and *Saccharomyces cerevisiae* var. *boulardii* CNCM-I745 in fermented coffee brews[J]. International Journal of Food Microbiology, 2021, 350(16): 109229. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109229.

[50] SALEM H F, LEBRUN M, MESTRES C, et al. Transfer kinetics of labeled aroma compounds from liquid media into coffee beans during simulated wet processing conditions[J]. Food Chemistry, 2020, 322(30): 126779. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126779.

[51] MOTA D B C M, BATISTA N N, RABELO S H M, et al. Influence of fermentation conditions on the sensorial quality of coffee inoculated with yeast[J]. Food Research International, 2020, 136(1): 109482. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109482.

[52] SCOPEL T P, NARA N B, PINHEIRO L P S, et al. Self-induced anaerobiosis coffee fermentation: impact on microbial communities, chemical composition and sensory quality of coffee[J]. Food Microbiology, 2022, 103(1): 103962. DOI:10.1016/j.fm.2021.103962.

[53] PEREIRA M D V G, NETO C D P D, JUNIOR M I A, et al. Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of

coffee beans: a review[J]. Food Chemistry, 2019, 272(30): 441-452. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.08.061.

[54] MOTA M C B D, BATISTA N N, RABELO M H S, et al. Influence of fermentation conditions on the sensorial quality of coffee inoculated with yeast[J]. Food Research International, 2020, 136(1): 109482. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109482.

[55] MAURICIO J C, MORENO J, ZEA L, et al. The effect of grape must fermentation conditions on volatile alcohols and esters formed by *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1997, 75(2): 155-160. DOI:10.1002/(SICI)1097-0010(199710)75:23.0.CO;2-S.

[56] MARCO S, STEFANO B, ANTONELLA C, et al. Short-term $CO_2$ treatment of harvested grapes (*Vitis vinifera* L. cv. *Trebbiano*) before partial dehydration affects berry secondary metabolism and the aromatic profile of the resulting wine[J]. Plants, 2022, 11(15): 1973.

[57] BOECKX J, HERTOG M, GEERAERD A, et al. Regulation of the fermentative metabolism in apple fruit exposed to low-oxygen stress reveals a high flexibility[J]. Postharvest Biology & Technology, 2019, 149: 118-128. DOI:10.1016/j.postharvbio.2018.11.017.

[58] BRIZZOLARA S, MANGANARIS G A, FOTOPOULOS V, et al. Primary metabolism in fresh fruits during storage[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 80. DOI:10.3389/fpls.2020.00080.

[59] 陈华磊, 黄克兴, 郑敏, 等. 基于非靶向风味组学分析3 种品牌啤酒的风味差异[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 223-228. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200319-294.

[60] HUANG X, LIU R, CHEN J N, et al. Self-detoxification behaviors and tissue-specific metabolic responses of fishes growing in erythromycin-contaminated water[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 4(61): 134577. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.134577.

[61] LENZ E M, WILSON I D. Analytical strategies in metabonomics[J]. Journal of Proteome Research, 2007, 6(2): 443-458. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.137182.

[62] BODNER M, MOROZOVA K, KRUATHONGSRI P, et al. Effect of harvesting altitude, fermentation time and roasting degree on the aroma released by coffee powder monitored by proton transfer reaction mass spectrometry[J]. European Food Research & Technology, 2019, 245(7): 1499-1506. DOI:10.1007/s00217-019-03281-5.

[63] ONGO E, FALASCONI M, SBERVEGLIERI G, et al. Chemometric discrimination of philippine civet coffee using electronic nose and gas chromatography mass spectrometry[J]. Procedia Engineering, 2012, 47: 977-980. DOI:10.1016/j.proeng.2012.09.310.

[64] CRAIG P A, FRANCA S A, OIVEIRA S L. Evaluation of the potential of FTIR and chemometrics for separation between defective and non-defective coffees[J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1368-1374. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.11.121.

[65] 张宁玲. 色谱-质谱联用技术在代谢组学中的应用[C]//探索科学学术研讨会. 四川: 成都理工大学, 2016: 1.

[66] DONG T, XU Y, HUANG S, et al. Effects of different fertilizer treatments on the sugar components of Huangguogan[C]//International Symposium on the Frontiers of Biotechnology and Bioengineering, 2019: 020066. DOI:10.1063/1.5110860.

[67] 郭秀丽, 高晓光, 贾建, 等. 基于GC-IMS的咖啡风味鉴定分析方法[J]. 分析仪器, 2021(6): 16-21. DOI:10.3969/j.issn.1001-232x.2021.06.003.

[68] 柳新荣, 王炜清, 周云, 等. 不同加工工艺速溶咖啡香气差异研究[J]. 饮料工业, 2021, 24(6): 15-20. DOI:10.3969/j.issn.1007-7871.2021.06.004.

[69] 董文江, 张丰, 赵建平, 等. 云南地区烘焙咖啡豆的风味指纹图谱研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(10): 1903-1911. DOI:10.3969/j.issn.1000-2561.2015.10.028.

[70] HAILE M, BAE M H, KANG H W. 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. DOI:10.3390/antiox9050408.

[71] LEE W L, CHEONG W M, CURRAN P, et al. Coffee fermentation and flavor: an intricate and delicate relationship[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 182-191. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.124.

[72] DARIUSH M. Dietary and policy priorities for cardiovascular disease, diabetes, and obesity: a comprehensive review[J]. Circulation, 2016, 133(2): 187-225. DOI:10.1161/circulationaha.115.018585.

[73] SILVA B L D, PEREIRA P V, BERTOLI L D, et al. Fermentation of *Coffea canephora* inoculated with yeasts: microbiological, chemical, and sensory characteristics[J]. Food Microbiology, 2021, 98: 103786. DOI:10.1016/j.fm.2021.103786.

[74] SHANKAR S R, SNEHA H P, PRAKASH I, et al. Microbial ecology and functional coffee fermentation dynamics with *Pichia kudriavzevii*[J]. Food Microbiology, 2022, 105: 104012. DOI:10.1016/j.fm.2022.104012.

[75] PRAKASH I, SHANKAR S R, SNEHA H P, et al. Metabolomics and volatile fingerprint of yeast fermented robusta coffee: a value added coffee[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112717. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112717.

[76] HANJING W, JINGYU G, AMIRT B, et al. Effect of processing on bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds in coffee beans[J]. Food Bioscience, 2022, 46: 101373. DOI:10.1016/j.fbio.2021.101373.

[77] CZERNY M, GROSCH W. Potent odorants of raw Arabica coffee. Their changes during roasting[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2000, 48(3): 868-872. DOI:10.1021/jf990609n.

[78] AKIYAMA M, MURAKAMI K, OHTANI N, et al. Analysis of volatile compounds released during the grinding of roasted coffee beans using solid-phase microextraction[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(7): 1961-1969. DOI:10.1021/jf020724p.

[79] 吕文佳, 刘云, 杨凯舟, 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.03.077.

[80] VANDENBERGHE L P S, KARP S G, OLIVEIRA P Z D, et al. Solid-state fermentation for the production of organic acids[M]. Current developments in biotechnology and bioengineering. Amsterdam: Elsevier, 2018.

[81] 宋璐琦, 石芸琪, 陈茂深. 烘焙速度对咖啡理化性质及风味物质的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(1): 210-215.

[82] 刘莉萍, 李莹莹, 李艳, 等. 烘焙方式对咖啡豆氨基酸的影响[J]. 深圳职业技术学院学报, 2020, 19(3): 29-34; 63.

[83] CLARKE R J. Green coffee processing[M]//CLIFFORD M N, WILLSON K C. Coffee. Berlin: Springer, 1985: 230-250. DOI:10.1007/978-1-4615-6657-1_10.

[84] TOLED P R A B, PEZZA L, PEZZA H R, et al. Relationship between the different aspects related to coffee quality and their volatile compounds[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(4): 705-719. DOI:10.1111/1541-4337.12205.

[85] 陆羽霜, 施政廷, 杨震南. SPME-GC-MS结合多元统计方法探究冷萃与热萃对咖啡萃取液香气的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 79-86. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023020257.

[86] BERTRAND B, BOULANGER R, DUSSERT S, et al. Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2575-2583. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.06.060.

[87] 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(1): 1-12. DOI:10.1038/s41598-019-44886-w.

[88] 戴桂芳, 陈云, 陈小玲, 等. 咖啡挥发油的超临界二氧化碳萃取及其成分分析[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 51-54. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2021.05.015.

[89] RAO N Z, FULLER M. Acidity and antioxidant activity of cold brew coffee[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16030. DOI:10.1038/s41598-018-34392-w.

[90] 陈仲娜, 谢妍纯, 谢欣妍. 云南阿拉比卡咖啡冷萃和热萃香气分析[J]. 饮料工业, 2019, 22(3): 44-52. DOI:10.3969/j.issn.1007-7871.2019.03.011.

[91] CORDO N, MORENO F L, OSORIO C, et al. Chemical and sensory evaluation of cold brew coffees using different roasting profiles and brewing methods[J]. Food Research International, 2021, 141: 110141. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110141.

[92] RENDÓN M Y, DE JESUS GARCIA SALVA T, BRAGAGNOLO N. Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage[J]. Food Chemistry, 2014, 147: 279-286. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.09.123.

[93] BRIZZOLARA S, MANGANNARIS G A, FOTOPOULOS V, et al. Primary metabolism in fresh fruits during storage[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 80. DOI:10.3389/fpls.2020.00080.

[94] 张倩倩, 李思谦, 周立红, 等. 咖啡酸等小分子酚酸类成分自氧化及聚合机制产物及药理活性研究进展[J]. 中国现代中药, 2021, 23(3): 555-561. DOI:10.13313/j.issn.1673-4890.20200309006.

[95] KROL K, GANTNER M, TATARAK A H E. The content of polyphenols in coffee beans as roasting, origin and storage effect[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(1): 33-39. DOI:10.1007/s00217-019-03388-9.

[96] 丛莎, 董文江, 赵建平, 等. 采用HS-SPME-GC/MS和电子鼻技术解析生咖啡豆加速贮藏期挥发性组分的变化规律[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7): 13-15. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.7.0031.

[97] 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: 12-40.