DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251011004
引用格式: 李国明, 刘小琼, 匡钰, 等. 不同初加工处理方式对瑞丽小粒咖啡豆游离氨基酸含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 33–43.
LI GM, LIU XQ, KUANG Y, *et al*. Effects of different primary processing methods on the content of free amino acids in Ruili arabica coffee beans [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 33–43. (in Chinese with English abstract).

不同初加工处理方式对瑞丽小粒咖啡豆游离氨基酸含量的影响

李国明, 刘小琼*, 匡　钰, 李守岭, 李庆聪, 胡永亮
(云南省德宏热带农业科学研究所, 瑞丽　678600)

摘　要: 目的　探究冷冻干燥、水洗、日晒和蜜处理 4 种初加工处理方式对瑞丽小粒咖啡豆中游离氨基酸组成和含量的影响。**方法**　利用全自动氨基酸分析仪测定咖啡豆样品中游离氨基酸组成和含量, 通过主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)对咖啡豆特征滋味氨基酸进行筛选分析。**结果**　从 4 组不同初加工处理的咖啡豆样品中均检测到 17 种游离氨基酸, 但含量、组成分布和占比不同。总游离氨基酸含量以蜜处理组咖啡豆含量最高, 含量达 10.236 mg/g; 冷冻干燥处理组第 2 为 10.144 mg/g; 水洗处理组含量最低为 9.823 mg/g。其中, 蜜处理组的甜味和苦味氨基酸总含量最高, 鲜味氨基酸总含量最高的为冷冻干燥处理组, 水洗处理组的甜味和苦味氨基酸总含量均最低, 日晒处理组的鲜味氨基酸总含量相对较低。通过 PCA 与 OPLS-DA 的筛选分析发现, 在冷冻干燥处理、水洗处理、日晒处理及蜜处理 4 种不同处理方式的咖啡豆样品中, 谷氨酸、酪氨酸、苏氨酸、精氨酸分别为其关键的特征滋味氨基酸。**结论**　不同初加工处理方式对瑞丽小粒咖啡豆游离氨基酸含量影响较大, 研究结果为咖啡产业优化初加工工艺、提升咖啡品质提供了科学依据。

关键词: 初加工处理; 瑞丽小粒咖啡; 游离氨基酸; 多元统计分析

Effects of different primary processing methods on the content of free amino acids in Ruili arabica coffee beans

LI Guo-Ming, LIU Xiao-Qiong*, KUANG Yu, LI Shou-Ling, LI Qing-Cong, HU Yong-Liang
(*Dehong Tropical Agriculture Research Institute of Yunnan*, *Ruili* 678600, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the effects of 4 kinds of primary processing methods—freeze-drying, washing, sun-drying and honey processing—on the composition and content of free amino acids in Ruili arabica

收稿日期: 2025-10-11
基金项目: 云南省技术创新人才培养对象项目(202405AD350051); 云南省咖啡重点实验室项目(202449CE340030)
第一作者: 李国明(1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为热带作物营养品质及功能性成分分析研究。E-mail: liguoming654200@163.com
***通信作者:** 刘小琼(1983—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为热带作物功能性成分分析及加工技术研究。E-mail: fluidliu99@163.com

coffee beans. **Methods** The composition and content of free amino acids in coffee bean samples were determined using a fully automatic amino acid analyzer. Characteristic taste-related amino acids in coffee beans were screened and analyzed through principal component analysis (PCA) and orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA). **Results** The 17 kinds of free amino acids were detected in all 4 groups of coffee bean samples with different initial processing treatments, but their content, compositional distributions and proportions varied. The honey-processed coffee beans exhibited the highest total free amino acid content at 10.236 mg/g, followed by the freeze-dried group with 10.144 mg/g, while the washed group showed the lowest content of 9.823 mg/g. Among them, the honey-processed group exhibited the highest total content of sweet and bitter amino acids, while the freeze-dried group showed the highest total content of umami amino acids. The washed group had the lowest total content of both sweet and bitter amino acids, and the sun-dried group demonstrated a relatively low total content of umami amino acids. The screening analysis through PCA and OPLS-DA revealed that in coffee bean samples subjected to 4 kinds of different processing methods (freeze-drying, washing, sun-drying and honey processing), glutamic acid, tyrosine, threonine and arginine were identified as the key characteristic flavor amino acids respectively. **Conclusion** Different primary processing methods have a significant impact on the free amino acid content of Ruili arabica coffee. The research results provide a scientific basis for the coffee industry to optimize the primary processing technology and improve coffee quality.

KEY WORDS: primary processing; Ruili arabica coffee; free amino acids; multivariate statistical analysis

0 引 言

咖啡作为全球范围内广受青睐的饮品[1]，其消费规模显著高于可可饮料、茶叶及其相关加工制品[2]，消费者选择咖啡的主要依据在于其独特的口感与风味品质[3]。而在影响咖啡品质的众多因素中，游离氨基酸的作用不容忽视。游离氨基酸作为咖啡化学成分体系里至关重要的滋味呈味物质[4]，不仅广泛分布于经热加工和非热加工处理的食品当中，并且在咖啡独特滋味的形成与呈现过程中发挥着不可或缺的关键作用[5]。不同类型的游离氨基酸会为咖啡带来截然不同的味觉感受[6]。具体而言，部分游离氨基酸能够赋予咖啡令人愉悦的甜味，让咖啡的口感愈发柔和、顺滑；而另一些游离氨基酸则可能产生苦味，进而为咖啡增添更为复杂、丰富的风味层次[7]。此外，游离氨基酸能够参与美拉德反应等一系列重要的化学反应，此类反应于咖啡烘焙阶段发生，可进一步催生众多具有芳香特性的化合物，进而赋予咖啡独具特色的香气属性[8]。

咖啡生豆自身所呈现的风味特征并不突出，然而，在历经初加工以及烘焙等一系列复杂且精细的加工流程后，咖啡豆内部会发生一系列的化学反应，进而促成咖啡形成丰富且独具特色的风味[9]。咖啡豆的初加工处理是咖啡生产流程中的关键环节，不同的初加工方法会对咖啡豆的化学成分产生显著影响，进而影响咖啡的最终品质[10]。随着咖啡产业的持续发展以及消费者对咖啡需求的日益增长，为满足市场的多元化需求，多种新型的咖啡豆加工技术相继涌现，例如超声波辅助萃取、厌氧发酵技术以及超临界 CO_2 萃取等[11]。在当前咖啡初加工领域，日晒法、水洗法以及蜜处理法是应用范围最为广泛、代表性最为突出的 3 种处理方法[12]。其中，水洗法能够制备出外观均匀一致、品质相对稳定的咖啡豆，然而该方法可能会导致部分游离氨基酸的流失[13]。日晒法能够更多地保留咖啡豆的天然成分，但易受天气条件制约，且可能造成咖啡豆品质的不均一性，其对游离氨基酸的影响机制也相对复杂[14]。蜜处理法作为水洗法与日晒法的有机结合，不仅赋予了咖啡独特的风味特征，同时也在一定程度上改变了游离氨基酸的含量及其比例关系[15]。初加工方法之间的差异，主要源于对发酵程度、温度等关键参数所实施的精准且有效的调控。这种调控举措能够引发咖啡生豆内蛋白质、氨基酸、绿原酸等风味前体物质以及质构特性发生改变，进而对后续烘焙过程中化合物的反应路径产生影响，最终造就了丰富且多样的风味特征[16]。当前，针对不同初加工处理方式对咖啡豆游离氨基酸含量影响的研究尚存若干不足。具体而言，部分研究仅聚焦于少数几种初加工技术，缺乏对多种初加工方法的系统性对比分析[17]；同时，另有一些研究在样本选取方面存在局限，未能全面体现不同产地及品种咖啡豆之间的差异性[18]。此外，初加工处理对游离氨基酸产生影响的具体作用机制[19]，目前仍有待进一步深入探究。基于此，深入剖析咖啡豆中游离氨基酸的含量及其组成情况，对于完整阐释咖啡品质的形成机制而言，具有至关重要的意义。

本研究运用全自动氨基酸分析仪，对经冷冻干燥、水洗、日晒及蜜处理 4 种初加工方式处理后的小粒咖啡豆中

的游离氨基酸含量及其组成进行了测定分析。采用多元统计分析技术, 系统探究不同初加工处理方式对游离氨基酸组成的作用机制及其内在关联性, 阐明其影响路径与作用规律。研究结果可为咖啡初加工工艺的优化提供理论支撑与实践指导, 助力生产者开发高品质、风味优异的咖啡产品, 从而契合消费者多元化需求。同时, 本研究构建的试验体系可为后续相关研究提供方法学参考, 推动咖啡产业向更高质量、更可持续的方向发展。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

本研究选取于 2025 年 2 月 21 日采集自云南省德宏热带农业科学研究所咖啡种质资源库的成熟瑞丽小粒咖啡鲜果作为实验原料, 该咖啡品种为卡蒂姆 7963。

乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)(分析纯, 北京福斯华科贸有限公司); 盐酸(分析纯, 四川西陇科学有限公司); 茚三酮组合缓冲液[2,2-dihydroxyindane-1,3-dione, pH 分别为 2.20、3.20、4.25、6.45, 大昌洋行(上海)有限公司]; AAS18-5ML 氨基酸标准品[甘氨酸(glycine, Gly)、丝氨酸(serine, Ser)、天冬氨酸(aspartic acid, Asp)、谷氨酸(glutamic acid, Glu)、丙氨酸(alanine, Ala)、苏氨酸(threonine, Thr)、组氨酸(histidine, His)、脯氨酸(proline, Pro)、胱氨酸(cystine, Cys)、异亮氨酸(isoleucine, Ile)、亮氨酸(leucine, Leu)、精氨酸(arginine, Arg)、酪氨酸(tyrosine, Tyr)、蛋氨酸(methionine, Met)、缬氨酸(valine, Val)、赖氨酸(lysine, Lys)、苯丙氨酸(phenylalanine, Phe)](纯度 99.5%, 国家标准物质资源平台); 高纯氮气(纯度 99.999%, 昆明梅塞尔气体产品有限公司)。

1.2　仪器与设备

ML304T 电子天平(精度 0.0001 g, 梅特勒-托利多仪器上海有限公司); RT-N04 新型 4 两装高速粉碎机(荣聪精密科技有限公司); Biochrom30+全自动氨基酸分析仪[大昌洋行(上海)有限公司]; SX2-5-12 马弗炉(沈阳市节能电炉厂); 瑞士布奇 K-370 凯式定氮仪(上海晟声自动化分析仪器有限公司); LC-WB-2 数显恒温水浴锅(上海仪天科学仪器有限公司); QL-866 旋涡混匀器(海门市其林贝尔仪器制造有限公司); GZX-9023MBE 电热鼓风干燥箱(上海博讯医疗生物仪器股份有限公司); SCIENTZ-18N 冷冻干燥机(宁波新芝生物科技股份有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　咖啡鲜果初加工

每种初加工处理咖啡生豆重量均为 2.00 kg, 经加工干燥后控制平均含水量为 11.25%±0.33%。

冷冻干燥: 将新鲜果实进行浮选并脱壳后, 利用真空冷冻干燥仪对果实开展冷冻干燥, 整个冷冻干燥过程持续 96 h, 直至果实水分含量降至 11.5%, 密封保存待用。

水洗处理: 对鲜果进行浮选处理, 加水至液面高于咖啡豆表面 5 cm, 在常温环境下进行为期 72 h 的发酵。发酵完成后, 对咖啡豆进行清洗, 晾晒 14 d, 直至其水分含量降至 11.5%, 密封保存待用。

蜜处理: 对鲜果进行浮选处理, 去除果壳后, 将其置于室温环境中发酵, 持续 72 h。随后, 将发酵后的果实翻晒 14 d, 直至其水分含量降至 11.5%, 密封保存待用。

日晒处理: 对鲜果进行浮选处理, 晾晒 1 d 后, 密封并在室温条件下自然发酵 72 h。发酵结束后, 持续晾晒 14 d, 直至果实水分含量降至 11.5%, 密封保存待用。

1.3.2　咖啡豆样品待测液制备

精确称取 0.2000 g 已粉碎的咖啡豆样品, 置于 10 mL 安瓿瓶内, 加入 10 mL 浓度为 6 mol/L 的盐酸, 充分摇匀。经酒精喷灯封口处理后, 将其放入恒温干燥箱中, 在(110 ℃±1 ℃)的恒定温度条件下进行加热水解, 持续时间为 24 h。水解结束后, 将安瓿瓶取出并冷却至室温。准确量取 1.0 mL 水解液, 转移至蒸发皿中, 将蒸发皿置于 60 ℃±5 ℃的水浴中进行干燥处理, 待溶液接近蒸干时, 加入 2.0 mL 去离子水, 重复上述干燥及加水操作共 3 次, 直至完全蒸干。向蒸发皿中加入 2.0 mL pH 为 2.2 的稀释液, 旋涡混匀后, 通过 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 所得滤液留存备用。

1.3.3　咖啡豆样品游离氨基酸含量测定

准确移取 200 μL 氨基酸混合标准品溶液至进样瓶中, 向其中加入 800 μL pH 为 2.2 的稀释液, 充分振荡混合均匀后, 分别以 10、20、30 和 40 μL 的进样量进行上机分析测试, 并根据各氨基酸的响应值与其对应浓度绘制标准曲线。在本研究中, 针对 17 种氨基酸的分离程序详见表 1。实验采用双检测器体系, 其中检测器 1 的检测波长设定为 570 nm, 检测器 2 的检测波长设定为 440 nm, 以确保对不同氨基酸特征吸收的精确捕捉。进样体积控制为 20 μL, 以此保证结果的重复性和准确性。色谱分离过程选用 Biochrom30+氨基酸分析专用 Na^+型色谱柱, 该色谱柱针对氨基酸分离具有优异的选择性和分离效率。

1.4　数据处理

运用 Excel 2019 完成数据整理工作后, 借助 Simca 14.1 软件开展一维方差分析, 实施 Tukey's 多重比较分析。分析结果以平均值±标准偏差的形式呈现。利用 Origin 2024 软件进行主成分分析(principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)分析和系统聚类分析并绘制相应图表。

表 1 氨基酸分析仪分离程序

Table 1 Separation procedure for amino acid analyzer

运行时间	柱温度	运行缓冲液	流速/(mL/h)	泵状态	圈状态	命令
1:00	48	1	35.0	开启	关闭	
0:00	48	1	35.0	开启	关闭	重置
1:00	48	1	35.0	开启	关闭	负载
6:40	48	1	35.0	开启	开启	
13:00	52	2	35.0	开启	开启	
1:00	52	5	35.0	开启	开启	
16:00	95	5	35.0	开启	开启	
4:00	95	6	35.0	开启	开启	
4:00	95	1	35.0	开启	开启	
9:00	48	1	43.0	关闭	关闭	
2:00	48	1	35.0	开启	关闭	

2 结果与分析

2.1 不同初加工处理对咖啡豆游离氨基酸含量的影响

本研究从 4 种不同初加工处理组咖啡生豆样品中均检测到了 17 种游离氨基酸, 根据氨基酸标准品计算得到不同初加工处理组咖啡生豆样品的游离氨基酸的含量、分布和占比均有所不同。

表 2 呈现了经不同初加工方式处理后的咖啡豆中游离氨基酸含量的具体测定数据。其中, 经冷冻干燥、水洗、日晒及蜜处理后的咖啡豆, 其 TAA 依次为 10.144、9.823、9.996 和 10.236 mg/g。对比发现, 发酵方法蜜处理咖啡豆的总氨基酸含量最高, 而水洗处理咖啡豆

表 2 不同初加工处理组咖啡豆游离氨基酸种类及含量(*n*=3, mg/g)

Table 2 Types and contents of free amino acids in coffee beans processed by different primary processing (*n*=3, mg/g)

氨基酸	冷冻干燥	水洗	日晒	蜜处理
Asp▲	1.086±0.005^{a}	0.987±0.004^{c}	1.013±0.006^{b}	1.079±0.014^{a}
Thr*	0.362±0.002^{a}	0.361±0.001^{a}	0.374±0.002^{a}	0.369±0.011^{a}
Ser▲	0.514±0.003^{cd}	0.507±0.002^{d}	0.530±0.004^{b}	0.545±0.009^{a}
Glu▲	2.252±0.012^{a}	2.197±0.006^{ab}	2.150±0.013^{b}	2.185±0.049^{ab}
Gly▲	0.657±0.003^{abc}	0.647±0.003^{c}	0.652±0.004^{bc}	0.668±0.009^{a}
Ala▲	0.469±0.004^{d}	0.479±0.005^{bd}	0.492±0.003^{ac}	0.494±0.005^{a}
Cys▲	0.145±0.002^{b}	0.128±0.004^{c}	0.157±0.001^{ab}	0.164±0.010^{a}
Val*	0.556±0.003^{a}	0.535±0.004^{b}	0.545±0.003^{ab}	0.550±0.007^{ab}
Met*	0.105±0.003^{a}	0.090±0.001^{d}	0.100±0.001^{bc}	0.096±0.002^{c}
Ile*	0.394±0.002^{ab}	0.389±0.001^{ab}	0.385±0.002^{b}	0.401±0.012^{a}
Leu*	0.875±0.006^{a}	0.849±0.002^{a}	0.865±0.006^{a}	0.875±0.019^{a}
Tyr▲	0.230±0.007^{c}	0.252±0.013^{b}	0.257±0.002^{ab}	0.273±0.001^{a}
Phe*	0.571±0.008^{a}	0.544±0.006^{c}	0.549±0.004^{bc}	0.579±0.012^{a}
His▲	0.248±0.002^{ab}	0.236±0.001^{c}	0.244±0.002^{b}	0.251±0.003^{a}
Lys*	0.665±0.003^{a}	0.643±0.002^{b}	0.652±0.004^{ab}	0.666±0.011^{a}
Arg▲	0.549±0.006^{bc}	0.547±0.006^{c}	0.568±0.004^{a}	0.580±0.005^{a}
Pro▲	0.467±0.003^{a}	0.432±0.003^{b}	0.464±0.003^{a}	0.460±0.006^{a}
TAA	10.144±0.048^{a}	9.823±0.060^{b}	9.996±0.061^{ab}	10.236±0.163^{a}
PAA	6.419±0.030^{a}	6.212±0.034^{b}	6.257±0.039^{ab}	6.423±0.110^{a}
EAA	3.528±0.024^{a}	3.410±0.014^{b}	3.470±0.021^{ab}	3.537±0.074^{a}
NEAA	6.616±0.031^{ab}	6.412±0.046^{c}	6.526±0.040^{bc}	6.699±0.088^{a}

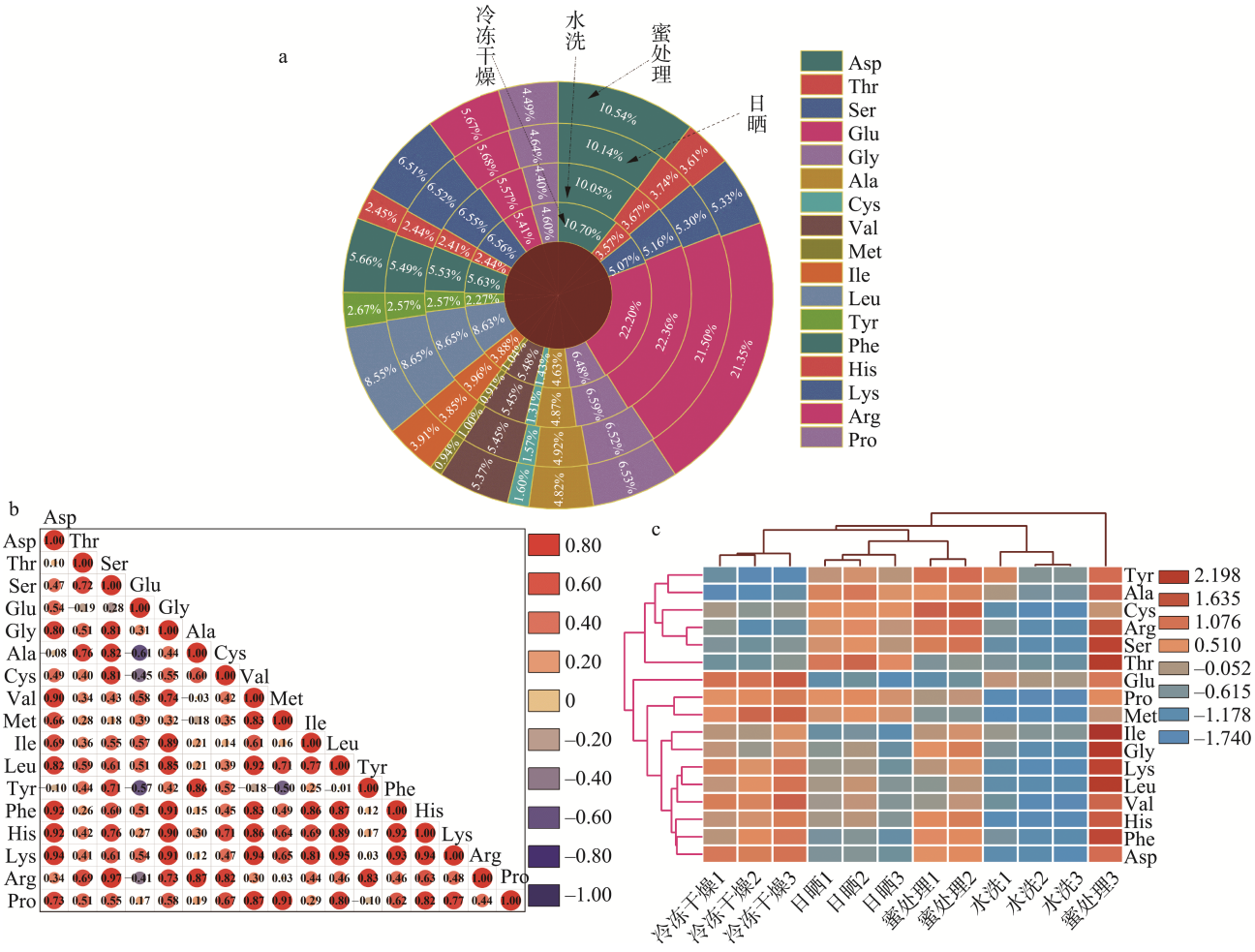
注: ▲表示非必须氨基酸(nonessential amino acid, NEAA); *表示必需氨基酸(essential amino acid, EAA); 氨基酸总量(total amino acid, TAA); 药效氨基酸(pharmacologically active amino acids, PAA)。同一行数据肩标小写字母不同表示组间差异显著(P<0.05), 下同。

的含量最低，二者之间相差 0.413 mg/g。水洗处理咖啡豆中游离氨基酸总体含量相对较低，推测其可能原因在于，咖啡豆完成脱壳后，采用水洗法进行加工处理时，需经历浸泡、发酵等一系列步骤以去除果肉和果胶层。然而，这一处理流程可能在去除杂质的同时，导致部分氨基酸随之流失，进而使得最终产品中氨基酸的总量有所减少。

不同初加工处理组咖啡豆中游离氨基酸的占比情况如图 1a 所示。在 4 个处理组中，含量位居前 3 的游离氨基酸种类一致，均为 Asp(占比为 21.35%~22.36%)、Glu(占比为 10.05%~10.70%)以及 Leu(占比为 8.55%~8.65%)。但是这 3 种游离氨基酸在不同初加工处理组样品中的排序存在差异。此外，含量处于次要位置的游离氨基酸包括 Lys、Gly、Val、Arg 和 Phe。如图 1b 所示，对各氨基酸之间的相关性差异分析表明 Glu 与 Ala、Cys、Tyr 和 Arg 的正相关性最弱，Met 与 Tyr 的正相关性也最弱，Glu 与 Thr、Ser，Tyr 与 Asp、Val、Leu，Ala 与 Val 和 Met 的正相关性较弱，其它氨基酸之间正相关性均较强，说明可以对氨基酸进行主成分分析。为深度剖析不同初加工处理方式对咖啡豆中游离氨基酸特性的作用机制，本研究选取 4 组咖啡豆样本，对其所含的 17 种游离氨基酸含量实施标准化处理，并借助可视化聚类分析热图的形式展开系统性分析，结果详见图 1c。在该热力图中，条带颜色深浅代表游离氨基酸含量的高低，其中红色越深表明含量越高，蓝色越深则表示含量越低。分析结果显示，不同初加工处理组间的咖啡豆在游离氨基酸含量及组成上存在显著差异，能够被明确区分。

2.2　不同初加工处理对咖啡豆游离氨基酸总量组成的影响

EAA/TAA 以及 EAA/NEAA 是衡量蛋白质营养价值的重要指标。依据世界卫生组织/联合国粮农组织制定的氨基酸模式谱标准，理想蛋白质应满足以下条件：EAA/TAA 的比值需达到约 40%，同时 EAA/NEAA 的比值应高于 60%[20]。本研究中，不同初加工处理组咖啡生豆游离氨基酸组成的分析结果见表 3。结果显示，蜜处理组咖啡豆的



注：a. 组成比例；b. 差异分析热图；c. 聚类分析热图。

图 1　不同初加工处理组咖啡豆的游离氨基酸占比与表达

Fig.1　Proportion and expression of free amino acids in coffee beans from different primary processing treatment groups

表 3 不同初加工处理组咖啡生豆游离氨基酸组成的分析结果(n=3, mg/g)

Table 3 Analytical results of free amino acid composition in coffee beans from different primary processing treatment groups (n=3, mg/g)

氨基酸	冷冻干燥	水洗	日晒	蜜处理
EAA	3.528±0.024^{a}	3.410±0.014^{b}	3.470±0.021^{ab}	3.537±0.074^{a}
NEAA	6.616±0.031^{ab}	6.412±0.046^{c}	6.526±0.040^{bc}	6.699±0.088^{a}
TAA	10.144±0.048^{a}	9.823±0.060^{b}	9.996±0.061^{ab}	10.236±0.163^{a}
(EAA/TAA)/%	34.780±0.124^{a}	34.719±0.065^{a}	34.710±0.007^{a}	34.551±0.178^{a}
(EAA/NEAA)/%	53.328±0.292^{a}	53.185±0.153^{a}	53.164±0.016^{a}	52.793±0.415^{a}

TAA、EAA 和 NEAA 含量均比其他组高，水洗处理组咖啡豆的 TAA、EAA 和 NEAA 含量则相对较低。冷冻干燥、水洗、日晒和蜜处理咖啡豆的 EAA/NEAA 分别为(34.780±0.124)%、(34.719±0.065)%、(34.710±0.007)%、(34.551±0.178)%，EAA/NAA 分别为(53.328±0.292)%、(53.185±0.153)%、(53.164±0.016)%、(52.793±0.415)%，4 个初加工处理组咖啡豆对应的两个比值间，并未呈现出显著差异。

2.3 不同初加工处理对咖啡豆呈味氨基酸组成的影响

咖啡豆中的呈味氨基酸是指能够直接或通过化学反应产生特定味觉(鲜、甜、苦)的氨基酸，它们通过味觉受体激活或与糖类等成分反应，形成咖啡独特的风味。不同初加工处理组咖啡豆呈味氨基酸的含量结果见表 4。冷冻干燥、水洗、日晒、蜜处理咖啡液中的鲜味氨基酸含量分别为 3.337、3.184、3.163、3.264 mg/g；甜味氨基酸含量分别为 2.469、2.426、2.512、2.536 mg/g；苦味氨基酸含量分别为 4.337、4.213、4.321、4.436 mg/g。在各项处理组中，蜜处理组的甜味与苦味氨基酸总量居于首位；冷冻干燥处理组的鲜味氨基酸总量最高；水洗处理组的甜味和苦味氨基酸总量均为最低水平；而日晒处理组的鲜味氨基酸总量则相对较低。在初加工处理方式对 3 种呈味氨基酸占比的影响研究中发现，鲜味氨基酸与苦味氨基酸的含量占比均超过 30%，这两种呈味成分共同赋予了咖啡豆鲜爽与苦涩的独特风味。进一步分析表明，在 4 种不同加工处理方式下的咖啡豆中，具有鲜味特征的 Glu 和 Asp 在全部 17 种氨基酸中的含量均处于相对较高水平，其中，Glu 分别达到(2.252±0.012)、(2.197±0.006)、(2.150±0.013)和(2.185±0.049) mg/g，Asp 分别为：(1.086±0.005)、(0.987±0.004)、(1.013±0.006)和(1.079±0.014) mg/g(表 2)，且不同加工方式之间具有显著差异性；其次是贡献苦味的 Leu，4 种加工处理组的含量分别为(0.875±0.006)、(0.849±0.002)、(0.865±0.006)和(0.875±0.019) mg/g，不同加工方式之间差异不显著，表明加工方式对 Leu 含量影响较小。

2.4 不同初加工处理组咖啡豆滋味游离氨基酸分析

PCA 属于典型的无监督降维分析方法，它可以在一定范围内真实且客观地呈现数据的原始特征，进而达成对样品整体品质差异的有效甄别与科学检验[21]。本研究采用 PCA 和 OPLS-DA 对不同初加工处理方式下咖啡豆中的关键特征滋味氨基酸进行鉴定与筛选。不同初加工处理方式咖啡豆中游离氨基酸的 PCA 分析结果见图 2，由图 2a 可知，前两个主成分 PC1、PC2 的特征值分别为 9.73 和 4.43，方差贡献率分别为 57.22%和 26.06%，累计贡献率达 83.28%，因此选择前两个主成分做进一步的 PCA 分析。依据得分图 2c 所呈现的信息，4 个采用不同初加工处理的咖啡豆样品呈现出各自成簇的特征，均处于相对集中的分布区域，并且不同簇群之间的距离较大。不同初加工方式对咖啡豆中游离氨基酸成分的影响较为明显，导致其成分差异较大。与象限原点的距离

表 4 不同初加工处理组咖啡豆呈味氨基酸的含量(n=3, mg/g)

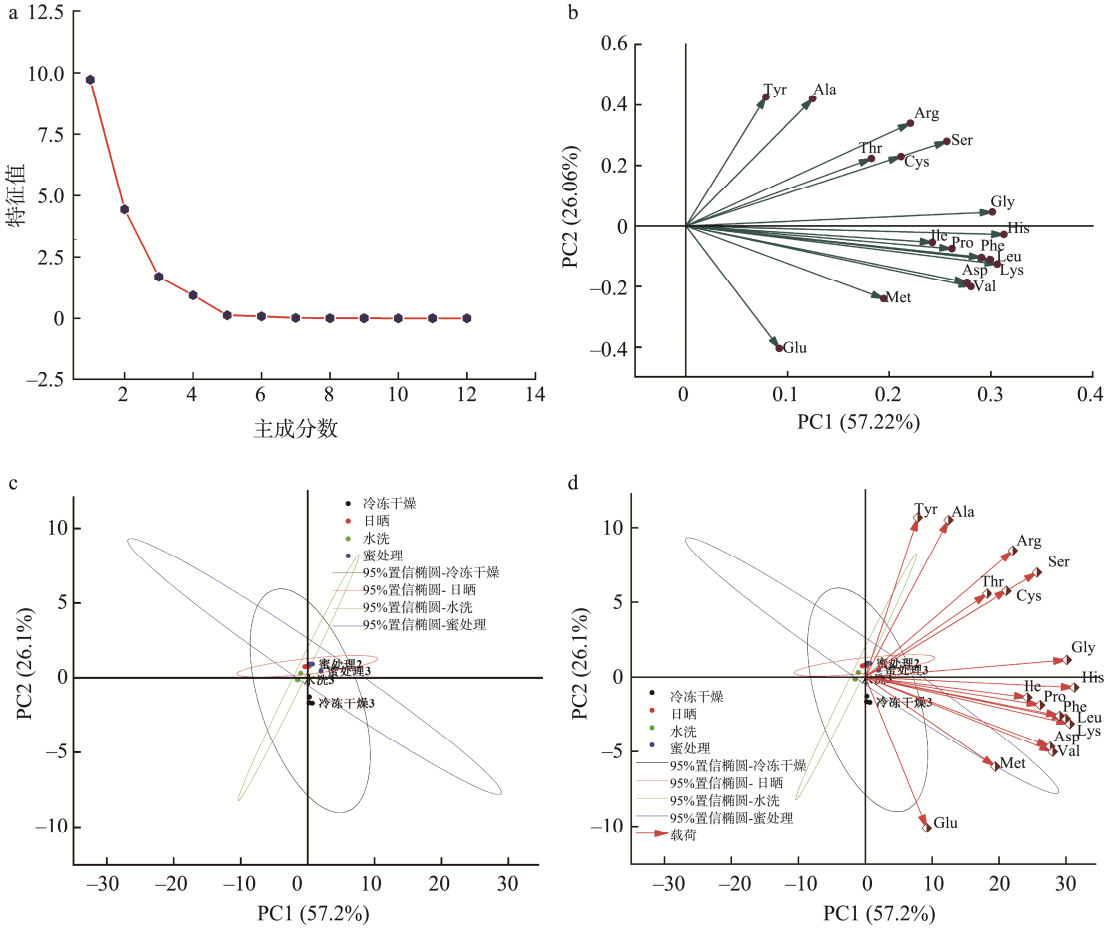
Table 4 Content of taste-active amino acids in coffee beans from different primary processing treatment groups (n=3, mg/g)

氨基酸	冷冻干燥	水洗	日晒	蜜处理
鲜味氨基酸	3.337±0.016^{a}	3.184±0.009^{bc}	3.163±0.019^{c}	3.264±0.062^{ab}
甜味氨基酸	2.469±0.012^{bc}	2.426±0.014^{c}	2.512±0.016^{ab}	2.536±0.038^{a}
苦味氨基酸	4.337±0.020^{ab}	4.213±0.037^{c}	4.321±0.026^{bc}	4.436±0.062^{a}
氨基酸总量	10.144±0.048^{a}	9.823±0.060^{b}	9.996±0.061^{ab}	10.236±0.163^{a}
(鲜味氨基酸/氨基酸总量)/%	32.900±0.010^{a}	32.412±0.107^{b}	31.643±0.003^{d}	31.885±0.102^{c}
(甜味氨基酸/氨基酸总量)/%	24.343±0.014^{d}	24.695±0.007^{c}	25.130±0.008^{a}	24.778±0.017^{b}
(苦味氨基酸/氨基酸总量)/%	42.756±0.023^{c}	42.894±0.114^{bc}	43.227±0.006^{a}	43.337±0.084^{a}

基于载荷图 2b 与双标图 2d 的协同分析，可系统解析游离氨基酸在主成分空间中的贡献特征。研究表明，载荷因子呈正相关关系，即距离越远，该氨基酸对样品间主成分差异的区分能力越强，贡献率亦越高。基于图 2b 的分析结果，发现 4 种不同初加工处理方式的咖啡豆，其主要差异成分涵盖了 Tyr、Ala、Arg、Glu、Ser、Met、Thr 以及 Cys。在 PCA 得分图中，若某一载荷因子位于特定样品的聚集区域内，则意味着该因子与该样品间存在较强的相关性。进一步结合图 2b、图 2c 及图 2d 进行综合分析，可以明确：Glu 与冷冻干燥处理的咖啡豆间具有较高的相关性；Tyr 则与水洗处理的咖啡液表现出较强的相关性；而 Met 与蜜处理咖啡豆间的相关性亦较为显著。

本研究对4种不同初加工方式处理的咖啡豆样品中的游离氨基酸，开展了有监督的OPLS-DA，分析结果如图3所示。根据图 3a 的结果，采用 OPLS-DA 模型能够成功实现对经冷冻干燥、水洗、日晒及蜜处理 4 种不同初加工方式处理的咖啡豆样品的有效区分。同时，针对 OPLS-DA 模型开展了如图 3b 所示的 200 次交叉置换检验分析。分析表明，所得 R^2 与 Q^2 均低于原始的 R^2 和 Q^2，并且 Q^2 回归线与纵轴的截距小于 0。OPLS-DA 分析未出现过拟合现象，进而表明该模型的验证结果有效且具备可行性。在 OPLS-DA 模型中，变量权重值(variable importance in projection, VIP)是衡量变量重要性的关键指标，通常认为 VIP>1 的变量是导致样品间差异的关键成分，且 VIP 越大，该变量对样品类型判别和差异分析的作用越重要。根据图 3c 所示结果，Met、Pro、Tyr、Ile、Glu、Ala、Thr 等 7 种游离氨基酸的 VIP 平均值均超过 1，这一发现与 PCA 分析结果具有较高的一致性。

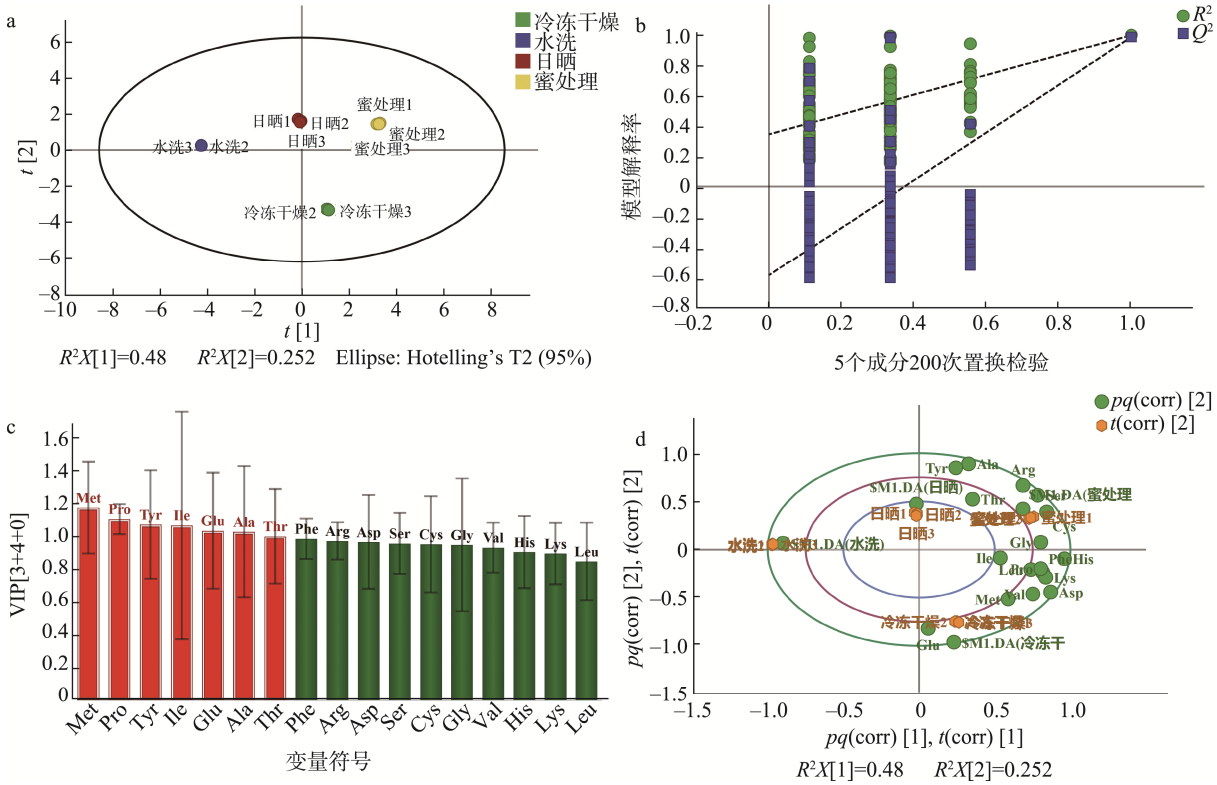
进一步使用 OPLS-DA 的 Biplot 图(图 3d)，通过观察样品观测值与变量在相关分析图中的分布位置，可对影响咖啡豆差异的关键游离氨基酸进行有效筛选。距离样品观测值越近的变量，其在对应样品中的贡献度越大，即对样品间差异的解释作用越显著。4 种不同初加工方式处理的咖啡豆样本，其观测值分别落于 3 个不同的象限区域。水洗处理与日晒处理的咖啡豆观测值均集中于第一象限，水洗处理组的观测点更趋近于 X 轴方向，日晒处理组的观测点则靠近 Y 轴。水洗处理组样本周围未观察到有显著靠近



注：a. 碎石图；b. 载荷图；c. 得分图；d. 双标图。

图 2　不同初加工处理咖啡豆游离氨基酸的 PCA 结果

Fig.2　PCA results of free amino acids in different primary processed coffee beans



注: a. OPLS-DA 得分图; b. 模型置换检验图; c. VIP 得分图; d. Bipiot 图。

图 3 不同初加工处理咖啡豆游离氨基酸的 OPLS-DA 分析

Fig.3 OPLS-DA analysis of free amino acids in different primary processed coffee beans .

的氨基酸变量; 在日晒处理组中, Thr 表现出与观测值较为接近的空间位置关系。蜜处理咖啡豆的观测值落于第二象限。分析发现, Arg、Ser 和 Cys 这 3 种氨基酸在该处理组中贡献值显著, 构成了蜜处理咖啡豆中关键的特征滋味游离氨基酸, 对蜜处理咖啡豆独特风味的形成起着重要作用。冷冻干燥处理组的咖啡豆观测值在分析图示中集中呈现于第四象限, 在该处理组中, Glu 对咖啡豆风味特征的贡献最为突出, 是决定冷冻干燥处理咖啡豆独特品质的关键成分。因此, 综合图 2 与图 3 的研究结果, 筛选出 Tyr、Thr、Arg、Glu 4 种游离氨基酸, 分别是水洗处理、日晒处理、蜜处理以及冷冻干燥处理这 4 种方式处理的咖啡豆样品中的关键特征滋味成分。

3 讨 论

3.1 不同初加工处理方式对咖啡豆游离氨基酸含量及组成的影响

不同的初加工处理方式, 如冷冻干燥、日晒法、水洗法以及蜜处理等, 在咖啡豆的加工流程中扮演着关键角色, 它们对咖啡最终呈现出的风味品质有着重要影响。初加工处理方式通过影响咖啡豆的发酵程度、干燥条件及果胶层保留情况, 进而影响游离氨基酸的含量及组成[22]。冷冻干燥通过低温控制和真空环境形成双重保护机制, 抑制了氨基酸与脂类、醌类化合物的氧化反应, 从而保护了 Asp、Pro 等易降解氨基酸的稳定性, 这种特性在延长咖啡豆保质期的同时, 也维持了氨基酸的原始组成比例[23]。蜜处理法因保留部分果胶层并在日晒过程中控制发酵, 为氨基酸的生成提供了有利条件, 显著提升了咖啡豆中游离氨基酸的总量[24]。日晒法处理的咖啡豆中游离氨基酸总量相对较低, 这可能与干燥过程中长时间暴露于外界环境, 导致部分氨基酸降解或转化有关。此外, 干燥不均或过度干燥还可能引起咖啡豆品质下降, 进一步影响氨基酸含量[25]。水洗法通过去除咖啡果实外皮和果胶后进行发酵和干燥, 有效减少了杂质和瑕疵豆的产生。然而, 水洗过程中发酵条件的控制对氨基酸含量有显著影响[26]。研究显示, 水洗法处理的咖啡豆中游离氨基酸总量较自然干燥法有所提升, 但不同发酵时间和温度条件下, 氨基酸含量的变化存在差异。适度的发酵可以促进氨基酸的生成, 但过度发酵则可能导致氨基酸损失[27]。高子琪等[28]开展了一项研究, 聚焦于 3 种初加工处理方式对云南小粒咖啡中游离氨基酸组成及含量的影响。研究结果显示, 经水洗法初加工的咖啡液, 其蛋白质与游离氨基酸含量相对较高, 这一特性可能赋予咖啡液更为优良的感官品质; 而采用蜜处理和日晒法处理的样品, 其因氨基酸产生的感官体验则相对较弱。在本研究中, 针对 4 组经不同初加工方式处理的瑞丽小粒咖啡生豆样品

进行检测分析, 结果显示, 所有样品均含有 17 种游离氨基酸, 然而其在含量、组成分布以及所占比例方面均存在显著差异。TAA 以蜜处理组咖啡豆含量最高, 冷冻干燥处理组第二, 水洗处理组含量最低。蜜处理组咖啡豆的 TAA、EAA 和 NEAA 含量均比其他组高, 水洗处理组咖啡豆的 TAA、EAA 和 NEAA 含量则相对较低。

3.2　不同初加工处理方式对咖啡豆呈味氨基酸含量及组成的影响

咖啡风味的形成与多种因素相关, 其中呈味氨基酸是重要的前体物质。咖啡豆中的游离氨基酸作为风味前体物质, 其种类、含量及组成通过美拉德反应、斯特克降解等化学反应显著影响后续焙烤风味形成[29]。游离氨基酸的氨基与还原糖(如葡萄糖、果糖)在加热时发生聚合、缩合, 生成吡嗪类、呋喃类、醛类、酮类等挥发性风味物质[30]。不同氨基酸参与反应生成的产物差异显著, 例如, Leu 参与反应可能生成更多支链醛类, 增强焦糖香; Asp 则可能促进呋喃类形成[31]。α-氨基酸与二羰基化合物(如美拉德反应中间产物)反应, 生成醛类、酮类及氨类化合物[32]。生成含硫化合物(如甲硫醇、二甲基二硫), 赋予咖啡焦香、硫磺味(尤其罗布斯塔咖啡中含量更高), 产生短链挥发性物质(如双乙酰、丙酮醛), 但过量可能产生异味(如洋葱味)[33]。烘焙过程中, 结合态氨基酸(如蛋白质中的氨基酸)受热降解, 释放游离氨基酸参与反应, 进一步丰富风味物质, 蛋白质降解产物(如多肽、小分子肽)可能通过催化作用促进美拉德反应, 增强风味复杂性[34]。游离氨基酸总量越高, 焙烤过程中参与反应的潜力越大, 生成的挥发性香气成分(如醛类、吡嗪类)越丰富, 风味强度更高[35]。特定氨基酸比例影响风味平衡, 如 Glu 和 Asp 等呈味氨基酸的增加, 提升了咖啡的鲜味和甜味; 而芳香族氨基酸的增加, 则增强了咖啡的香气复杂度[36]。

日晒法处理的咖啡豆中, 部分易降解氨基酸含量较低; 而水洗法和半水洗法通过控制发酵条件, 保留了更多种类的氨基酸[37]。蜜处理法则因保留部分果胶层, 在发酵过程中促进了特定氨基酸的生成, Glu 和 Asp 等呈味氨基酸的含量显著增加, 这些氨基酸对咖啡的鲜味和甜味有重要贡献[38]。尤其是黑蜜处理, 其 Glu 和 Asp 含量较其他处理方式高出 20%以上。此外, 芳香族氨基酸如 Phe、Tyr 等在蜜处理法中也表现出较高的含量, 增强了咖啡的香气复杂度[39]。本研究对瑞丽小粒咖啡豆呈味氨基酸的研究表明, 蜜处理组的甜味和苦味氨基酸总含量最高, 鲜味氨基酸总含量最高的为冷冻干燥处理组, 水洗处理组的甜味和苦味氨基酸总含量均最低, 日晒处理组的鲜味氨基酸总含量相对较低。本研究结果与其他研究者的结论存在差异。高子琪等[28]开展了一项关于不同初加工处理对云南小粒咖啡豆呈味氨基酸影响的研究。研究发现, 不同初加工处理方式下, 咖啡豆的呈味氨基酸总含量存在明显差异。具体而言, 经过水洗法处理的咖啡豆, 鲜味与甜味氨基酸的总含量最高; 采用日晒法处理的咖啡豆, 苦味氨基酸总含量最高; 而经蜜处理的咖啡豆, 其鲜味、苦味和甜味氨基酸的总含量在三者中最低。不同的研究结果均显示, 在对采用不同初加工方式处理的咖啡豆进行研究时, 观察到咖啡豆中的呈味氨基酸与风味物质存在显著的相关关系。此结果进一步从实证角度证实了氨基酸在咖啡风味形成机制中占据着关键地位。

4　结　论

本研究对 4 种不同初加工处理的咖啡豆游离氨基酸进行分析测定, 结果表明: 冷冻干燥、水洗、日晒、蜜处理 4 种不同初加工方式咖啡液样品中检测到了 17 种游离氨基酸, 不同初加工处理的咖啡豆氨基酸总含量依次为 10.144、9.823、9.996、10.236 mg/g。深入探究其游离氨基酸组成结构后发现, 这 4 种初加工处理的咖啡豆在游离氨基酸组成上具有显著差异, 具体表现为各类呈味游离氨基酸的含量在不同处理组中互有高低, 反映出初加工处理对咖啡豆游离氨基酸组成有着复杂且显著的影响。通过深入运用 PCA 以及 OPLS-DA 这两种多元统计分析方法, 对不同初加工处理咖啡豆样品中的游离氨基酸进行系统性剖析。研究结果表明, Tyr、Thr、Arg、Glu 分别成为水洗处理、日晒处理、蜜处理和冷冻干燥处理这 4 种处理方式下咖啡豆样品中的关键特征滋味游离氨基酸, 在塑造咖啡豆独特滋味方面发挥着最为突出的作用, 即对咖啡豆滋味的贡献率达到最大。

本研究聚焦不同初加工处理对咖啡豆游离氨基酸及呈味氨基酸组成和含量的影响, 通过对比冷冻干燥法、水洗法、日晒法和蜜处理法等 4 种初加工方式, 结合氨基酸分析技术, 揭示了初加工处理与咖啡豆游离氨基酸及呈味氨基酸含量间的关联。研究发现, 不同初加工处理显著影响咖啡豆的氨基酸组成及含量, 进而影响咖啡风味。研究结果为咖啡产业优化初加工工艺、提升咖啡品质提供了科学依据。

参考文献

[1] 杨贵兵, 岑庆静, 任二芳, 等. 近 20 年国际咖啡产业研究进展与发展趋势[J]. 农业研究与应用, 2024, 37(5/6): 444–454.
YANG GB, CEN QJ, REN ERF, *et al*. Research progress and development trends in international coffee industry over last two decades [J]. Journal of Agricultural Research and Application, 2024, 37(5/6): 444–454.

[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 JX, LV YL, LI WR, *et al*. Report on china coffee industry in 2022 [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2023, 46(4): 1–5.

[3] 周勇, 操粮骏, 何泽娟, 等. 超低温对咖啡豆中非挥发性风味品质及超

微结构的影响[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(3): 89–101.
ZHOU Y, CAO LJ, HE ZJ, *et al*. Effect of ultra-low temperature on non-volatile flavor quality and ultrastructure of coffee beans [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(3): 89–101.

[4] 杨莉, 常国银, 洪清青, 等. 不同品种小粒咖啡主要滋味物质指纹图谱分析[J]. 农产品加工, 2025(4): 40–44, 50.
YANG L, CHANG GY, HONG QQ, *et al*. Fingerprint analysis of main taste substances of diferent varieties of small cofee [J]. Agricultural Products Processing, 2025(4): 40–44, 50.

[5] 陈云兰, 陈治华, 蒋快乐, 等. 不同初加工工艺对云南阿拉比卡咖啡品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(2): 149–156, 192.
CHEN YL, CHEN ZH, JIANG KL, *et al*. Influence of different primary process on the quality of Arabica coffee in Yunnan Province [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(2): 149–156, 192.

[6] 李晓芹, 方志娟, 何新叶, 等. 咖啡豆烘焙前后 16 种氨基酸成分变化及营养评价[J]. 农产品质量与安全, 2023(4): 26–32.
LI XQ, FANG ZJ, HE XY, *et al*. Compositional changes of 16 amino acids in coffee beans during roasting and corresponding nutritional evaluation [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2023(4): 26–32.

[7] 鲁翀, 于鑫欣, 胡发广, 等. 厌氧发酵对云南小粒咖啡香气特征的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 1–12, 44.
LU C, YU XX, HU FG, *et al*. Effect of anaerobic fermentation on the aroma characteristics of Yunnan Arabica coffee [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 1–12, 44.

[8] HE W, CHEN X, SUN J, *et al*. Unveiling key aroma compounds formation during the roasting process of Yunnan Arabica coffee using molecular sensory science approaches [J]. Food Chemistry, 2025, 494: 145853.

[9] SHEN XJ, ZI CT, YANG YJ, *et al*. effects of different primary processing methods on the flavor of coffea Arabica beans by metabolomics [J]. Fermentation, 2023, 9(8): 717.

[10] 万黎. 三种初加工方式的云南小粒咖啡次生代谢产物及活性研究[D]. 昆明: 云南农业大学 2024.
WAN L. Study on secondary metabolites and bioactivities of Yunnan Arabica coffee processed by three primary processing methods [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2024.

[11] 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.
ZHOU YX, LU KH, LIU QM, *et al*. Research progress on coffee flavor components [J]. Food Science, 2025, 46(10): 387–396.

[12] 胡发广, 毕晓菲, 黄家雄, 等. 小粒咖啡初加工方法概述[J]. 农产品加工, 2017(6): 66–68, 70.
HU FG, BI XF, HUANG JX, *et al*. Summary of initial processing methods of *Cofea arabica* L [J]. Agricultural Products Processing, 2017(6): 66–68, 70.

[13] 肖克, 翟慧楠, 胡荣锁, 等. 不同初加工方法对咖啡豆风味化合物和感官特性的影响[J]食品工业科技, 2025, 46(1): 22–32.
XIAO K, ZHAI HN, HU RS, *et al*. Effect of different primary processing methods on flavor compounds and sensory characteristics of coffee beans [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 22–32.

[14] 翟慧楠. 不同初加工处理云南咖啡风味化学组成及品质研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
ZHAI HN. Study on the flavor chemical components and quality of Yunnan coffee prepared by different primary processing [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.

[15] 施雪颖. 不同品种、产地和加工方式烘焙咖啡豆的风味特征研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024.
SHI XY. Research on the flavor characteristics of roasted coffee beans with different varieties, origins, and processing [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.

[16] 黄梅, 张映萍, 廖方平, 等. 不同干燥方式对草果理化特征及香气的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 309–317.
HUANG M, ZHANG YP, LIAO FP, *et al*. Effects of different drying methods on physicochemical characteristics and aroma of *Amomum* tsaoko [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 309–317.

[17] NOOR AF, FAN Z. Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties [J]. Food Chemistry, 2023, 412: 135489.

[18] FIGUEROA CGA, SAGU ST, SARAVIA C, *et al*. Comparison of batch and continuous wet-processing of coffee: Changes in the main compounds in beans, by-products and wastewater [J]. Foods, 2020, 9: 1135.

[19] DIAS EC, BOREM FM, PEREIRA RGFA, *et al*. Amino acid profiles in unripe Arabica coffee fruits processed using wet and dry methods [J]. European Food Research and Technology, 2012, 234: 25–32.

[20] 孙娟娟, 阿拉木斯, 赵金梅, 等. 6 个紫花苜蓿品种氨基酸组成分析及营养价值评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(13): 2359–2367.
SUN JJ, A LMS, ZHAO JM, *et al*. Analysis of amino acid composition and six native alfalfa cultivars [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(13): 2359–2367.

[21] 王晓媛. 基于脂质的咖啡风味品质形成及活性成分研究[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
WANG XY. Research on the formation of coffee flavor quality and active ingredient based on lipids [D]. Nanning: Guangxi University, 2024.

[22] 毕晓菲, 张晓芳, 付兴飞, 等. 不同咖啡鲜果初加工方法对产品品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2023, 23(8): 35–39.
BI XF, ZHANG XF, FU XF, *et al*. Effects of different initial processing methods on the qualities of fresh coffee fruits [J]. Storage and Process, 2023, 23(8): 35–39.

[23] 田亚容. 预冻速率及冻干温度对立体冻干咖啡品质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2023.
TIAN YR. Effects of pre-freezing rates and freeze-drying temperatures on the quality of stereoscopic freeze-dried coffee [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.

[24] 王彦兵. 云南小粒咖啡风味品质形成关键因子及提升研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
WANG YB. Study on the key factors and improvement of flavor quality of Yunnan arabica coffee [D]. Nanning: Guangxi University, 2023.

[25] 施雪颖, 李娜, 李玥, 等. 烘焙程度对云南日晒和水洗咖啡豆理化性质及风味物质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(12): 396–413.
SHI XY, LI N, LI Y, *et al*. Effect of roasting degree on physicochemical properties and flavor substances of Yunnan sun-dried and washed coffee beans [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(12): 396–413.

[26] 王彦雪. 人工控制咖啡鲜果发酵条件对咖啡品质影响研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
WANG YX, Study on the influence of artificial control of coffee fruit fermentation conditions on coffee quality [D]. Kunming: Yunnan

Agricultural University, 2023.

[27] 张树竹, 薛笑然, 孔德婷, 等. 云南小粒种咖啡初加工技术及生物脱胶应用展望[J]. 热带农业科技, 2023, 46(2): 33–37.
ZHANG SZ, XUE XR, KONG DT, *et al*. Application prospect for primary processing technology and biological degumming of coffea Arabica in Yunnan Province [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2023, 46(2): 33–37.

[28] 高子琪, 李泽林, 牛之瑞, 等. 不同初加工方式云南小粒咖啡游离氨基酸差异及其呈味机制[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 22–31.
GAO ZQ, LI ZL, NIU ZR, *et al*. Difference of free amino acids in different primary processed Yunnan arabica coffee and its taste forming mechanism [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 22–31.

[29] WANG B, MARJANNE JV, VINCENZO F, *et al*. Generation of Maillard reaction-derived flavour compounds in coffee analogues by an extrusion-based solid model system [J]. Food Chemistry, 2025, 492(3): 145552.

[30] 张桅儇, 吴国泰, 王晓禹, 等. 咖啡豆化学成分发现及药用价值研究现状[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(5): 57–66.
ZHANG YX, WU GT, WANG XY, *et al*. Advances on the chemical composition and medicinal value of coffee beans [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2022, 41(5): 57–66.

[31] JOON KM, TAKAYUKI S. Role of roasting conditions in the profile of volatile flavor chemicals formed from coffee beans [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(13): 5823–5831.

[32] JIANG ZD, HAN ZS, ZHU MT, *et al*. Effects of thermal processing on transformation of polyphenols and flavor quality [J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 51: 101014.

[33] NEUS DS, BEATRIZ QC, STEFANIA V, *et al*. Volatile thiols in coffee: A review on their formation, degradation, assessment and influence on coffee sensory quality [J]. Food Research International, 2016, 89(12): 982–988.

[34] ZHAO D, LI Y, DUAN ZY, *et al*. Revealing flavor improvement in whey-based cold brew coffee: Characteristic flavor compounds and formation mechanisms [J]. Food Chemistry, 2025, 494: 146038.

[35] NANCY C, MARIO FA, FABIAN LM, *et al*. Coffee extraction: A review of parameters and their influence on the physicochemical characteristics and flavour of coffee brews [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 45–60.

[36] 陈云兰, 李积华, 陈文进, 等. 云南 4 个产区咖啡豆的主要风味成分及感官品质分析[J]. 热带作物学报, 2024, 45(7): 1445–1454.
CHEN YL, LI JH, CHEN WJ, *et al*. Analysis of main flavor components and sensory quality of coffee beans from four production areas in Yunnan [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(7): 1445–1454.

[37] 吴建, 蒋快乐, 时玲, 等. 云南小粒种咖啡初加工工艺发展现状及趋势[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(11): 205–213.
WU J, JIANG KL, SHI L, *et al*. Development status and trend of Yunnan Arabica coffee primary processing [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(11): 205–213.

[38] 弘子姗, 谭超, 杨宁. 体外模拟发酵对咖啡理化性质及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 54–59.
HONG ZS, TAN C, YANG N. Effects of *in vitro* digestion on the physicochemical property and quality of Arabica coffee [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(4): 54–59.

[39] 杨莉, 刘祥江, 李孙洋, 等. 不同初加工方式云南咖啡精油特征香气成分分析[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(3): 198–206.
YANG L, LIU XJ, LI SY, *et al*. Analysis of characteristic aroma components in Yunnan coffee essential oil with different primary processing methods [J]. China Food Additives, 2025, 36(3): 198–206.

(责任编辑: 韩晓红　冯东慧)