

基于非靶向代谢组学分析不同温度发酵荔枝酒氨基酸及其衍生物代谢产物差异

陈利平, 胡雪灵, 刘梦桐, 彭永聪, 石章岩, 张琳, 钟秋平*

(海南大学食品科学与工程学院, 海南 海口 570203)

摘要: 为阐明发酵温度对荔枝酒氨基酸及其衍生物代谢产物组成的影响, 采用液相色谱-质谱结合多元统计分析探究10、20、30 °C发酵温度下荔枝酒的氨基酸及其衍生物差异, 通过京都基因与基因组百科全书代谢通路富集分析揭示温度对氨基酸及其衍生物代谢路径的调控机制。结果表明, 共鉴定出92种氨基酸及其衍生物, 经变量投影重要性值 >1 且 $P<0.05$ 筛选获得80种差异代谢物。30 °C发酵样品中缬氨酸、 γ -氨基丁酸等物质相对含量较高; 20 °C发酵样品中亮氨酸、苯丙氨酸等相对含量最高; 10 °C条件不利于氨基酸保留与代谢。多元统计分析显示, 不同温度下, 满足筛选条件且 P 值位列前10的上调差异代谢物组成特征各异: 10 °C发酵主要富集阿莫西林、 N -乙酰- L -酪氨酸等; 20 °C组和30 °C组均以2-氨基异丁酸、3-氨基丁酸、2-氨基丁酸等为主; 与未发酵组相比, 在不同温度下上调的氨基酸及衍生物之间存在着一系列具有统计学意义($P<0.05$)的正相关关系及负相关关系; 差异代谢物通路以精氨酸和脯氨酸代谢为主, 20 °C组差异丰度评分最高。综上, 20 °C条件下发酵荔枝酒较有利于氨基酸的利用及生物转化。

关键词: 荔枝酒; 温度; 氨基酸; 液相色谱-质谱联用法; 代谢组学

Differential Analysis of Amino Acids and Their Derivative Metabolites in Lychee Wine Fermented at Different Temperatures Based on Untargeted Metabolomics

CHEN Liping, HU Xueling, LIU Mengtong, PENG Yongcong, SHI Zhangyan, ZHANG Lin, ZHONG Qiuping*

(School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570203, China)

Abstract: To elucidate the effect of fermentation temperature on the composition of amino acid and derivative metabolites in lychee wine, the differences in amino acids and their derivatives in lychee wine fermented at 10, 20, and 30 °C were investigated with liquid chromatography-mass spectrometry combined with multivariate statistical analysis. The regulatory mechanism of temperature on the metabolic pathways of amino acids and their derivatives was revealed by Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (KEGG) metabolic pathway enrichment analysis. The results showed that a total of 92 amino acids and their derivatives were identified, and 80 differential metabolites were screened based on the variable importance in projection (VIP) value >1 and $P<0.05$. The relative contents of valine, γ -aminobutyric acid, and other substances were higher in samples fermented at 30 °C; the relative contents of leucine, phenylalanine, and others were the highest in samples fermented at 20 °C; while 10 °C was not conducive to the retention and metabolism of amino acids. Multivariate statistical analysis revealed that the composition characteristics of the top 10 up-regulated differential metabolites (meeting the screening criteria and ranked by P -value) varied significantly at different temperatures: fermentation at 10 °C was mainly enriched with amoxicillin, N -acetyl- L -tyrosine, etc.; the 20 and 30 °C groups shared common features, dominated by 2-aminoisobutyric acid, 3-aminobutyric acid, 2-aminobutyric acid, etc. Compared with the unfermented group, a series of statistically significant ($P<0.05$) positive and negative correlations existed among the up-regulated amino acids and their derivatives at different temperatures. The differential metabolite pathways were mainly arginine and proline metabolism, with the highest differential abundance score

收稿日期: 2025-07-07

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目 (32360586)

第一作者简介: 陈利平 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为果蔬精深加工。E-mail: 1025034673@qq.com

*通信作者简介: 钟秋平 (1966—), 男, 教授, 博士, 研究方向为果蔬精深加工。E-mail: 990511@hannanu.edu.cn

observed at 20 °C. In conclusion, fermentation of lychee wine at 20 °C was more favorable for the utilization and biotransformation of amino acids.

Keywords: lychee wine; temperature; amino acid; liquid chromatography-mass spectrometry; metabolomics

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.010

中图分类号: TS262.7

文献标志码: A

文章编号: 0254-5071 (2026) 05-0074-10

引文格式:

陈利平, 胡雪灵, 刘梦桐, 等. 基于非靶向代谢组学分析不同温度发酵荔枝酒氨基酸及其衍生物代谢产物差异[J]. 中国酿造, 2026, 45(5): 74-83. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.010. <http://www.chinabrewing.net.cn>

CHEN Liping, HU Xueling, LIU Mengtong, et al. Differential analysis of amino acids and their derivative metabolites in lychee wine fermented at different temperatures based on untargeted metabolomics[J]. China Brewing, 2026, 45(5): 74-83. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.010. <http://www.chinabrewing.net.cn>

荔枝果肉富含多种氨基酸, 可作为酿酒酵母生长繁殖的氮源, 在其作用下形成其他氨基酸及代谢产物^[1-2]。荔枝酒系采用新鲜或冻藏荔枝经酿酒酵母在一定温度下发酵而成^[3]。凭借其独特果香与丰富营养, 已成为果酒领域研究热点^[4]。当前研究多集中于品种^[5]、酿酒酵母^[6]、工艺条件^[7]、风味成分^[8]等方面, 发酵温度是影响酿酒酵母利用氨基酸氮源的关键因素, 通过调控酶活性和微生物代谢通路显著影响果酒品质^[9]。研究表明, 12 °C 的低温可抑制酵母代谢速率, 延长发酵周期, 稳定氨基酸组成; 温度波动则会打破氨基酸代谢平衡, 如15 °C 发酵的酒体中风味氨基酸(如缬氨酸、亮氨酸)含量波动达34%, 直接影响酒体风味的协调性^[10]。

在荔枝及荔枝酒氨基酸的基础研究中, 高敏等^[11]发现低温可使发酵平缓, 有效控制挥发酸含量, 且成品酒香气最佳; 邓开野等^[12]证实不同温度发酵产生的香气物质种类一致但含量有差异, 低温利于香气成分保留; 沈颖等^[10]则明确丙氨酸是荔枝汁及发酵酒中的主体氨基酸, 12 °C 发酵酒样贮藏期间氨基酸组成稳定性显著优于15 °C 组。荔枝酒中的甜味、苦味、鲜味及功能性氨基酸可通过Strecker降解、美拉德反应等途径生成高级醇、酯类及含氮杂环化合物, 赋予酒体复杂风味^[13-14]。强化L-苯丙氨酸可提升2-苯乙醇、乙酸-2-苯乙酯、异丁酸-2-苯乙酯及己酸-2-苯乙酯的生成量^[15], 强化异亮氨酸能促进活性戊醇及其酯类积累^[16], γ -氨基丁酸与葡萄糖的美拉德反应, 可通过生成Amadori重排产物显著降低酒体涩味^[17]。

尽管上述研究为荔枝酒氨基酸代谢提供了基础数据, 但仍存在明显不足: 多聚焦单一品种、单一温度或静态终点分析, 缺乏对多温度梯度下氨基酸代谢流向调控机制, 以及氨基酸与有机酸等其他代谢通路协同关联的系统解析。氨基酸作为荔枝酒关键香气成分的核心前体, 其代谢直接影响酒体风味, 现有机制空白阻碍了

品质精准优化。非靶向代谢组学可无偏向检测生物样本中所有小分子代谢产物, 比较生物样本在外界环境刺激或干扰前的代谢物水平变化^[18], 已被广泛应用于发酵食品的代谢产物差异分析^[19-20]。张雅欣等^[21]将其用于特色寒地浆果滋味品质研究; 钱园凤等^[22]分析崇觉罗汉茶化学成分; 陈泓帆^[23]揭示低温低盐发酵大头菜挥发性代谢物时序变化及相关通路。但目前基于该技术的荔枝酒氨基酸组分研究仍较缺乏, 因此开展相关研究极具必要性。

本研究以10、20、30 °C 发酵的荔枝酒为研究对象, 基于非靶向代谢组学技术分析不同温度条件下发酵荔枝酒中氨基酸及其衍生物代谢组分的变化, 通过多元统计分析筛选差异代谢物及其代谢通路, 旨在为荔枝酒酿工艺优化制提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

妃子笑荔枝采于海南海口荔枝种植基地, 含糖量为15.1~18.6 °Brix; 酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*) DV10 烟台曼森商贸有限公司。

超纯水 长江和记实业有限公司; 偏重亚硫酸氢钾 国药集团化学试剂有限公司; 甲醇、乙腈、异丙醇(色谱纯) 德国CNW公司; 乙酸(色谱纯) 美国Sigma-Aldrich公司。

1.2 仪器与设备

Vanquish超高效液相色谱仪、Orbitrap Exploris 120 高分辨质谱仪、Heraeus Fresco17离心机 美国Thermo Fisher Scientific公司; BSA124S-CW天平 德国Sartorius公司; PS-60AL超声仪 深圳市雷德邦电子有限公司; JXFSTPRP-24匀浆机 上海净信实业发展有限公司; LGJ-10C冷冻干燥机 四环福瑞科仪科技发展(北京)有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品的制备

新鲜荔枝去皮、去核、打浆、过滤，得到含糖量17.3 °Brix、pH 5.1的荔枝果汁。向荔枝果汁中加入偏重亚硫酸氢钾，使有效SO₂质量浓度达到120 mg/L。静置2 h后，接入0.2 g/L于35 °C活化的酿酒酵母，分别置于10、20、30 °C恒温条件下发酵，发酵液液面平静时即发酵完成，取发酵完成后样品进行检测。K组为未发酵组（对照），D、E、F组分别为30、20、10 °C发酵终点酒样组。

1.3.2 代谢物提取液的制备

移取100 μL液体样品至EP管中，加入400 μL提取溶剂（甲醇：乙腈=1:1（V/V），含6种同位素标记内标，分别为2.4 μmol/L吡啶-3-乙-2,2-D₂酸、0.16 μmol/L癸酸-D₁₉、0.09 μmol/L甘氨酸-D₄、8 μmol/L L-亮氨酸-5,5,5-D₃、0.5 μmol/L [2H₅]-反玉米素、3.5 μmol/L邻苯二甲酸二异丁酯-D₄）；涡旋混匀30 s，冰水浴超声10 min；-40 °C静置1 h；4 °C、12 000 r/min离心15 min，取上清液^[24]，在相同条件下再次离心，所得最终上清液即为代谢物提取液。

1.3.3 氨基酸及其衍生物的测定

氨基酸及其衍生物的测定采用液相色谱-质谱法。

色谱条件：Phenomenex Kinetex C₁₈色谱柱（2.1 mm × 50 mm，2.6 μm），柱温25 °C，进样体积2 μL；检测波长210 nm。流动相：A相为0.01%乙酸水溶液，B相为异丙醇：乙腈（1:1，V/V），流速为0.3 mL/min。

质谱条件：电喷雾电离源，正、负离子扫描模式采集质谱信号。鞘气流量：50 Arb；辅助气流量：15 Arb；毛细管温度：320 °C；吹扫气流量：1 Arb；汽化器温度：350 °C。全扫描质谱分辨率：60 000；二级质谱分辨率：15 000；碰撞能量：阶梯式归一化碰撞能量20/30/40 eV；喷雾电压：+3.8 kV（正离子模式）/-3.4 kV（负离子模式）。

定性定量：使用Compound Discoverer 3.0软件处理原始数据，进行峰提取、峰对齐及积分。采用总峰面积归一化法进行数据校正。代谢物定性通过与mzCloud（<http://www.mzcloud.org>）和ChemSpider（<http://www.chemspider.com/>）数据库比对完成。采用峰面积归一化法进行相对定量。

1.4 数据处理

原始数据经ProteoWizard软件转换为mzXML格式。使用自主编写的R包进行代谢物鉴定（基于BiotreeDB v3.0数据库进行峰提取、峰对齐和积分）及可视化分析。使用SIMCA v18.0.1进行主成分分析（principal component analysis, PCA）和正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA）。为了验证模型的质量，用7折交叉验证进行检验，借助

自主编写的R包结合京都基因与基因组百科全书（Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG）数据库及MetaboAnalyst工具进行代谢通路富集分析。

2 结果与分析

2.1 不同温度发酵条件下荔枝酒氨基酸及其衍生物代谢产物

在所有样品中共检测出92种氨基酸及其衍生物，以变量投影重要性（variable importance in projection, VIP）值>1且P<0.05进行差异代谢物筛选^[25]，不同温度发酵荔枝酒中筛选出的氨基酸类差异物质28种，衍生类差异物质42种，非氨基酸类物质10种，共80种。由表1可知，在筛选到的20种氨基酸中，包括8种必需氨基酸（赖氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、甲硫氨酸（蛋氨酸）、异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸和组氨酸）和12种非必需氨基酸。发酵组与未发酵组的氨基酸种类未见差异，但含量变化明显，但总氨基酸含量均显著下降。所有发酵酒样中的主要氨基酸均为γ-氨基丁酸和脯氨酸。不同温度发酵组间氨基酸含量差异显著：缬氨酸、γ-氨基丁酸、天门冬氨酸、瓜氨酸、肌氨酸在D组含量最高；丝氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、色氨酸、酪氨酸、赖氨酸、鸟氨酸、组氨酸、谷氨酸在E组含量最高；脯氨酸在F组含量最高。这表明20 °C发酵更有利于荔枝酒中多种氨基酸类物质的累积，而10 °C条件不利于氨基酸类物质积累。

表1 不同温度发酵荔枝酒差异氨基酸及其衍生物测定结果
Table 1 Determination of differential amino acids and their derivatives in lychee wine fermented at different temperatures

名称	CAS	相对峰面积			
		K	D	E	F
组氨酸	71-00-1	1.69±0.13 ^a	0.09±0.01 ^{bc}	0.19±0.03 ^b	0.02±0.01 ^c
烟尿酸	583-08-4	0.24±0.06 ^b	0.66±0.17 ^{ab}	0.97±0.54 ^{ab}	1.59±0.91 ^a
缬氨酸	72-18-4	4.61±0.54 ^a	1.53±0.49 ^b	0.86±0.12 ^{bc}	0.14±0.09 ^c
天门冬氨酸	56-84-8	1.11±0.45 ^a	0.10±0.02 ^b	0.03±0.01 ^b	0.02±0.01 ^b
丝氨酸	56-45-1	8.20±1.50 ^a	0.58±0.04 ^b	0.76±0.15 ^b	0.09±0.01 ^b
色氨酸	73-22-3	7.83±0.18 ^a	0.46±0.16 ^{bc}	0.92±0.51 ^b	0.05±0.01 ^c
脯氨酸	147-85-3	2.14±0.17 ^a	11.73±0.51 ^{ab}	10.96±0.15 ^b	12.14±0.78 ^a
鸟氨酸	70-26-8	0.66±0.02 ^a	0.19±0.11 ^b	0.73±0.14 ^a	0.06±0.03 ^b
亮氨酸	61-90-5	7.24±0.40 ^a	1.64±0.26 ^c	2.76±0.39 ^b	0.36±0.31 ^d
酪氨酸	60-18-4	2.66±0.09 ^a	0.51±0.09 ^c	0.77±0.14 ^b	0.23±0.07 ^d
赖氨酸	65-15-4	0.63±0.06 ^a	0.42±0.10 ^b	0.77±0.15 ^a	0.02±0.02 ^c
精氨酸	74-79-3	26.99±4.19 ^a	0.06±0.04 ^b	0.36±0.20 ^b	0.20±0.13 ^b
肌氨酸	107-97-1	3.37±0.19 ^a	1.59±0.25 ^b	0.69±0.11 ^c	0.21±0.03 ^d
瓜氨酸	372-75-8	0.15±0.04 ^a	0.14±0.00 ^b	0.08±0.01 ^b	0.08±0.02 ^b
谷氨酸	56-86-0	0.84±0.08 ^a	0.58±0.02 ^{ab}	0.77±0.04 ^a	0.53±0.11 ^b
γ-氨基丁酸	56-12-2	3.84±0.16 ^a	24.45±0.53 ^a	18.78±0.89 ^b	18.46±4.60 ^b
苯丙氨酸	63-91-2	35.62±0.23 ^a	2.20±0.30 ^c	4.86±0.85 ^b	0.37±0.06 ^d
L-酵母氨酸	997-68-2	3.39±0.64 ^a	5.61±0.20 ^a	4.25±0.20 ^b	4.50±0.48 ^b
苯丙氨酸-脯氨酸	7669-65-0	0.04±0.00 ^b	0.09±0.06 ^b	0.26±0.07 ^a	0.02±0.00 ^b
3-甲基丁胺	107-85-7	23.52±1.61 ^b	33.12±3.88 ^a	28.90±5.48 ^{ab}	31.69±4.11 ^{ab}
L-精氨酸琥珀酸	2387-71-5	0.17±0.03 ^c	0.70±0.02 ^a	0.50±0.03 ^b	0.52±0.03 ^b
L-2-氨基丁酸	1492-24-6	3.84±0.16 ^a	24.45±0.53 ^a	18.78±0.89 ^b	18.46±4.60 ^b
D-脯氨酸	344-25-2	0.02±0.01 ^a	0.02±0.01 ^a	0.03±0.02 ^a	0.03±0.02 ^a

续表1

名称	CAS	相对峰面积			
		K	D	E	F
乙酰亮氨酸	1188-21-2	0.45±0.16 ^d	2.86±0.02 ^a	1.37±0.12 ^b	0.97±0.28 ^c
消旋蛋氨酸	59-51-8	3.46±0.15 ^a	0.32±0.02 ^c	0.47±0.05 ^b	0.11±0.032 ^d
亮氨酸异亮氨酸	36077-41-5	0.02±0.00 ^a	0.04±0.02 ^a	0.123±0.16 ^a	0.02±0.01 ^a
2-氨基异丁酸	62-57-7	3.84±0.16 ^c	24.45±0.53 ^a	18.78±0.89 ^b	18.46±4.60 ^b
亮氨酸-苯丙氨酸	3063-05-6	0.03±0.00 ^a	0.14±0.11 ^a	0.16±0.10 ^a	0.02±0.01 ^a
甲烯胱氨酸	498-59-9	1.80±0.06 ^c	0.82±0.03 ^b	0.87±0.13 ^b	0.84±0.07 ^b
甲基蛋氨酸	13065-25-3	4.22±0.63 ^a	2.10±0.240 ^b	1.76±0.25 ^b	2.40±0.25 ^b
己酰甘氨酸	24003-67-6	0.04±0.01 ^d	0.36±0.02 ^b	0.24±0.03 ^c	0.58±0.03 ^b
环(酪氨酸-脯氨酸)	4549-02-4	0.04±0.02 ^b	0.06±0.02 ^b	3.23±0.43 ^a	0.09±0.03 ^b
谷胱甘肽二硫化物	27025-41-8	0.35±0.23 ^b	0.04±0.04 ^c	0.43±0.12 ^b	1.22±0.15 ^a
谷胱甘肽	70-18-8	29.65±4.28 ^a	5.04±1.11 ^b	2.84±1.45 ^b	3.72±1.17 ^b
3-氨基丁酸	541-48-0	3.84±0.16 ^c	24.45±0.53 ^a	18.78±0.89 ^b	18.46±4.60 ^b
泛酸	79-83-4	0.39±0.24 ^b	1.52±0.18 ^a	1.55±0.42 ^a	0.47±0.33 ^b
橙黄胡椒酰胺	56121-42-7	1.58±0.25 ^a	0.57±0.04 ^b	0.67±0.19 ^b	0.67±0.06 ^b
吡咯烷酮羧酸	98-79-3	65.84±16.93 ^b	89.54±1.46 ^a	99.29±1.92 ^a	70.98±5.02 ^b
阿莫西林	26787-78-0	0.41±0.18 ^b	0.50±0.04 ^b	0.46±0.01 ^b	0.92±0.14 ^a
γ -谷氨酰缬氨酸	13058-15-2	0.52±0.12 ^b	0.62±0.03 ^{ab}	1.05±0.41 ^a	0.53±0.07 ^b
γ -谷氨酰苯丙氨酸	7432-24-8	1.42±0.48 ^b	1.76±0.07 ^{ab}	1.67±0.07 ^{ab}	1.99±0.13 ^a
<i>N</i> -乙酰- <i>DL</i> -丝氨酸	97-14-3	2.15±1.54 ^a	0.99±0.09 ^a	1.41±1.11 ^a	0.33±0.06 ^c
<i>N</i> -乙酰肌肽	56353-15-2	1.14±0.74 ^{ab}	0.39±0.13 ^b	2.13±0.73 ^a	0.38±0.17 ^b
<i>N</i> -乙酰- <i>L</i> -色氨酸	1218-34-4	0.07±0.01 ^d	0.24±0.02 ^b	0.29±0.01 ^a	0.2±0.01 ^c
<i>N</i> -乙酰- <i>L</i> -酪氨酸	537-55-3	0.42±0.07 ^b	0.61±0.14 ^a	0.79±0.04 ^a	0.67±0.07 ^a
<i>N</i> -乙酰- <i>L</i> -谷氨酸	1188-37-0	1.28±0.17 ^c	1.82±0.16 ^b	2.36±0.12 ^a	1.42±0.29 ^c
<i>N</i> -乙酰- <i>L</i> -苯丙氨酸	2018-61-3	1.36±0.25 ^c	3.1±0.42 ^a	3.25±0.48 ^a	2.31±0.19 ^b
<i>N</i> -乳胺基苯丙氨酸	183241-73-8	0.18±0.05 ^c	2.12±0.38 ^{bc}	14.31±1.44 ^a	4.19±2.62 ^b
<i>N</i> -甲基谷氨酸	35989-16-3	1.01±0.33 ^a	1.25±0.16 ^a	0.98±0.13 ^a	0.42±0.21 ^b
<i>N</i> -乙酰- <i>L</i> -缬氨酸	96-81-1	0.38±0.06 ^b	1.16±0.22 ^a	0.79±0.28 ^b	0.45±0.06 ^{ab}
2-(1-羧乙基)-5-甲基环戊烷-1-羧酸	32603-11-5	0.19±0.05 ^d	0.62±0.04 ^b	0.78±0.07 ^a	0.48±0.03 ^c
(1-羧基环己基)乙酸	14399-63-4	0.46±0.30 ^a	0.35±0.10 ^a	0.44±0.02 ^a	0.39±0.03 ^a
(-)-羟基柠檬酸内酯	27750-13-6	0.98±0.17 ^b	0.96±0.15 ^b	1.28±0.14 ^b	0.91±0.07 ^a
(<i>R</i>)-6-氧代哌啶-2-羧酸	72002-30-3	1.59±0.07 ^c	1.91±0.05 ^a	1.82±0.07 ^{ab}	1.73±0.11 ^{bc}
马立马司他	154039-60-8	0.01±0.00 ^b	0.14±0.05 ^a	0.12±0.04 ^a	0.01±0.01 ^b
2-[(2-氨基-3-甲基丁酰基)氨基]-3-苯基丙酸		0.01±0.01 ^a	0.02±0.02 ^a	0.06±0.05 ^a	0.02±0.01 ^a
鹅肌肽	584-85-0	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.001 ^a	0.025±0.00 ^a
<i>N</i> -(2-乙酰氧基-1-苯基乙基)- α -苯甲酰胺基苯丙酰胺		0.03±0.01 ^d	0.06±0.01 ^a	0.04±0.00 ^c	0.05±0.00 ^b
<i>L</i> -组氨酸	4836-52-6	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a	0.02±0.01 ^a
γ -谷氨酸-亮氨酸	2566-39-4	0.05±0.01 ^b	0.07±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a	0.06±0.00 ^a
Celogenin c	370089-23-9	0.06±0.01 ^a	0.05±0.00 ^b	0.04±0.00 ^c	0.06±0.00 ^a
2-氨基庚二酸	26630-55-7	0.05±0.00 ^c	0.42±0.03 ^a	0.44±0.02 ^a	0.22±0.05 ^b
酪氨酸丙氨酸二肽	730-08-5	0.06±0.00 ^a	0.05±0.00 ^b	0.05±0.00 ^a	0.04±0.00 ^c
<i>D</i> -谷氨酰胺	5959-95-5	0.03±0.03 ^a	0.01±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a	0.01±0.01 ^a
京都肽	70904-56-2	0.04±0.02 ^b	0.05±0.00 ^b	0.11±0.01 ^a	0.10±0.01 ^a
<i>L</i> -丙氨酸- <i>L</i> -丙氨酸	1948-31-8	0.17±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a	0.17±0.00 ^a	0.19±0.02 ^a
4-氨基丁酸	56-12-2	3.84±0.16 ^c	24.45±0.53 ^a	18.78±0.89 ^b	18.46±4.60 ^b
<i>L</i> - γ -谷氨酰- <i>L</i> -蛋氨酸	17663-87-5	0.17±0.05 ^a	0.13±0.01 ^a	0.18±0.02 ^a	0.18±0.02 ^a
2-氧代精氨酸	3715-10-4	0.17±0.02 ^a	0.052±0.01 ^b	0.06±0.01 ^b	0.03±0.01 ^c
<i>S</i> -烯丙基- <i>L</i> -半胱氨酸	21593-77-1	0.16±0.05 ^c	0.52±0.07 ^b	0.66±0.03 ^a	0.56±0.06 ^b
<i>N</i> -(2-氨基-3-羟基苯甲酰)甘氨酸	70441-00-8	0.21±0.01 ^a	0.12±0.04 ^b	0.05±0.02 ^c	0.03±0.01 ^c
<i>L</i> - β -高甲硫氨酸	158570-14-0	0.33±0.09 ^a	0.37±0.40 ^a	0.30±0.28 ^a	0.39±0.48 ^a
<i>L</i> -哌啶甲酸	3105-95-1	0.27±0.014 ^b	0.33±0.01 ^a	0.33±0.00 ^a	0.26±0.01 ^b
<i>N</i> -乙酰- <i>L</i> -丝氨酸	16354-58-8	0.41±0.13 ^a	0.27±0.02 ^b	0.23±0.02 ^b	0.09±0.01 ^c
2,3-二氨基丙酸	54897-59-5	0.46±0.01 ^a	0.42±0.01 ^a	0.47±0.04 ^a	0.42±0.02 ^a

续表1

名称	CAS	相对峰面积			
		K	D	E	F
4-胍基丁酸	463-00-3	0.74±0.03 ^{ab}	0.76±0.02 ^a	0.68±0.01 ^b	0.75±0.06 ^{ab}
吡啶啉-2-羧酸	2133-34-8	1.32±0.37 ^a	0.67±0.07 ^b	0.62±0.11 ^b	0.67±0.08 ^b
4-氯苯丙氨酸	7424-00-2	1.08±0.20 ^a	1.05±0.26 ^a	1.06±0.17 ^a	1.17±0.23 ^a
谷氨酰胺	56-85-9	2.45±0.25 ^a	0.08±0.03 ^b	0.07±0.01 ^b	0.05±0.00 ^b
二甲基甘氨酸	1118-68-9	3.84±0.16 ^c	24.45±0.53 ^a	18.78±0.89 ^b	18.46±4.60 ^b

注：同行小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

在筛选到的衍生物中，甲烯胱氨酸、甲基蛋氨酸、谷胱甘肽、橙黄胡椒酰胺、吡啶啉-2-羧酸等物质在未发酵组中含量最高；经不同温度发酵后，荔枝酒中上述物质含量均显著降低 ($P<0.05$)，且不同温度组间无显著差异 ($P>0.05$)。这表明发酵过程中，上述物质的代谢消耗速率超过合成速率，或作为酵母的氮源参与能量代谢，进而导致其含量在发酵后普遍下降且受温度影响小；吡咯烷酮羧酸是所有组别中含量最高的短肽类物质，其次为3-甲基丁胺 (30℃组含量最高)。此外，*L*-精氨酸琥珀酸、乙酰亮氨酸、*N*-乙酰-*L*-缬氨酸在组间存在显著差异 ($P<0.05$)，且30℃发酵组的含量显著高于其他温度组 ($P<0.05$)。以上结果说明，30℃发酵可选择性促进胺类、亮氨酸/缬氨酸衍生物的合成，同时对消耗型物质（如甲烯胱氨酸等）的抑制作用处于中等水平；环(酪氨酸-脯氨酸)、*N*-乙酰肌肽、*N*-乙酰-*L*-谷氨酸、*N*-乳胺基-苯丙氨酸、2-(1-羧乙基)-5-甲基环戊烷-1-羧酸等物质在20℃组中的保留量最多，且与30、10℃发酵组均存在显著性差异 ($P<0.05$)，体现出20℃对这类物质积累的促进优势。进一步对吡咯烷酮羧酸和*N*-乙酰-*L*-苯丙氨酸的分析结果表明，20℃发酵组荔枝酒的保留量最多，且与30℃发酵组无显著差异 ($P>0.05$)，但20、30℃发酵组荔枝酒中的这2种物质均与10℃组存在显著差异 ($P<0.05$)。这表明过低温度 (10℃) 发酵不利于此类短肽类物质的积累，而20℃发酵具有最广泛的促进作用，是多数氨基酸衍生物（如谷氨酸、苯丙氨酸、肌肽类衍生物）合成的最优温度；消旋蛋氨酸、乙酰亮氨酸、2-(1-羧乙基)-5-甲基环戊烷-1-羧酸、(-)-羟基柠檬酸内酯等物质在10℃组中的含量最低，且与30、20℃发酵组存在显著差异 ($P<0.05$)，说明低温对这些物质的代谢抑制程度最高。此外，*L*-精氨酸琥珀酸在10℃发酵组的含量显著低于30℃发酵组，与20℃组无显著差异 ($P>0.05$)，表明30℃可促进其积累，而10℃发酵以抑制作用为主（仅少数物质存在弱促进，对消旋蛋氨酸、羟基柠檬酸内酯的抑制作用最强）。

综上，不同发酵温度显著影响荔枝酒中氨基酸及衍生物的代谢：30℃发酵可选择性促进胺类、亮氨酸/缬氨酸衍生物合成；20℃发酵最利于多种氨基酸（丝氨酸、亮氨酸等）及多数衍生物（如谷氨酸、苯丙氨酸类衍生

物)的累积; 10℃发酵则普遍抑制氨基酸类物质及消旋蛋氨酸等衍生物的积累, 且不利于短肽类物质留存。未发酵组中部分衍生物(如甲烯胱氨酸)在发酵后含量普遍下降且受温度影响小。

2.2 多元统计分析

由图1A可知, PC1、PC2、PC3方差贡献率分别为45.7%、13.0%和11.0%, 累计方差贡献率为69.7%, 可以反映样品的信息。在PCA得分图中, 样本点间距离越远说明样本组间代谢物差异越大, 反之则越小^[26], 各组荔枝酒3个生物学重复均能较好地聚集在一起, 表明检测方法稳定性良好、结果可靠。而各组间显著分离, 表明其代谢物在加工过程中产生显著变化; 由图1B可知, OPLS-DA得分图进一步验证了组间差异: 第一预测成分($t[1]$)的方差贡献率为48.3%, 第一正交成分($t_o[1]$)的方差贡献率为26.8%, 二者累计解释75.1%的代谢物变异。各组样本点在95%置信椭圆内呈现明显的组内聚集、组间分离趋势: K组样本集中分布于 $t[1]$ 负半轴、 $t_o[1]$ 近零区域; D组与E组样本聚集于 $t[1]$ 近零区域、 $t_o[1]$ 正半轴; F组样本则集中于 $t[1]$ 正半轴、 $t_o[1]$ 近零区域, 清晰表明不同发酵温度下荔枝酒的氨基酸及其衍生物代谢物组成存在显著差异, 模型具备良好的判别能力。为验证模型的可靠性, 进行了200次置换检验。由图1C可知, Q^2 回归线与Y轴的截距为负, 证明构建的代谢组学模型无过拟合风险。模型 $R^2_y=0.88$, 表明模型具有良好的判别能力, 可以很好地解释不同发酵温度荔枝酒中氨基酸及其衍生物类物质的差异, 可用于后续差异成分分析。因此, 基于此模型筛选出的差异代谢物及后续的通路富集分析结果可靠且可信^[27]。

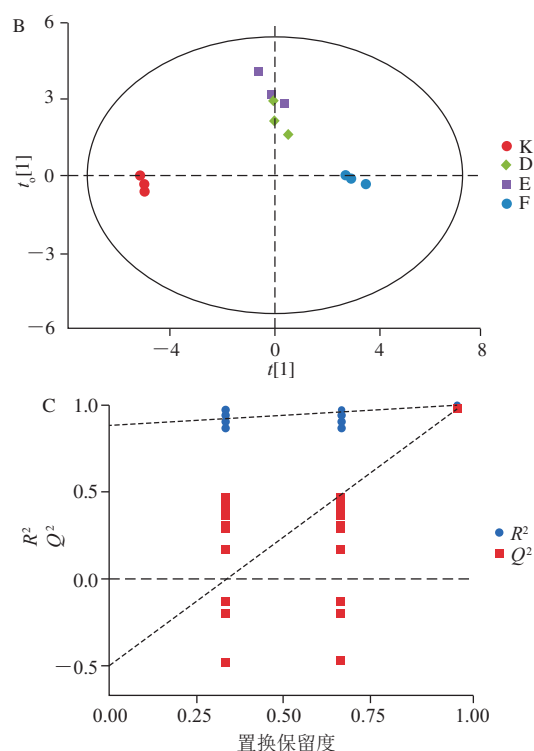
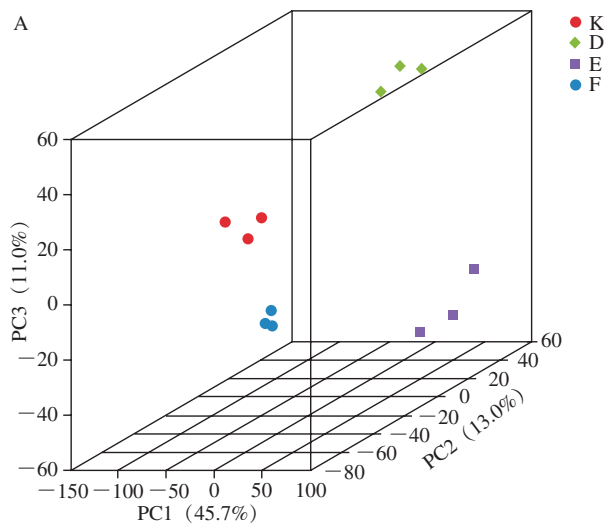


图1 不同温度发酵荔枝酒氨基酸及其衍生物PCA得分图(A)、OPLS-DA得分图(B)及置换检验结果(C)

Fig. 1 PCA score plot (A) and OPLS-DA score plot (B), and displacement test results (C) of amino acids and their derivatives in litchi wine fermented at different temperatures

2.3 不同发酵温度酿制荔枝酒差异氨基酸及其衍生物分析

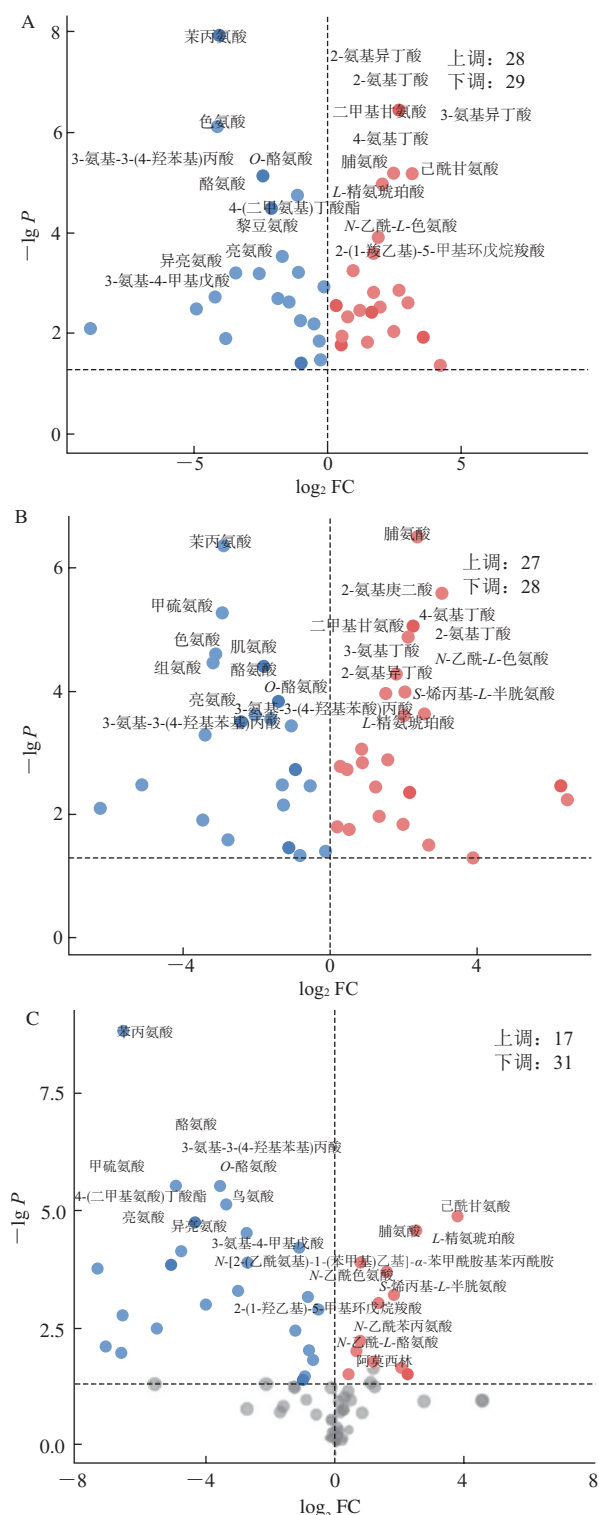
基于OPLS-DA分析结果, 结合 $P<0.05$, 筛选VIP>1的差异代谢物。各组荔枝酒差异氨基酸及其衍生类物质差异代谢产物数量见表2。将差异代谢物按P值由小到大排序, 分别选取显著上调和显著下调的前10个代谢物绘制火山图, 结果见图2。

表2 各组荔枝酒中差异氨基酸及其衍生类物质代谢产物数量
Table 2 Number of differential amino acids and derived metabolites in each group of litchi wine

组别	检出物质	差异物质	上调	下调
K vs D	92	57	28	29
K vs E	92	55	27	28
K vs F	92	48	17	31

由表2可知, 基于 $P<0.05$ 、VIP>1的筛选标准, D、E、F组荔枝酒中分别筛选出57、55、48个差异物质, D组和E组差异物质数量显著多于F组。由图2可知, 各组差异代谢物按P值由小到大排序前10位上调氨基酸及其衍生类物质代谢物显示: D组和E组代谢物共性显著, 均以2-氨基异丁酸、3-氨基丁酸、2-氨基丁酸、 γ -氨基丁酸、脯氨酸、L-精氨酸琥珀酸、二甲基甘氨酸、N-乙酰-L-色氨酸为主, 反映中高温环境下酵母对小分子氨基酸及其衍生物的活跃代谢; 低温组(F)特征独特, 富集阿莫

西林、*N*-乙酰-*L*-酪氨酸等非典型代谢产物，且检测到较多乙酰化修饰氨基酸（如*N*-乙酰-*L*-苯丙氨酸），提示低温导致代谢路径偏移。综上，20~30℃发酵更利于氨基酸的有序转化，而低温（10℃）引发代谢紊乱。



A. K vs D; B. K vs E; C. K vs F, 图3、4同; FC: 差异倍数 (fold change)。

图2 荔枝酒氨基酸及其衍生物代谢差异代谢物火山图

Fig. 2 Volcano plot of differential metabolites in amino acids and derivatives in lychee wine

2.4 上调差异代谢物的相关性分析

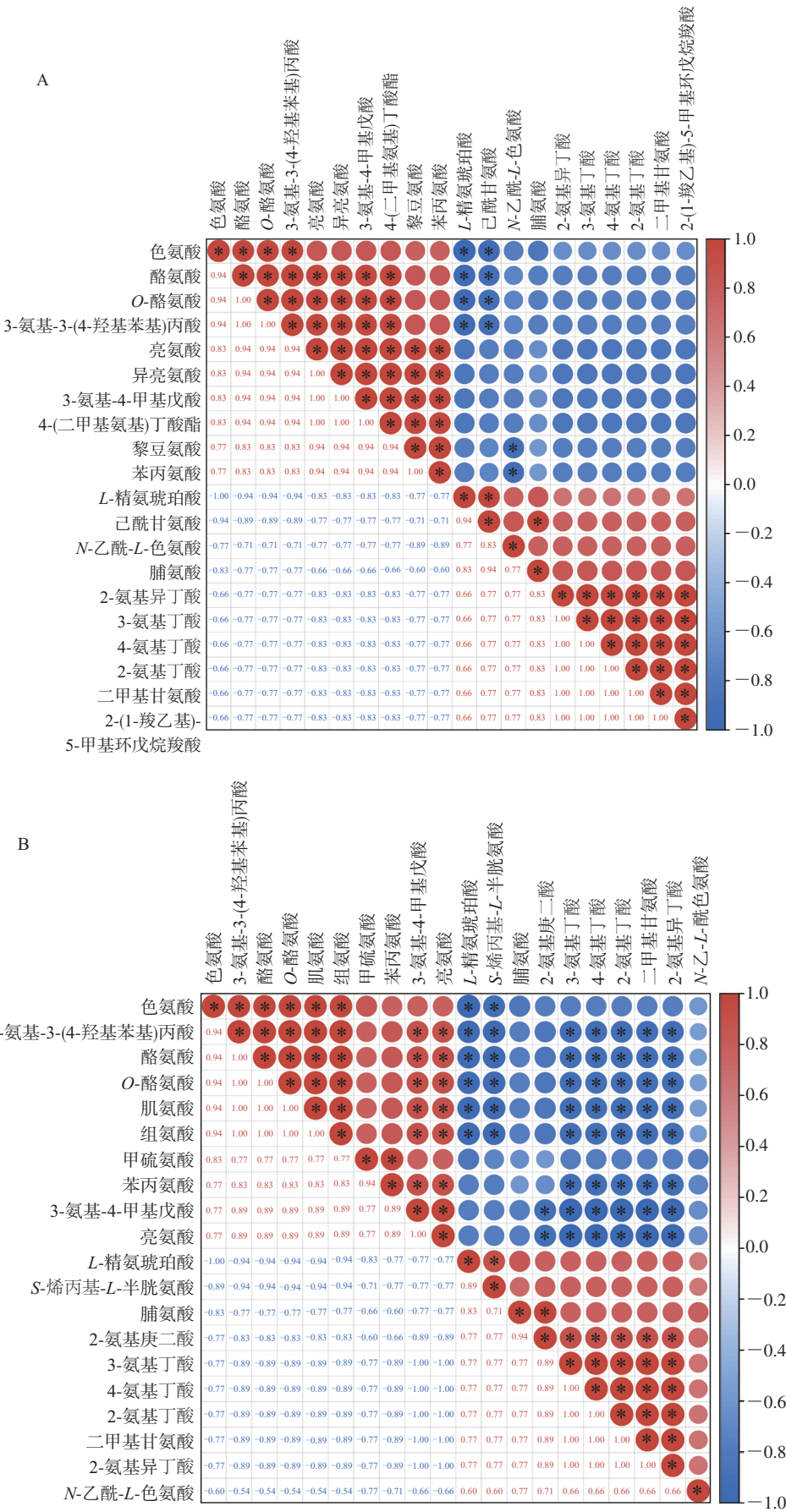
差异代谢物间的相关性分析可反映其变化趋势，氨基酸及其衍生物上调差异代谢物的相关性结果见图3。正相关（红色）代表协同作用，负相关（蓝色）代表拮抗作用。

由图3A可知，K vs D组上调的差异氨基酸其衍生物如2-氨基异丁酸、3-氨基丁酸、4-氨基丁酸、2-氨基丁酸、二甲基甘氨酸、2-(1-羧乙基)-5-甲基环戊烷羧酸间两两呈显著正相关 ($P < 0.05$)。己酰甘氨酸与脯氨酸显著正相关 ($P < 0.05$)。*N*-(*L*-精氨酸)琥珀酸与己酰甘氨酸显著正相关 ($P < 0.05$)；色氨酸、酪氨酸、*O*-酪氨酸、3-氨基-3-(4-羟基苯基)-丙酸与*L*-精氨酸琥珀酸、己酰甘氨酸呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

由图3B可知，K vs E组上调的差异氨基酸及其衍生物如3-氨基丁酸、 γ -氨基丁酸、2-氨基丁酸、二甲基甘氨酸、2-氨基异丁酸相互间两两呈显著正相关 ($P < 0.05$)。色氨酸、3-氨基-3-(4-羟基苯基)丙酸、酪氨酸、*O*-酪氨酸、肌氨酸、组氨酸等物质间也两两呈显著正相关 ($P < 0.05$)，且这一簇物质（3-氨基-3-(4-羟基苯基)丙酸、酪氨酸等）除色氨酸外，均与前一簇物质（3-氨基丁酸、 γ -氨基丁酸、2-氨基丁酸等）呈显著负相关 ($P < 0.05$)。*L*-精氨酸琥珀酸与*S*-烯丙基-*L*-半胱氨酸呈显著正相关，且二者均与色氨酸等物质簇呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

由图3C可知，K vs F组中，上调的差异氨基酸及其衍生物如己酰甘氨酸、脯氨酸、*N*-乙酰-*L*-苯丙氨酸、*N*-乙酰-*L*-色氨酸、*N*-乙酰-*L*-酪氨酸等乙酰化氨基酸及其衍生物构成一个显著正相关簇；*L*-精氨酸琥珀酸与*S*-烯丙基-*L*-半胱氨酸呈显著正相关 ($P < 0.05$)，且二者均与己酰甘氨酸等物质簇呈显著正相关 ($P < 0.05$)，而与酪氨酸、*O*-酪氨酸等物质呈显著负相关 ($P < 0.05$)；此外，甲硫氨酸、鸟氨酸、苯丙氨酸等物质也与乙酰化氨基酸簇呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

综上，各组均存在显著正/负相关集群 ($P < 0.05$)：正相关集群以短链氨基酸衍生物、乙酰化氨基酸及精氨酸代谢中间产物为主，体现代谢协同作用；负相关主要表现为芳香族氨基酸及其衍生物与 γ -氨基丁酸、乙酰化代谢物间的拮抗关系。不同温度发酵组的相关性网络特征各异，反映温度对荔枝酒发酵过程中氨基酸代谢协同与拮抗关系的调控作用，为优化发酵工艺提供依据。



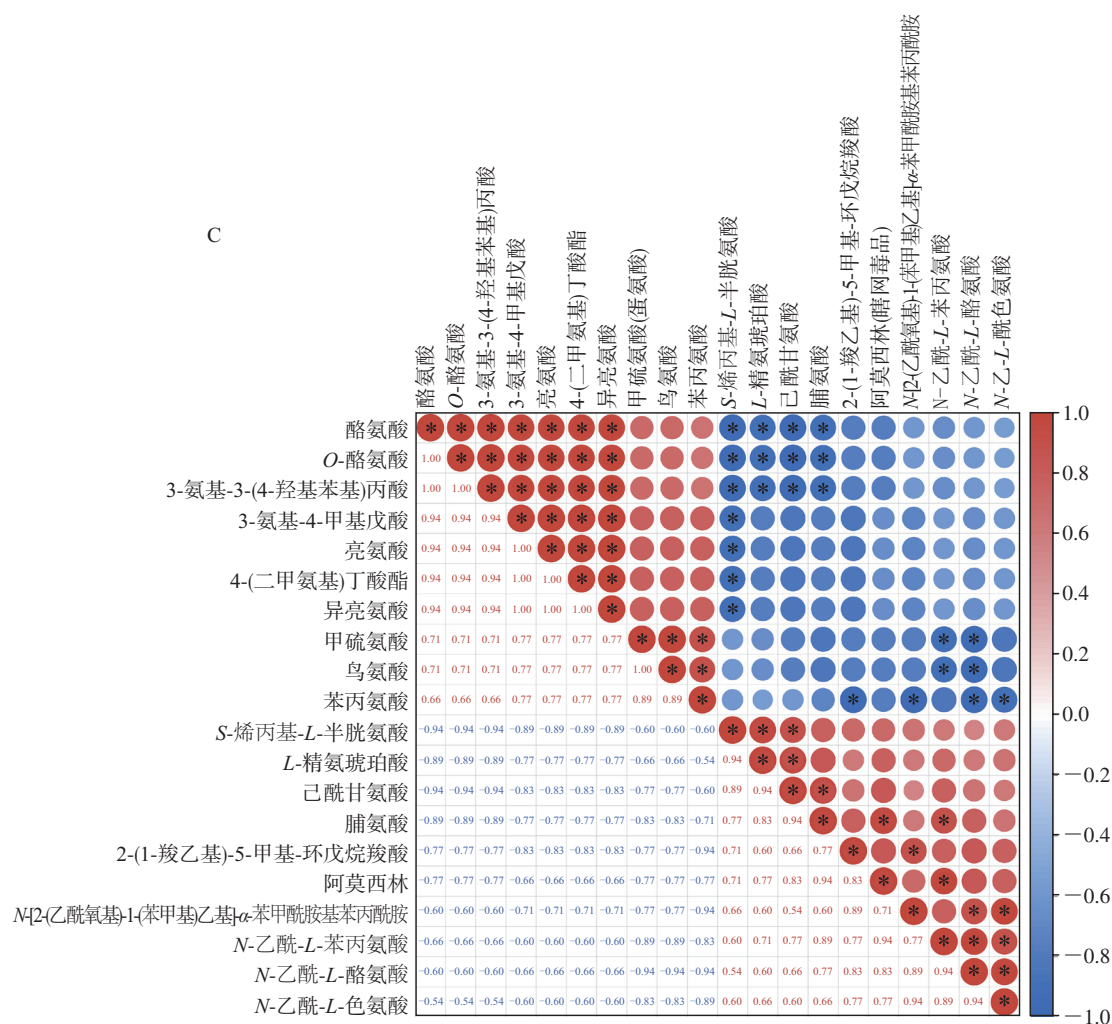
*显著相关 ($P < 0.05$)。

图3 氨基酸及其衍生物差异代谢物的相关性图
Fig.3 Correlation plot of differential amino acids and derived metabolites

2.5 不同温度酿制荔枝酒氨基酸及其衍生物代谢通路分析

为探究差异氨基酸及其衍生物代谢主要代谢通路，对70种差异氨基酸及其衍生物进行KEGG富集分析，涉及6个功能模块下的16条代谢途径，涵盖氨基酸代谢、次级代谢物生物合成等，氨基酸及其衍生物代谢通路分析结果见图4。由图4可知，氨基酸代谢模块中精氨酸生物合成、精氨酸和脯氨酸代谢为所有发酵组的主要富集途径，D组中缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸生物合成抑制作用最强；E组中促进丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢，同时抑制苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸及缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸的生物合成；F组对缬氨酸、亮氨酸和异亮氨酸及苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸的生物合成均有显著抑制，且其对精氨酸生物合成的抑制作用明显强于D组和E组。在3组中，其他次级代谢物生物合成模块以葡萄糖异硫氰酸盐生物合成为主；全局与概述图谱模块中代谢通路、

氨基酸生物合成占主导；膜运输模块仅富集到ABC转运蛋白途径；其他氨基酸代谢模块中，30℃(D组)和20℃(E组)发酵组富集了D-氨基酸代谢等3条途径，而10℃(F组)仅富集前2条；翻译模块则富集氨酰-tRNA生物合成途径。各温度下不同途径的相对丰度存在差异，表明发酵温度显著影响荔枝酒氨基酸及其衍生物代谢通路。

以通路上调差异代谢物表达量与下调表达量差值占通路总差异代谢物总量比例计算差异丰度得分，结果表明，30℃发酵组(D组)代谢通路的抑制程度低于10℃组，但高于20℃组。在精氨酸生物合成、D-氨基酸代谢、β-丙氨酸代谢等通路中，30℃发酵组的差异丰度得分处于E组(20℃)和F组(10℃)之间，体现出E组>D组>F组的梯度分布特征。20℃发酵组(E组)整体的代谢通路抑制程度最低，甚至部分通路呈激活状态，其中精氨酸和脯氨酸代谢通路的差异丰度得分高

于其他温度组；丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸代谢、 β -丙氨酸代谢等途径呈现显著激活状态；在精氨酸生物合成等通路中，差异丰度得分也相对较高。10℃发酵组（F组）整体代谢通路抑制程度最高。如精氨酸生物合成、D-氨基酸代谢、代谢通路、2-氧代羧酸代谢、氨基酸生物合成及辅因子生物合成等通路，差异丰度得分呈现显著低值。可能是由于低温降低了膜中脂质双分子层的流动性，减少了通过细胞膜的运输，抑制酵母代谢，导致氨基酸转化受限，使得F组通路活性显著降低^[28-30]；同时，10℃低温环境抑制代谢活动，也让与微生物生理状态密切相关的D-氨基酸代谢通路差异丰度得分下降^[31]。表明20℃发酵组（E组）对荔枝酒中氨基酸及短肽类物质代谢网络的热力学扰动较小，更有利于维持上述通路的持续活跃状态，且在20~30℃发酵温度区间，荔枝酒中的酵母及微生物维持较高的代谢通量，促使整体代谢通路的活性分值处于较高水平。

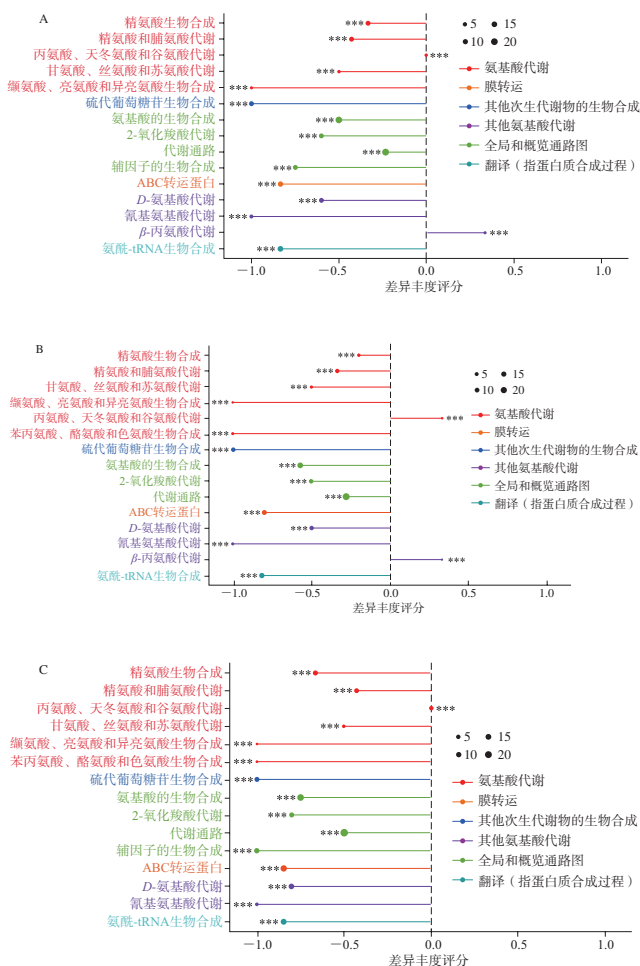


图4 荔枝酒中差异氨基酸及其衍生物类物质代谢通路注释及KEGG信号通路差异丰度得分

Fig. 4 Metabolic pathway annotation of differential amino acids and their derivatives and differential abundance scores of KEGG signaling pathways in lychee wine

综上，荔枝酒发酵中，精氨酸相关代谢、支链氨基酸生物合成成为主要富集通路。发酵温度显著调控通路活性，差异丰度得分整体呈20℃（E组）>30℃（D组）>10℃（F组）梯度分布。20℃时代谢抑制最弱，部分通路呈激活状态，利于维持氨基酸代谢网络活跃；10℃低温显著抑制酵母代谢，通路活性最低。30℃通路抑制程度介于两者之间。综上，20℃为促进荔枝酒氨基酸代谢及生物转化的最优发酵温度。

3 结论

针对不同温度发酵荔枝酒中氨基酸及其衍生物的代谢分析结果表明：30、20℃发酵条件下，荔枝酒中氨基酸及其衍生物积累量显著高于10℃组，且20℃更利于氨基酸衍生物富集，中温区间（20~30℃）可推动氨基酸的有序转化，而低温（10℃）易抑制氨基酸及其衍生物代谢。进一步分析不同温度发酵组的代谢物相关性发现：*L*-精氨酸琥珀酸与己酰甘氨酸在各温度发酵组中均呈显著正相关（ $P<0.05$ ），且多类代谢物间普遍存在显著正相关关系与显著负相关关系。代谢通路富集结果显示：精氨酸生物合成、精氨酸和脯氨酸代谢是所有发酵组的主要富集途径；其中，20℃组（E组）显著促进了丙氨酸、天冬氨酸和谷氨酸的代谢过程，而20℃组（E组）与10℃组（F组）均对苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸的生物合成存在显著抑制作用，10℃低温更是通过抑制多条氨基酸类物质的生物合成通路影响代谢。本研究从代谢组学层面为荔枝酒发酵工艺优化提供了理论依据，后续可结合转录组学与蛋白质组学技术，深入解析温度调控氨基酸代谢通路的关键靶点及分子机制，以更全面地揭示温度对荔枝酒代谢的调控规律。

参考文献：

- [1] ZHANG B, ZENG X A, CHEN Y, et al. Study on the effects of glutamic acid addition on higher alcohols formation in litchi wine[J]. *Liquor-Making Sci Technol*, 2007, 167(10): 51-53.
- [2] FAIRBAIRN S, MCKINNON A, MUSARURWA H T, et al. The impact of single amino acids on growth and volatile aroma production by *Saccharomyces cerevisiae* strains[J]. *Front Microbiol*, 2017, 8: 2554.
- [3] 钟秋平, 黄盼盼, 赵新河. 葡萄冰酒干酵母R2发酵冰荔枝酒工艺条件的优化[J]. *中国酿造*, 2008, 27(9): 95-98.
- [4] 马胤鹏, 张晓丹, 秦丹, 等. 我国荔枝类果酒的研究现状[J]. *农产品加工*, 2017, 38(7): 65-68.
- [5] PENG H X, ZHU J H, LI H L, et al. Study on sensory evaluation of litchi wine based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Acta Horti*, 2014, 1029: 393-398.
- [6] SHANG Y, ZENG Y, ZHU P, et al. Acetate metabolism of *Saccharomyces cerevisiae* at different temperatures during lychee wine fermentation[J]. *Biotechnol Biotechnol Equip*, 2016, 30(3): 512-520.

- [7] RUAN S, YANG X, CHEN Q, et al. Characterization of volatile aroma compounds in litchi (Heiye) wine and distilled spirit[J]. Food Sci Nutr, 2021, 9(11): 5914-5927.
- [8] ZHONG S T, ZENG X A, BRENNAN M A, et al. Characterization of aroma profile and characteristic aromas during lychee wine fermentation[J]. J Food Process Preserv, 2019, 43(8): e13939
- [9] COLEMAN M C, FISH R, BLOCK D E. Temperature-dependent kinetic model for nitrogen-limited wine fermentations[J]. Appl Environ Microbiol, 2007, 73(18): 5915-5923.
- [10] 沈颖, 刘晓艳, 白卫东, 等. 荔枝酒酿造过程中氨基酸的变化[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(5): 191-196.
- [11] 高敏, 曾新安, 彭娜, 等. 温度对荔枝酒发酵的影响研究[J]. 广东农业科学, 2010, 37(1): 96-98.
- [12] 邓开野, 黄小红. 发酵温度对荔枝酒香气成分的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(1): 206-210.
- [13] 岳强. 荔枝酒的酿造及后处理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006.
- [14] 岳俊波, 杨冬松, 贾旻. 浅谈红葡萄酒陈酿中游离氨基酸的含量对风味的影响[J]. 酿酒, 2001, 28(3): 83.
- [15] CHEN D, CHIA J Y, LIU S Q. Impact of addition of aromatic amino acids on non-volatile and volatile compounds in lychee wine fermented with *Saccharomyces cerevisiae* MERIT. ferm[J]. Int J Food Microbiol, 2014, 170: 12-20.
- [16] ISOGAI S, NISHIMURA A, KOTAKA A, et al. High-level production of isoleucine and fusel alcohol by expression of the feedback inhibition-insensitive threonine deaminase in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Appl Environ Microbiol, 2022, 88(12): e00568-22.
- [17] HAN G, ZHOU Z, CHANG R, et al. Role of a noval amadori rearrangement product: *N*-(1-deoxy-*D*-fructos-1-yl)- γ -aminobutyric acid in changing the taste of Huangjiu[J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105788.
- [18] PENG Y, HONG J W, RAFTERY D, et al. Metabolomic-based clinical studies and murine models for acute pancreatitis disease: a review[J]. BBA-Mol Basis Dis, 2021, 1867(7): 166123.
- [19] CHEN K X, XUE H T, SHI Q, et al. Geographical identification of Chinese wine based on chemometrics combined with mineral elements, volatile components and untargeted metabolomics[J]. Food Chem, 2024, 440: 138212.
- [20] 赵诗睿, 任青兮, 周志磊, 等. 基于代谢组学解析黄酒非挥发性成分的研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(18): 344-359.
- [21] 张雅欣, 李旋, 胡佳星, 等. 基于非靶向代谢组学的特色寒地浆果滋味品质分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(13): 293-301.
- [22] 钱园凤, 杨高中, 徐伟林, 等. 基于代谢组学的崇觉罗汉茶主要化学成分分析[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 138-145.
- [23] 陈泓帆. 低温低盐发酵对大头菜挥发性风味和代谢物的影响研究[D]. 成都: 成都大学, 2024.
- [24] 宁欣强, 彭微, 兰露聆, 等. 液态白酒多菌种混合发酵非靶向代谢组学分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 269-279.
- [25] BETTENHAUSEN H M, BENSON A, FISK S, et al. Variation in sensory attributes and volatile compounds in beers brewed from genetically distinct malts: an integrated sensory and non-targeted metabolomics approach[J]. J Am Soc Brew Chem, 2020, 78(2): 136-152.
- [26] 徐晓敏, 房城, 卢芳. 基于代谢组学技术的黄芩-白芍对二型糖尿病模型小鼠的作用机制[J]. 世界中医药, 2023, 18(5): 600-605.
- [27] WANG X Y, SHEN Y, ZHUANG X Y, et al. Jintiang capsule alleviates rheumatoid arthritis and reverses changes of serum metabolic profile in collagen-induced arthritic rats[J]. J Inflamm Res, 2021, 14: 6685-6706.
- [28] CÓRCOLES-SÁEZ I, HERNÁNDEZ M L, MARTÍNEZ-RIVAS J M, et al. Characterization of the *S. cerevisiae* Inp51 mutant links phosphatidylinositol 4,5-bisphosphate levels with lipid content, membrane fluidity and cold growth. Biochim[J]. Biophys Acta Mol Cell Biol Lipids, 2016, 1861: 213-226.
- [29] ZHAO Y, LIU S, HAN X, et al. Combined effects of fermentation temperature and *Saccharomyces cerevisiae* strains on free amino acids, flavor substances, and undesirable secondary metabolites in Huangjiu fermentation[J]. Food Microbiol, 2022, 108: 104091.
- [30] SASABE J, SUZUKI M. Emerging role of *D*-amino acid metabolism in the innate defense[J]. Front Microbiol, 2018, 9: 933.
- [31] GENCHI G. An overview on *D*-amino acids[J]. Amino Acids, 2017, 49(9): 1521-1533.