

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250126002

引用格式: 李青玥, 李晓霞, 王然, 等. 不同热处理条件对副干酪乳酪杆菌 K56 发酵乳质构和风味物质变化的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 12-22.

LI QY, LI XX, WANG R, et al. Influence of varying heat treatment conditions on texture and flavor compound profiles in fermented milk produced by *Lactocaseibacillus paracasei* K56 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 12-22. (in Chinese with English abstract).

不同热处理条件对副干酪乳酪杆菌 K56 发酵乳质构和风味物质变化的影响

李青玥^{1,2}, 李晓霞¹, 王然¹, 蓝航莲³, 巴根纳⁴, 孙远征⁴, 赵智¹,
何晶晶¹, 洪维鍊^{3,4*}

(1. 中国农业大学营养与健康系, 教育部与北京市共建功能乳品重点实验室, 北京 100190;
2. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 3. 内蒙古国家乳业技术创新中心, 呼和浩特 010100;
4. 内蒙古伊利实业集团股份有限公司, 呼和浩特 010110)

摘要: **目的** 分析不同热处理工艺对副干酪乳酪杆菌 K56 发酵乳的质构及其挥发性和非挥发性风味物质的影响。**方法** 对副干酪乳酪杆菌 K56 发酵乳进行 80~121 °C 的热处理, 并采用质构分析仪、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)和液相色谱-串联质谱技术(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)分析其质构及挥发性、非挥发性风味物质的种类和含量变化。**结果** 80~110 °C 热处理条件下, 随着热处理温度的增加, K56 发酵乳的硬度降低, 内聚性和弹性增加; 在 110 °C、4 s 处理下, 内聚性和胶着性展现出最佳质构特性, 其硬度为 6.2 g, 内聚性增加到 0.18, 弹性为 0.708 mm, 胶着性为 4.8 g。热处理后检测到 59 种挥发性风味物质, 其中 90~121 °C 处理显著增加了酮类和醇类; 气味活性值(odor activity value, OAV)分析显示发酵乳的主要风味物质为酯、酮和有机酸, 以 δ -癸内酯和乙酸异丁酯为主要贡献物质。在 652 种非挥发性代谢物中, 热处理 90 °C、15 min 和 110 °C、4 s, 100 °C、15 min 和 115 °C、4 s 条件下存在相似的代谢物。在对照组和 6 个热处理组样品中, 共发现 12 个显著不同的吡嗪物质。**结论** 不同热处理条件下, K56 发酵乳的质构特性和风味物质发生显著变化, 110 °C、4 s 处理下效果最佳, 不仅改善其质构特性, 还增强其风味物质的多样性, 为发酵乳的品质提升提供了重要的科学依据。

关键词: 副干酪乳酪杆菌 K56; 发酵乳; 热处理; 质构特性; 风味物质

收稿日期: 2025-01-26

基金项目: 国家乳业技术创新中心项目(2023-JSGG-28)

第一作者: 李青玥(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物发酵。E-mail: 13936756957@163.com

*通信作者: 洪维鍊(1976—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为益生菌研究/微生物学。E-mail: 13774299154@163.com

Influence of varying heat treatment conditions on texture and flavor compound profiles in fermented milk produced by *Lacticaseibacillus paracasei* K56

LI Qing-Yue^{1,2}, LI Xiao-Xia¹, WANG Ran¹, LAN Hang-Lian³, BA Gen-Na⁴,
SUN Yuan-Zheng⁴, ZHAO Zhi¹, HE Jing-Jing¹, HONG Wei-Lian^{3,4*}

(1. Department of Nutrition and Health, Key Laboratory of Functional Dairy, Co-constructed by Ministry of Education and Beijing Government, China Agricultural University, Beijing 100190, China; 2. School of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 3. Inner Mongolia National Center of Technology Innovation for Dairy, Hohhot 010100, China; 4. Inner Mongolia Yili Industrial Group Co., Ltd., Hohhot 010110, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of varying heat treatment conditions on the texture profile and volatile/non-volatile flavor compound dynamics in fermented milk produced by *Lacticaseibacillus paracasei* K56. **Methods** Fermented milk produced by *Lacticaseibacillus paracasei* K56 was subjected to heat treatment at temperatures ranging from 80 to 121 °C. The texture, volatile flavor compounds and non-volatile flavor compounds were analyzed using a texture analyzer, headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS), and liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS). **Results** Under heat treatment conditions ranging from 80 to 110 °C, the hardness of fermented milk produced by *Lacticaseibacillus paracasei* K56 decreased, while cohesiveness, and springiness increased. The optimal textural properties, particularly in terms of cohesiveness and gumminess, were achieved at 110 °C for 4 s, exhibiting a hardness of 6.2 g, cohesiveness of 0.18, springiness of 0.708 mm, and gumminess of 4.8 g. The 59 kinds of volatile flavor compounds were detected following heat treatment, with the 90–121 °C range significantly enhancing the levels of ketones and alcohols. Odor activity value (OAV) analysis identified esters, ketones and organic acids as the dominant flavor contributors in the fermented milk, with δ -decalactone and isoamyl acetate serving as the key odorants. Among the 652 kinds of non-volatile metabolites analyzed, the heat treatment groups 90 °C, 15 min and 110 °C, 4 s, 100 °C, 15 min and 115 °C, 4 s exhibited overlapping metabolites. Comparative analysis revealed 12 significantly differentiated indole compounds among the control group and 6 heat-treated samples. **Conclusion** The textural properties and flavor compounds of fermented milk produced by *Lacticaseibacillus paracasei* K56 vary significantly under different heat treatments. The treatment at 110 °C for 4 s achieves optimal results, enhancing texture and increasing flavor diversity. These findings provide a critical scientific basis for quality enhancement in fermented dairy products.

KEY WORDS: *Lacticaseibacillus paracasei* K56; fermented milk; heat treatment; textural properties; flavor compounds

0 引言

发酵乳在全球食品领域中占据着不可或缺的地位,其重要性体现在多个方面。从营养角度来看,发酵乳富含优质蛋白质,为人体提供了必需的氨基酸^[1]。发酵乳中的益生菌成分更是其独特的优势所在,这些有益微生物能够调节肠道微生态平衡,抑制有害菌的生长繁殖,增强肠道的消化和吸收功能,有助于改善肠道蠕动,缓解便秘等消化问题,进而提升人体的整体免疫力,为健康保驾护航^[2]。

目前发酵乳市场面临的挑战,主要包括高昂的运输成本、严格的技术要求和市场限制。市面上常见的酸奶营

养价值高,风味独特深受消费者喜爱。但酸奶在储存和运输过程中容易出现乳清析出、分层、持水力下降等质量问题。因此,开发了热处理发酵乳(巴氏杀菌发酵乳,也称常温酸奶),其基于最初的低温发酵乳工艺,附加第二次热处理^[3]。与酸奶相比,高温加热后的发酵乳不需要冷藏,减少了对冷藏设备和冷链管理的依赖。热处理后的发酵乳货架期显著延长至4~6个月,同时保持了稳定的口感和营养成分^[4]。酸奶与常温酸奶,二者在加工工艺和保藏条件上存在明显的差异,但在最终产品的品质表现上并没有显著的差异。相比之下,常温酸奶虽然在加热过程中会导致益生菌数量的减少,但通过合理的工艺优化和菌种选择,仍然可以在保证食品安全和良好质构的前提下,尽可能地保留部分益

生菌的活性,同时维持产品的风味和营养价值。在质构方面,常温酸奶通过蛋白质变性等作用,具有更好的成型性和稳定性^[5],能够在常温下保持较长时间的良好状态,方便储存和销售,并且在口感上也能够满足消费者对于醇厚、细腻质地的需求。

在常温酸奶的研究领域中,主要的研究焦点集中在热处理温度对质构和风味物质含量的影响上。大量的研究表明,发酵乳在经过加热处理后,其质构特性会发生明显的改变。随着热处理温度的升高,发酵乳中的蛋白质会发生进一步的变性和聚集,导致发酵乳的黏度增加,凝胶结构更加紧密,从而使其具有更好的硬度和咀嚼性。同时,加热过程也会对发酵乳中的有机挥发性化合物含量产生显著影响。一方面,一些挥发性风味物质,如部分醇类、醛类和酯类等,可能会因为加热而挥发损失,从而导致发酵乳原有的风味强度减弱;另一方面,加热也可能引发一些化学反应,如美拉德反应^[5]、脂质氧化反应等,这些反应会生成新的挥发性风味物质,如吡嗪类、呋喃类等化合物,为发酵乳带来新的风味特征,使发酵乳的风味更加复杂和丰富。此外,热处理的不同加热温度、不同加热时间的变化,都会对发酵乳中的挥发物气味产生不同程度的影响。不同的工艺组合产生不同化学反应并生成不同挥发性物质,从而赋予发酵乳独特的风味特性,满足消费者多样化的口味需求。副干酪乳杆菌 K56 分离自中国健康婴幼儿肠道,体内外实验已证实副干酪乳杆菌 K56 菌株的安全性^[6]。副干酪乳杆菌 K56 已证明能改善高脂饮食喂养小鼠的糖脂代谢^[7]。副干酪乳杆菌 K56 虽然表现出良好的健康功效,但目前缺乏副干酪乳杆菌 K56 发酵乳在不同温度热处理条件下发酵乳风味变化的研究。

本研究首先测定热处理 K56 发酵乳的质构特性,明确不同加热温度、加热时间下发酵乳的质构影响;进一步对热处理发酵乳样品中的挥发性成分进行了定性和定量分析,并确定不同加热温度、加热时间下的特征芳香类型;此外,系统分析了与芳香活性化合物相关的非挥发性代谢物,包括奶油味和乳香味前体。总之,本研究探索了热处理发酵乳中潜在的风味差异标记物,为优化后热处理工艺和提高发酵乳品质提供了依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试剂

葡萄糖(纯度 $\geq 99.5\%$)、2-甲基-3-庚酮(纯度 99%)、L-2-氨基丙氨酸(纯度 $\geq 98\%$)[西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司];氯化钠[纯度 0.85%,中国医药集团有限公司(北京)];乳粉[恒天然商贸(上海)有限公司];甲醇(色谱纯,美国 Fisher 公司);无水乙醇(色谱纯,天津致远化学试剂有限公司);MRS 培养基(北京陆桥技术股份有限公司);副干酪乳杆菌 K56(内蒙古伊利实业集团股份有限公司)。

1.2 仪器与amp;设备

Brookfield CTX 质地分析仪(美国 Ametek Brookfield 公司);7697A-8890-7000D 顶空气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司);Wonbio-96c 高通量组织研磨仪(上海万柏生物技术有限公司);UHPLC -Q Exactive HF-X 超高效液相色谱-傅里叶变换质谱联用技术系统[赛默飞世尔科技(中国)有限公司];HSS T3 色谱柱(100 mm \times 2.1 mm, 1.8 μ m)(美国 Waters 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 发酵乳的制备

将纯净水加热至(50 \pm 5) $^{\circ}$ C,加入定量的葡萄糖和乳粉,300 r/min 搅拌 25 min,使其完全溶解;在 50 $^{\circ}$ C 下静置 30 min;将溶解的基料在 15~20 MPa 压力下均质处理;均质好的溶液在(95 \pm 1) $^{\circ}$ C 下褐变;褐变好的基料冷却至(37 \pm 1) $^{\circ}$ C 后,接种 1×10^7 CFU/g 的副干酪乳杆菌 K56,在(37 \pm 1) $^{\circ}$ C 条件下发酵 72 h。将发酵乳分成 7 份,1 份进行非加热处理(CK),6 份分别通过 80 $^{\circ}$ C、15 min;90 $^{\circ}$ C、15 min;100 $^{\circ}$ C、15 min;110 $^{\circ}$ C、4 s;115 $^{\circ}$ C、4 s;121 $^{\circ}$ C、4 s 进行热处理^[8]。在获得热处理样品后,在 4 $^{\circ}$ C 下过夜储存。

1.3.2 质构特性检测

发酵乳的质构特性按照 GHARIBZAHEDI 等^[9]的方法进行,并稍作调整。使用 Brookfield CTX 质地分析仪测量凝固型发酵乳质构,包括硬度、内聚性和弹性。采用 TA10 探针对待测样品进行测试,下降速度、测试速度和探头返回速度分别为:1、3 和 3 mm/s,应变率为 35%。测量方法是用直径为 40 mm 的塑料瓶探头向下穿透发酵乳表面 30 mm。

1.3.3 代谢组学分析

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS),根据 WANG 等^[10]描述的方法对挥发性化合物进行分离和鉴定。具体步骤如下:将 0.5 mL 热处理样品与纯化水混合,加入 1.5 g NaCl 和 1.55 ppm 的内标物 2-甲基-3-庚酮,将混合物分配到顶空小瓶中;顶空小瓶在平衡振荡器上振荡 15 min 后进行 SPME,于 65 $^{\circ}$ C 顶空中放置 30 min,并将 SPME 纤维在 250 $^{\circ}$ C 下老化 15 min 后吸附样品以除去吸附的杂质;将吸附有富集组分的 SPME 纤维置于 GC 中,250 $^{\circ}$ C 下保持 5 min,使吸附的化合物完全解吸,使用 Agilent 7200 Q-TOF 质谱仪与 7890 型气相色谱仪偶联进行检测。以氦气作为流动介质,流速设定为 1.1 mL/min,注射室温度固定在 250 $^{\circ}$ C。通过将检测到的质谱图与国家标准化化合物光谱数据库(national institute of standards and technology, NIST)中的质谱参考进行比较,鉴别样品中的特定挥发性化合物。

GC-MS 的原始数据经 MassHunter workstation Quantitative Analysis (v10.0.707.0)软件进行预处理,导出

CSV 格式的三维数据矩阵, 这个三维矩阵包括的信息有: 样品信息、代谢物名称和质谱响应强度。内标峰以及任何已知的假阳性峰(包括噪音、柱流失和衍生物化试剂峰)均从数据矩阵中去除, 并进行去冗余和峰合并。同时对代谢物进行搜库鉴定, 主要数据库为 Fiehn 和 NIST 公共数据库。搜库后的数据上传至美吉生物云平台上(<https://cloud.majorbio.com>)进行分析。首先进行数据预处理, 数据矩阵用 80% 规则来去除缺失值, 即保留至少一组样品中非零值 80% 以上的变量, 再进行填补空缺值(原始矩阵中最小值填补空缺值), 为减小样品制备及仪器不稳定带来的误差, 用总和归一化法对样本质谱峰的响应强度进行归一化, 得到归一化后的数据矩阵。同时删除 QC 样本相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)>30% 的变量, 并进行 \log_{10} 处理, 得到最终用于后续分析的数据矩阵。

1.3.4 非挥发性物质分析

根据 ZHAO 等^[11]所述的方法进行热处理样品中非挥发性代谢物的提取和鉴定。具体步骤如下: 准确称取 50 mg 冻干固体样品, 使 400 μ L 甲醇溶液(80%, V:V)和 0.02 mg/mL 的 L-2-氯苯丙氨酸作为内标进行代谢物的提取, 将混合物在 -10 $^{\circ}$ C 下静置, 并使用 Wonbio-96c 高通量组织研磨仪, 在 50 Hz 下处理 6 h, 然后立即在低温环境下以 40 kHz 超声处理 30 min。将样品材料在低温下保存长达 30 min 以使蛋白质凝固, 然后在 4 $^{\circ}$ C 下以 12000 r/min 离心 15 min。将上清液转移到小瓶中, 用于液相色谱-串联质谱技术(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)分析。负离子模式为 -3500 V, 正离子模式为 3500 V, 毛细管温度为 325 $^{\circ}$ C, 加热器温度为 425 $^{\circ}$ C, MS 分辨率为 60000, MS/MS 分辨率为 75000。质量范围设定为 70~1050 m/z 。样品进样量为 2 μ L, 流速为 0.4 mL/min。柱温保持在 40 $^{\circ}$ C。在分析期间, 所有样品均储存在 4 $^{\circ}$ C。

上机完成之后, 液相色谱-质谱仪(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)原始数据导入代谢组学处理软件 Progenesis Q1 (Waters Corporation, Milford, USA)进行基线过滤、峰识别、积分、保留时间校正、峰对齐, 最终得到一个保留时间、质荷比和峰强度的数据矩阵, 同时将 MS 和 MS/MS 质谱信息与代谢公共数据库 HMDB (<http://www.hmdb.ca/>)和 Metlin (<https://metlin.scripps.edu/>)以及美吉自建库进行匹配, 得到代谢物信息。搜库后的矩阵数据上传至美吉生物云平台上(<https://cloud.majorbio.com>)进行分析。首先数据矩阵采用 80% 规则去除缺失值, 再进行填补空缺值; 用总和归一化法对样本质谱峰的响应强度进行归一化。同时删除 QC 样本 RSD>30% 的变量, 并进行 \log_{10} 处理, 得到最终用于后续分析的数据矩阵。

1.4 数据处理

HS-SPME-GC-MS 和 LC-MS/MS 数据集进行的数据

筛选、数据归一化和数据分析参考 ZHAO 等^[11]所述的方法。数据处理中, 利用 MetaboAnalyst 的内置统计分析对数据进行了筛选和准备处理, 并应用偏最小二乘法判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)将数据呈现在 MetaboAnalyst (<https://www.MetaboAnalyst.ca>)中。Progenesis Q1 软件处理下, 根据保留时间、 m/z 和碎片信息对 LC-MS 数据中的非挥发性物质进行鉴定。替换检验用于评估计算精度和过度拟合, 单尾 t 检验($P<0.05$)用于确定组间的显著差异和预测变量重要性(variable importance in projection, VIP)得分, VIP 分值用作 PLS-DA 模型中变量重要性的指标标准。使用 Origin 2018 创建图表, GraphPad Prism 9 用于分析数据差异显著性($P<0.05$), 所有数据均以均值 \pm 标准偏差呈现。

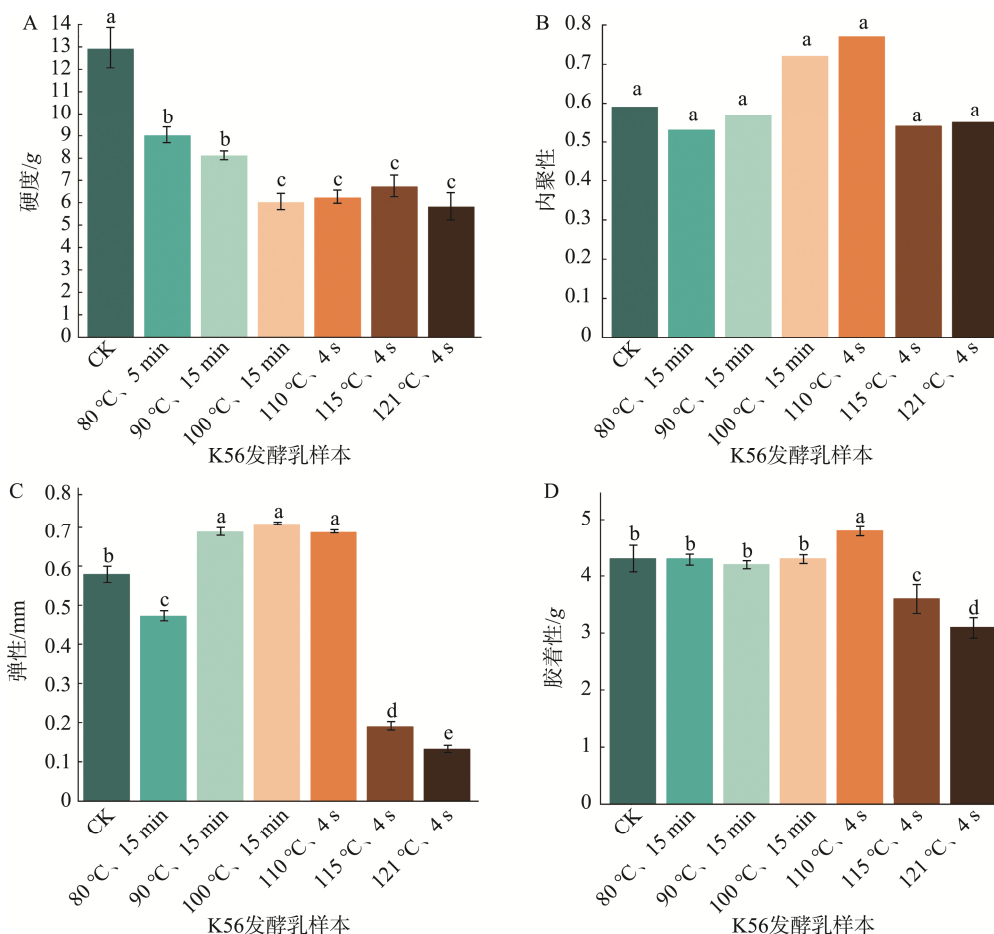
2 结果与分析

2.1 热处理 K56 发酵乳质构特性

通过质地分析仪测量凝固型发酵乳质构, 包括硬度、内聚性、弹性和胶着性。结果如图 1A 所示, 对照组发酵乳的硬度为 12.9 g, 发酵乳经 80 $^{\circ}$ C、15 min 处理后硬度降低为 9.0 g。与对照组相比, 发酵乳在 90 $^{\circ}$ C、15 min 和 100 $^{\circ}$ C、15 min 处理后硬度显著降低($P<0.05$), 分别为 8.1 g 和 6.0 g。发酵乳在 110 $^{\circ}$ C、4 s 处理后硬度为 6.2 g, 与 115 $^{\circ}$ C、4 s 和 121 $^{\circ}$ C、4 s 的硬度相比无显著性差异($P>0.05$)。牛乳在加热处理过程中, 乳清蛋白会通过巯基和二硫键在分子间发生二硫键的交换, 经变性的 α -乳白蛋白与 β -乳球蛋白发生聚集结合, 形成更大的乳清蛋白聚集集体, 使得发酵乳硬度有所增加^[12], 但是温度过高就会使钙离子与发酵乳中的酪蛋白之间的交联作用降低, 减弱形成的凝胶网络, 导致硬度降低。

内聚性结果如图 1B 所示, 对照组内聚性为 0.59, 发酵乳经 80 $^{\circ}$ C、15 min 和 90 $^{\circ}$ C、15 min 处理后内聚性下降为 0.54 和 0.57。与对照组对比, 发酵乳经 100 $^{\circ}$ C、15 min 和 110 $^{\circ}$ C、4 s 处理后内聚性增加了 0.13 和 0.18。115 $^{\circ}$ C、4 s 和 121 $^{\circ}$ C、4 s 与对照组的内聚性无显著性差异($P>0.05$)。80~110 $^{\circ}$ C 热处理条件下, 随着热处理温度的增加, 内聚性呈现上升趋势。在 110 $^{\circ}$ C、4 s 处理下内聚性效果最佳。100 $^{\circ}$ C、15 min 和 110 $^{\circ}$ C、4 s 的热处理条件下可能增加了微凝胶的尺寸以及微凝胶之间的键的数量和强度, 形成了致密、均匀、更耐机械应力和刚性的凝胶网络, 从而增加了样品的坚固性和一致性。此外, 更高的内聚性也与更强的凝胶结构相关。然而, 较高温度会导致微凝胶过度聚集, 形成大小不规则和弱相互作用的微凝胶簇, 这导致凝胶网络的微观结构粗糙, 从而使质构特征下降。

弹性结果如图 1C 所示, 对照组弹性为 0.578 mm, 发酵乳经过 80 $^{\circ}$ C、15 min 处理后的弹性显著降低为 0.472 mm ($P<0.05$)。随着热处理温度的增加, 弹性在 90 $^{\circ}$ C、15 min



注：不同字母表示组间具有差异性显著($P<0.05$)。

图 1 不同热处理条件对 K56 发酵乳样品硬度(A)、内聚性(B)、弹性(C)、胶着性(D)的影响

Fig.1 Effects of different heat treatment conditions on the hardness (A), cohesiveness (B), elasticity (C) and gumminess (D) of K56 fermented milk samples

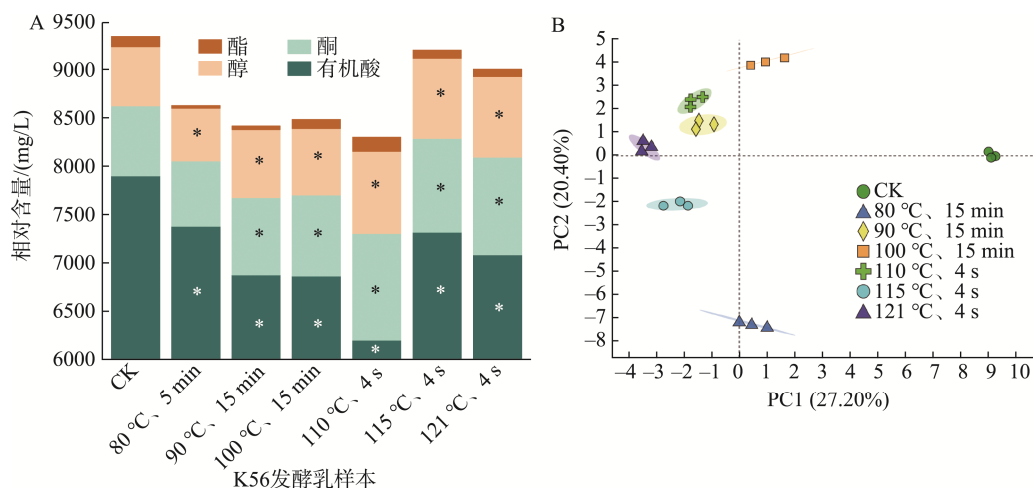
到 110 °C、4 s 热处理条件下从 0.688 mm 增加到 0.708 mm。在 80~110 °C 热处理条件下，随着热处理温度的增加，弹性基本呈现上升趋势。与对照组相比，发酵乳在 115 °C、4 s 和 121 °C、4 s 处理下的弹性显著降低了 0.389 mm 和 0.446 mm ($P<0.05$)。结果表明热处理温度从 90 °C、15 min 增加至 110 °C、4 s，发酵乳结构紧实，能更好地保持形状，不易破碎；且发酵乳具有较强的回复力，受压后能迅速恢复可能是由于高温加热处理有助于乳清蛋白变性，主要的乳清蛋白和 β -乳球蛋白会与酪蛋白相互作用，凝乳形成一个稳定的凝固体^[12]，所以高温时其弹度较大。但是超高温处理或长时间加热可能会导致 κ -酪蛋白和 β -乳球蛋白聚合物结构的改变，影响胶体性质，从而降低弹性^[13]。

胶着性结果如图 1D 所示，对照组胶着性为 4.3 g，发酵乳经过 80 °C、15 min、90 °C、15 min 和 100 °C、15 min 处理的胶着性与对照组的内聚性无显著性差异($P>0.05$)。随着热处理温度的增加，样品的胶着性在 110 °C、4 s 处理下显著增加至 4.8 g ($P<0.05$)，效果最佳。在 121 °C、4 s 显著降低至 3.1 g ($P<0.05$)。在 110 °C、4 s 处理的发酵乳中

乳清蛋白与酪蛋白结合可能形成了较强的凝胶结构，聚集成较大的蛋白质复合物，提高了发酵乳的凝胶强度，增加了发酵乳的胶着性^[14]，使发酵乳口感醇厚。

2.2 热处理 K56 发酵乳挥发性风味物质的变化

不同热处理条件下 K56 发酵乳共检测出 59 种挥发性风味物质。发酵乳的风味特征是醇、酸、醛、酮、酯等多种风味物质综合作用的结果，但并非每种风味物质都对样品风味起决定性作用，只有在其浓度超过阈值时才能被察觉，并产生特定的风味^[15]。由图 2A 可知，酯类、醇类、酸类、有机酸是 7 组样品中主要的挥发性风味物质。经过热处理后，与对照组相比(7916.52 mg/L)，所有热处理组有机酸相对含量均显著降低，其中 110 °C 的有机酸含量最低(6208.32 mg/L，占总物质相对含量的 12%) ($P<0.05$)。在 90~121 °C 热处理后，酮类物质显著增加，其中 110 °C、4 s 含量最高(1105.33 mg/L，占总物质相对含量的 2.1%) ($P<0.05$)。与对照组相比(613.2857 mg/L)，经过热处理组的醇类物质发生显著变化，其中 80 °C、15 min 处理后，显著



注: *表示存在显著性差异($P < 0.05$), 图 3 同。

图 2 不同热处理条件下 K56 发酵乳样品的挥发性风味物质种类与含量(A)和主成分分析(B)

Fig.2 Volatile flavor compounds and their content (A) and principal component analysis (B) of K56 fermented milk samples under different heat treatment conditions

降低; 90~121 °C 热处理后, 显著增加($P < 0.05$)。虽然乳糖、脂质、柠檬酸和蛋白质的酶促或化学转化可能发生, 但热灭活样品中酯、酸、醇和酮含量的变化主要由加热过程中的温度影响酯、酸、酮和醇成分, 如乳酸、己酸、3-羟基-2-丁酮、2,3-戊二酮等。

2.3 热处理 K56 发酵乳挥发性风味物质主成分分析

基于筛选出的 19 种主体挥发性风味物质成分对不同热处理条件的发酵乳样品进行主成分分析(principal component analysis, PCA), 由图 2B 可知, PC1 贡献率为 27.20%, PC2 贡献率为 20.40%, 总贡献率为 47.60%, 表明第 1 和第 2 主成分能较好地反映样品风味特征。CK 位于 Y 轴右侧且与其他样本距离较远, 说明与其他样本的非挥发性代谢特征差异较大。经过热处理 80 °C、15 min 和 100 °C、15 min 处理的样品分布在 Y 轴右侧, 其余样品分布在 Y 轴左侧, 说明在 PC1 上热处理 80 °C、15 min 和 100 °C、15 min 处理的样品与其他 4 组(90 °C、15 min, 110 °C、4 s, 115 °C、4 s 和 121 °C、4 s)存在差异显著。在 PC2 上样本大致分布两部分, 其中, 热处理 90 °C、15 min, 110 °C、4 s 和 121 °C、4 s 分布在 X 轴上方, 热处理 115 °C、4 s 分布在 X 轴下方, 说明热处理 90 °C、15 min, 110 °C、4 s 和 121 °C、4 s 条件下与热处理 115 °C、4 s 条件下存在差异显著。并且 90 °C、15 min 和 110 °C、4 s 热处理条件下的相关性较高。

2.4 热处理 K56 发酵乳挥发性风味物质的相对气味活性值分析

挥发物对发酵乳的总体香味特征的影响不仅取决于发酵乳的浓度和相对丰富度, 还取决于它们各自的气味阈值。在探究热处理对 K56 发酵乳风味影响过程中, 本研究

基于相对气味活性值(relative odor activity value, r-OAV > 1.0)筛选出 19 种关键挥发性风味物质, 这些物质主要包括酯类、醇类、酮类和有机酸类。热处理后, 这些化合物的 r-OAV 变化显著, 表明热处理对发酵乳的风味特性有重要影响^[16]。与 CK 样品相比, 5 种热处理条件的样品(90 °C、15 min, 100 °C、15 min, 110 °C、4 s, 115 °C、4 s 和 121 °C、4 s)中酮的 OAV 显著增加。相反, 80 °C、15 min 样本显示酯和酮类的 OAVs 显著降低($P < 0.05$); 酯类在 80 °C、15 min 到 110 °C、4 s 显著增加($P < 0.05$)。热处理后, 显著降低了有机酸的 r-OAV ($P < 0.05$), 其中 110 °C、4 s 的 r-OAV 为 175.34。酮、醛和酯是非常重要的区别气味的化合物, 它们可用作评价发酵乳的总体风味特征的气味标记物^[10]。

如图 3 所示, 酯类物质中, 对照组 CK 相比(1103.90), 热处理后酯类物质在 80 °C、15 min 至 110 °C、4 s 时显著增加, 而在 110 °C、4 s 至 121 °C、4 s 时显著降低。在这些酯类中, 有 3 种酯类物质 r-OAV 值 > 1, 分别为 δ -癸内酯、乙酸异丁酯和苯甲酸甲酯, 其分别具有奶酪香、菠萝香和花香, 是影响发酵乳风味重要物质。 δ -癸内酯主要通过非酶促的酯交换反应形成, 其气味阈值(0.037 mg/kg)和苯甲酸甲酯(0.028 mg/kg)较低, 表明即使是微小的变化也能显著影响气味强度。 δ -癸内酯的存在与短链和中链脂肪酸密切相关, 它通过羟基脂肪酸分子的乳酰化反应产生, 具有奶酪或椰子味。在所有风味物质中, δ -癸内酯和乙酸异丁酯的占比最高, 因此它们是 K56 发酵乳的主要风味贡献物质。

发酵乳在热处理条件下, 有 3 种醇类物质 r-OAV 值 > 1, 分别为 2-己醇、3-戊醇、1-辛醇。2-己醇是提供发酵乳风味重要物质之一, 具有甜果香; 1-辛醇是发酵乳制品中重要的醇类化合物, 具有花香和果香; 3-戊醇具有特殊香气。此外, 2-己醇的含量及风味表现^[17], 可能在一定程度上反

映出原料的新鲜度、营养成分等质量特性, 有助于对发酵乳品质进行综合评估。醇类物质可以通过一系列反应转化成酸, 所以是发酵乳必不可少的物质^[18]。

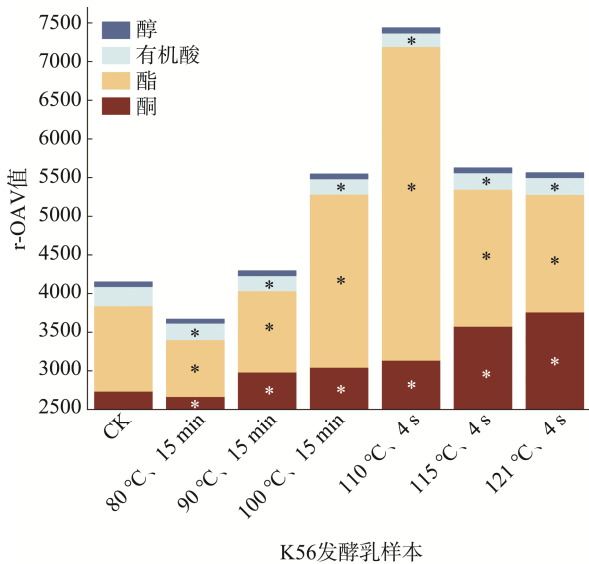


图 3 不同热处理条件下 K56 发酵乳样品 r-OAV 分析
Fig.3 Analysis of r-OAV in K56 fermented milk samples under different heat treatment conditions

酮类物质中, 热处理温度从 90 °C 增加至 121 °C 热处理, 酮类的 r-OAV 显著增加($P < 0.05$)。有 4 种酮类物质 r-OAV 值 > 1, 分别为 2,3-丁二酮、2-庚酮、2-壬酮、2-十三烷酮。其中 2,3-丁二酮在发酵乳风味物质的形成中扮演着重要的角色^[19], 并具有奶油香气, 2-壬酮为发酵乳关键风味物质, 呈现果香, 使得发酵乳风味更醇厚^[20]。2-庚酮和 2-庚酮分别具有果香和椰子香气。

酸是几种其他化合物的前体物, 包括酮、醇和酯。主要在乳酸代谢、蛋白质分解及脂肪分解等反应过程中产生^[21]。与对照组相比(251.32), 显著降低了有机酸的 r-OAV ($P < 0.05$), 其中 110 °C、4 s 的 r-OAV 最低, 为 175.34。

2.5 非挥发性风味物质的检测及特征风味分析

采用 UPLC-Q Exactive HF-X 结合电喷雾电离正负离子[electrospray ionization positive, ESI(±)]扫描模式测定非挥发性代谢谱。如图 4A 所示, 在 6 个发酵乳样品中鉴定了 16 类共 652 种化合物的非挥发性代谢谱的综合评估。在发酵乳样本的非挥发性代谢物中, 观察到脂类及其衍生物、碳水化合物、有机酸、氨基酸和肽及其衍生物普遍存在。

2.6 热处理 K56 发酵乳非挥发性风味物质主成分分析

对发酵乳的非挥发性代谢谱的研究表明, 如图 4B 所示, PCA 图揭示了不同热处理条件下的发酵乳和 CK 样品之间的显著差异。根据二维散点图中直观地描述出, 前两个主成分的组合贡献率为 37.40%。CK 位于 Y 轴右侧且与其他样本距离较远, 说明与其他样本的非挥发性代谢特征差异较大。过热处理 80 °C、15 min, 90 °C、15 min 和 110 °C、4 s 处理的样品分布在 Y 轴右侧, 其余样品分布在 Y 轴左侧, 并且基本都分散在 X 轴上。值得注意的是, 热处理 90 °C、15 min 和 110 °C、4 s, 100 °C、15 min 和 115 °C、4 s 样本分布较密集, 甚至相互重叠, 说明存在相似的代谢物。在评估的各种热处理条件下, 80 °C、15 min 至 121 °C、4 s 范围内的温度显著影响非挥发性代谢特征。

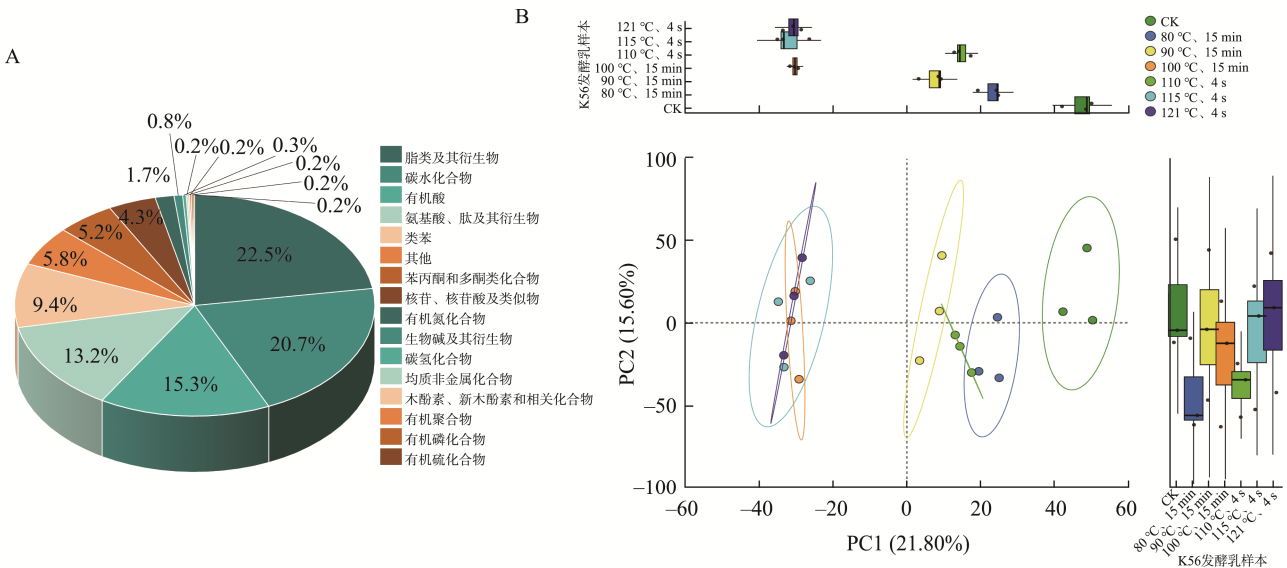


图 4 K56 发酵乳非挥发性风味物质的特征风味图(A)和 PCA 图(B)
Fig.4 Characteristic flavor of non-volatile flavor compounds (A) and PCA (B) of K56 fermented milk

2.7 热处理 K56 发酵乳主要非挥发性物质分析

脂类通过氧化分解成醛、醇、酮、酯和其他挥发性化合物, 这些化合物在形成奶味中起着重要作用。如图 5A 所示, 非挥发性组分中的脂类组分明显地分成 3 簇。簇 A 在热处理 100 °C、15 min, 115 °C、4 s 和 121 °C、4 s 的样品中脂类前 30 物质显示的相对丰度。簇 B 表示 CK 组的脂类前 30 物质显示的相对丰度。簇 C 表明在热处理 80 °C、15 min, 90 °C、15 min 和 110 °C、4 s 的样品中脂类前 30 物质分成相对丰富。发酵乳中的脂肪酸通过脂解或氧化作用生成己醛或不饱和醛酮, 是发酵乳风味物质产生的主要途径之一。在热处理 110 °C、4 s 条件下, 非挥发性物质中的 2-羟基己二酸、(R)-1-辛烯-3-醇含量相应增加, 是因为在酸奶的发酵过程中, 乳酸菌等微生物具有一定的脂解能力, 能够分解乳脂肪等脂类物质^[22], 从而使这些风味物质的前体物质释放出来, 并进一步转化生成(R)-1-辛烯-3-醇, 导致其含量升高。此外, 脂质的氧化过程也可能促进 2-羟基己二酸、(R)-1-辛烯-3-醇的形成^[23], 并且 (R)-1-辛烯-3-醇具有蘑菇、薰衣草、玫瑰和干草香气等特殊香气, 有助于提升酸奶整体的感官品质, 使其风味更具特色。在热处理 90 °C、15 min 到 121 °C、4 s 条件下, 癸二酸减少, 癸二酸具有特殊的气味和味道, 可能会给酸奶带来异味。这种异味与酸奶通常的风味不相融合, 会破坏酸奶原有的风味特征, 降低消费者对酸奶的喜好程度。由高温引发的脂质氧化产生的异味降低了消费者对产品的接受度。

碳水化合物通过发酵剂发酵, 产生主要的发酵奶风

味化合物, 包括乳酸、柠檬酸、甲醇、乙醛、双乙酰和乙二醇^[24]。如图 5B 所示, 非挥发性组分中的碳水化合物类组分明显地分成两簇。簇 A 为热处理 100 °C、15 min, 110 °C、4 s 和样品中碳水化合物中前 30 物质显示出的相对丰度。簇 B 表示 CK 组和 80 °C、15 min, 90 °C、15 min, 115 °C、4 s, 121 °C、4 s 的碳水化合物类前 30 物质显示的相对丰度。如图 5B 所示, 热处理 80 °C、15 min, 90 °C、15 min, 100 °C、15 min, 110 °C、4 s, 115 °C、4 s 和 121 °C、4 s 的碳水化合物的丰富度都基本呈现下降趋势。其中 CK 组的葡糖胺丰富度较高, 而热处理 100 °C、15 min, 110 °C、4 s, 121 °C、4 s 条件下的葡糖胺丰富度降低, 其原因可能是葡糖胺的氨基可与酸奶中的蛋白质或其他糖类的羰基发生美拉德反应^[25], 生成具有特殊风味和色泽的物质, 如吡嗪类、呋喃类化合物等, 从而影响酸奶的风味和品质。

在酸奶发酵过程中, 微生物通过特定的代谢途径产生有机酸。乳酸菌利用葡萄糖进行同型乳酸发酵, 将葡萄糖转化为乳酸。这些代谢途径不仅产生了有机酸, 还可能产生其他风味物质和营养物质, 共同影响酸奶的品质。如图 6A 所示, 非挥发性组分中的碳水化合物类组分明显地分成两簇。簇 A 为热处理 100 °C、15 min, 115 °C、4 s 和 121 °C、4 s 样品中有机酸类前 30 物质显示出的相对丰度。簇 B 表示 CK 组, 80 °C、15 min, 90 °C、15 min 和 110 °C、4 s 的有机酸前 30 物质显示的相对丰度。在 90 °C、15 min 的加热处理条件下, 柠檬酸丰富度增加, 作为主要有机酸的柠檬酸在促进具有清爽风味特征的发酵乳的生产中起着关键作用^[26]。

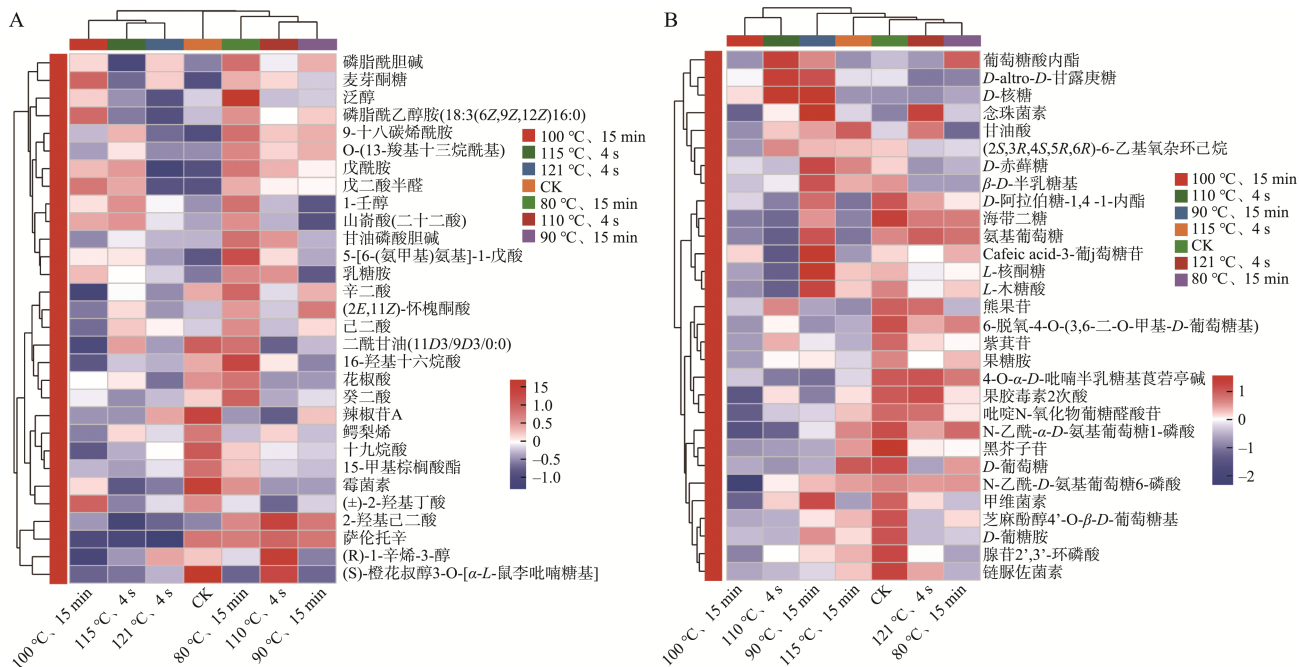


图 5 不同热处理条件下 K56 发酵乳样品非挥发性风味物质脂类(A)和碳水化合物(B)的热图与聚类分析

Fig.5 Heatmap and clustering analysis of non-volatile flavor compounds lipids (A) and carbohydrates (B) in K56 fermented milk samples under different heat treatment conditions

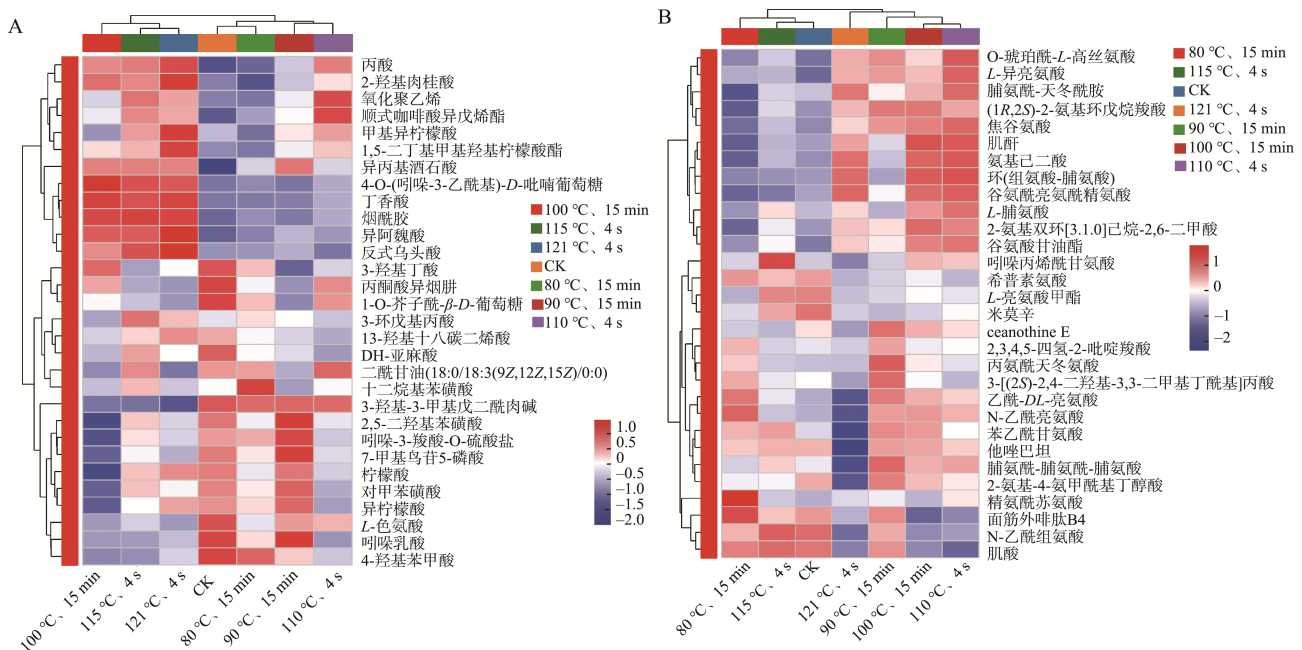


图 6 不同热处理条件下 K56 发酵乳样品非挥发性风味物质有机酸(A)和氨基酸(B)的热图与聚类分析

Fig.6 Heatmap and clustering analysis of non-volatile flavor compounds organic acids (A) and amino acids (B) in K56 fermented milk samples under different heat treatment conditions

蛋白质可以水解,产生游离氨基酸和肽。这些化合物进一步转化,例如斯特勒克降解反应和美拉德反应,导致形成多种风味化合物,包括氨、胺、醛、酚、吲哚和醇,这些化合物有助于发酵乳的特征风味。如图 6B 所示,非挥发性组分中的氨基酸分组明显地分成两簇。簇 A 为 CK 组和热处理 80 °C、15 min, 115 °C、4 s 的样品中氨基酸前 30 物质显示出的相对丰度。簇 B 表示热处理 90 °C、15 min, 100 °C、15 min, 110 °C、4 s 和 121 °C、4 s 的氨基酸前 30 物质显示的相对丰度。在热处理 100 °C、15 min, 110 °C、4 s, 121 °C、4 s 条件时 O-琥珀酰-L-高丝氨酸、L-异亮氨酸、脯氨酸-天冬酰胺、(1R,2S)-2-氨基环戊烷羧酸、焦谷氨酸、谷氨酰亮氨酸精氨酸、L-脯氨酸的相对丰富度增加,这可能是牛奶中的还原糖与蛋白质中的氨基酸残基发生美拉德反应的速率加快。例如 L-异亮氨酸、脯氨酸等氨基酸,它们的侧链结构较为活泼,更容易参与美拉德反应^[27],从而导致这些氨基酸及其相关肽段或衍生物的含量相对升高。相反在热处理 80 °C、15 min, 115 °C、4 s 时,美拉德反应速率相对较慢,对这些氨基酸及其衍生物消耗较少使得它们的含量有所降低。氨基酸、肽及衍生物随着温度增加含量呈现上升趋势,其中热处理 100 °C、15 min 和 110 °C、4 s 处理后,丰富度上升显著。

2.8 吲哚物质

色氨酸(tryptophan, Trp)是一种必需氨基酸,可由牛奶、奶酪等膳食蛋白质天然提供,是大量代谢物的生物合

成前体^[28]。Trp 代谢物可来源于肠道微生物对 Trp 的直接转化,在共生细菌的脱氮作用下产生,如吲哚、吲哚丙酸(indole-3-propionic acid, IPA)、吲哚乳酸(indole-3-lactic acid, ILA)、和吲哚丙烯酸(indole-3-acrylic acid, IA)。这些代谢物在维持胰腺细胞的上皮细胞结构和功能^[29]、胃肠道蠕动^[30]和胰岛素分泌^[31]中起着关键作用,还可以维持免疫细胞的稳态和功能。此外,它们对与压力相关的抑郁症、精神分裂症以及阿尔茨海默病和帕金森病的影响已广为人知^[32]。

本研究在热处理 K56 发酵乳中发现了一些吲哚类物质,如图 7 所示,簇 A 为热处理 90 °C、15 min, 100 °C、15 min, 115 °C、4 s, 121 °C、4 s 的样品中吲哚物质的相对丰度。簇 B 为 CK 组与热处理 80 °C、15 min, 110 °C、4 s 的样品中吲哚物质的相对丰度。在对照组和 6 个热处理组样品中,共发现 12 个显著不同的吲哚物质,包括吲哚丙烯酸、5-甲氧基吲哚乙酸酯、5-羟色氨酸、3-甲基氧化吲哚、4-O-(吲哚-3-乙酰基)-D-吡喃葡萄糖、吲哚-3-羧酸、吲哚-3-羧酸-O-硫酸盐、L-色氨酸、吲哚乳酸、3-甲基二氧吲哚。5-甲氧基吲哚乙酸酯和 3-甲基二氧吲哚是通过色氨酸代谢转化的。有研究表明,这些 Trp 涉及到的代谢途径主要包括各种生物碱的生物合成、各种其他次生代谢产物的生物合成、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢和辅助因子的生物合成等^[27]。热处理可以改变发酵乳中微生物的代谢活动和酶的活性,从而影响吲哚类物质的生成和转化,进一步优化发酵乳的功能特性。

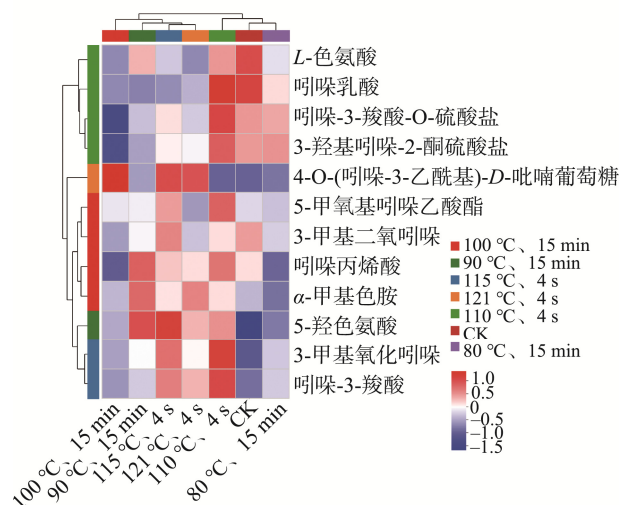


图 7 不同热处理条件下 K56 发酵乳样品非挥发性风味物质吲哚物质的热图与聚类分析

Fig.7 Heatmap and clustering analysis of non-volatile flavor compounds indole compounds in K56 fermented milk samples under different heat treatment conditions

3 结论

热处理显著影响 K56 发酵乳的质构特性和风味物质的组成。110 °C、4 s 热处理下, K56 发酵乳展现出最佳的质构特性, 硬度降低而内聚性、弹性和胶着性增强, 表明其口感得到改善。同时, 该处理条件下的挥发性物质的种类和含量基本优于其他处理条件, 19 种主体挥发性风味物质中 δ -癸内酯和乙酸异丁酯的是 K56 发酵乳的主要风味贡献物质。本研究为优化发酵乳的生产工艺、提升产品品质提供了重要的科学依据。

参考文献

- [1] 傅倩倩. 添加具有抑制霉菌特性乳酸菌生产酸奶工艺条件的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
FU QQ. Study on the process of producing greek yogurt by adding lactobacillus with antifungal properties [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [2] 郑莎莎. 加工参数对刺梨薏仁米酸奶的影响及其货架期预测[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
ZHENG SS. The impact of processing parameters on rosa roxburghii tratt and coix seed yogurt and its shelf life prediction [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [3] GAO F, LI D, LI H, *et al.* Influence of post-heating treatment on the sensory and textural properties of stirred fermented milk [J]. *Foods*, 2023, 12(16): 3042.
- [4] 杨新尧, 康志远. 后热处理工艺对酸奶贮藏过程中后酸化控制的影响[J]. *中国乳品工业*, 2019, 47(8): 58–60, 64.
YANG XY, KANG ZY. Effect of heat treatment on yoghurt post acidification control during shelf life [J]. *China Dairy Industry*, 2019,

47(8): 58–60, 64.

- [5] 王伟佳, 高晓夏月, 刘爱国, 等. 不同热处理无乳糖酸奶与普通酸奶品质的比较[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(5): 99–104.
WANG WJ, GAO XXY, LIU AIG, *et al.* Quality comparison of lactose free yoghurt and ordinary yoghurt with different heat treatment [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(5): 99–104.
- [6] LU H, ZHAO W, LIU W H, *et al.* Safety evaluation of *Bifidobacterium lactis* BL-99 and *Lactocaseibacillus paracasei* K56 and ET-22 *in vitro* and *in vivo* [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 686541.
- [7] MIAO Z, ZHENG H, LIU WH, *et al.* *Lactocaseibacillus paracasei* K56 attenuates high-fat diet-induced obesity by modulating the gut microbiota in mice [J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2023, 15(4): 844–855.
- [8] LI X, ZHAO Z, SHI S, *et al.* Flavor properties of post-heated fermented milk revealed by a comprehensive analysis based on volatile and non-volatile metabolites and sensory evaluation [J]. *Current Research in Food Science*, 2024, 9: 100892.
- [9] GHARIBZAHEDI SMT, ALTINTAS Z. Integrated ultrasonic-transglutaminase modification of lesser mealworm protein isolate: A pioneering cobalamin delivery vehicle in gluten-free breads [J]. *Food Chemistry*, 2024, 448: 139069.
- [10] WANG S, OLARTE-MANTILLA SM, STOKES J, *et al.* pH dominates the temporal perception of astringency sub-qualities and saliva friction response—A study under iso-pH and iso-titratable acidity conditions in model wine [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 146: 109274.
- [11] ZHAO Z, WU J, SUN Z, *et al.* Postbiotics derived from *L. paracasei* ET-22 inhibit the formation of *S. mutans* biofilms and bioactive substances: An analysis [J]. *Molecules*, 2023, 28(3): 1236.
- [12] 陈峰青, 汪建明, 牛思思, 等. 不同热处理对酸奶品质特性的影响[J]. *食品工业*, 2017, 38(1): 141–145.
CHEN FQ, WANG JM, NIU SS, *et al.* Effect of different heat treatments on the quality characteristics of yogurt [J]. *The Food Industry*, 2017, 38(1): 141–145.
- [13] 刘立鹏, 李雪晴, 李红娟, 等. 脱脂乳的不同热处理工艺对酸奶奶质构和微观结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(3): 26–30.
LIU LP, LI XQ, LI HJ, *et al.* Effect of different heat treatment processes of skim milk on texture and microstructure of yogurt [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(3): 26–30.
- [14] 汪清美, 徐源, 张雨洁, 等. 乳清蛋白粉与豆乳不同质量比对凝固型沙棘酸奶品质的影响[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(8): 90–93, 99.
WANG QM, XU Y, ZHANG YJ, *et al.* Effect of different mass ratios of whey protein powder and soybean milk on the quality of solidified sea buckthorn yogurt [J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(8): 90–93, 99.
- [15] 于豪, 万典慧, 李周, 等. 基于不同添加物的酸奶挥发性物质含量比较[J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(10): 194–199.
YU H, WAN DH, LI Z, *et al.* Comparison of volatile substances in yogurt based on different additives [J]. *China Food Additives*, 2024, 35(10): 194–199.
- [16] 李美善, 李凤林, 崔嘉莹, 等. 不同热处理对泡椒挥发性风味化合物的影响分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(6): 45–55.

- LI MS, LI FL, CUI JY, *et al.* Analysis of the influence of different heat treatment methods on the volatile flavor compounds of pickled pepper [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(6): 45–55.
- [17] ZHANG YC, LIN QB, ZHONG HN, *et al.* Identification and source analysis of volatile flavor compounds in paper packaged yogurt by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 34: 100947.
- [18] 贺红军, 邹慧, 孙宁, 等. 紫薯酸奶和普通酸奶挥发性风味物质差异性研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(8): 225–230.
- HE HJ, ZHOU H, SUN N, *et al.* Volatile flavor compounds in regular and purple sweet potato yogurt [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2014, 30(8): 225–230.
- [19] 高鑫, 李博, 梅俊. 桑椹凝固型酸奶挥发性风味成分的分析[J]. *食品工业*, 2018, 39(5): 215–218.
- GAO X, LI B, MEI J. Analysis of the volatile flavor compounds from set-style yogurt with addition of mulberry juice [J]. *The Food Industry*, 2018, 39(5): 215–218.
- [20] TIAN H, SHI Y, ZHANG Y, *et al.* Screening of aroma-producing lactic acid bacteria and their application in improving the aromatic profile of yogurt [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(10): e12837.
- [21] BATISTA ALD, SILVA R, CAPPATO LP, *et al.* Developing a synbiotic fermented milk using probiotic bacteria and organic green banana flour [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 38: 242–250.
- [22] WANG MS, FAN M, ZHENG AR, *et al.* Characterization of a fermented dairy, sour cream: Lipolysis and the release profile of flavor compounds [J]. *Food Chemistry*, 2023, 423: 136299.
- [23] LI Y, WANG D, ZHENG W, *et al.* Revealing the mechanism of flavor improvement of fermented goat milk based on lipid changes [J]. *Food Chemistry*, 2024, 458: 140235.
- [24] YU H, GUO W, XIE T, *et al.* Aroma characteristics of traditional huangjiu produced around winter solstice revealed by sensory evaluation, gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Reviews International*, 2021, 145: 110421.
- [25] GAO P, ZHANG W, ZHAO X, *et al.* The effect of maillard reaction on flavour development of protein hydrolysates from cheese [J]. *Food Chemistry*, 2023, 437(Pt 1): 137569.
- [26] COSTA MPD, FRASAO BDS, LIMA BRCDC, *et al.* Simultaneous analysis of carbohydrates and organic acids by HPLC-DAD-RI for monitoring goat's milk yogurts fermentation [J]. *Talanta*, 2016, 152: 162–170.
- [27] 张建友, 费漂锋, 孙蕾, 等. 鲢鱼佃煮工艺优化及佃煮液组分分析[J]. *肉类研究*, 2023, 37(4): 13–20.
- ZHANG JY, FEI SF, SUN L, *et al.* Optimization of cooking process of skipjack tuna tsukudani and composition analysis of seasoning solution [J]. *Meat Research*, 2023, 37(4): 13–20.
- [28] AGUS A, PLANCHAIS J, SOKOL H. Gut microbiota regulation of tryptophan metabolism in health and disease [J]. *Cell Host & Microbe*, 2018, 23(6): 716–724.
- [29] BANSAL T, ALANIZ RC, WOOD TK, *et al.* The bacterial signal indole increases epithelial-cell tight-junction resistance and attenuates indicators of inflammation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(1): 228–233.
- [30] MAWE GM, HOFFMAN JM. Serotonin signalling in the gut-functions, dysfunctions and therapeutic targets [J]. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 2013, 10(8): 473–486.
- [31] HOLST JJ. The physiology of glucagon-like peptide 1 [J]. *Physiological Reviews*, 2007, 87(4): 1409–1439.
- [32] SCHWARCZ R, STONE TW. The kynurenine pathway and the brain: Challenges, controversies and promises [J]. *Neuropharmacology*, 2017, 112(Pt B): 237–247.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)