

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80320

白芸豆提取物对凝固型酸奶品质的影响

王紫涵^{1,2} 李岳星^{1,2} 蔡勇建^{1,2} 王建辉^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省预制菜工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省湘味餐调智造与质量安全工程技术研究中心, 湖南 长沙 410023)

摘要: [目的] 探究白芸豆提取物对凝固型酸奶理化性质和风味的影响。[方法] 采用酸度计、滴定法、离心称重法、质构仪和电子鼻分别测定凝固型酸奶的 pH 值、酸度、持水性、质地和挥发性风味特征。[结果] 白芸豆提取物可显著促进酸奶发酵进程 ($P < 0.05$), 其持水力、硬度及苯类挥发性风味物质含量均优于对照组。添加 0.9% 白芸豆提取物可使酸奶持水力、硬度与黏稠度分别提高 13.11%, 9.46%, 13.19%。此外, 添加白芸豆提取物可减少酸奶氢化物、氮氧化物挥发性风味物质含量, 提高长链烷烃挥发性风味物质含量。相关性热图显示, 0.9% 白芸豆提取物添加量与酸奶持水力、长链烷烃挥发性风味物质含量、硬度、黏稠度、黏性绝对值及内聚性绝对值呈正相关性, 表明其可协同优化酸奶质构与风味, 提升综合品质。[结论] 添加 0.9% 白芸豆提取物可促进酸奶发酵, 显著改善凝固型酸奶质地特性和风味特征。

关键词: 白芸豆提取物; 凝固型酸奶; 理化性质; 质构特性; 风味

Effect of white kidney bean extract on the quality of set yogurt

WANG Zihan^{1,2} LI Yuexing^{1,2} CAI Yongjian^{1,2} WANG Jianhui^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Prepared Dishes, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Intelligent Manufacturing and Quality Safety of Xiang Flavored Compound Seasoning for Chain Catering, Changsha, Hunan 410023, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of white kidney bean extract (WBE) on the physicochemical properties and flavor of set yogurt. [Methods] The pH value, acidity, water-holding capacity, texture properties, and volatile flavor characteristics of set yogurt are analyzed using a pH meter, titrimetric method, centrifugation and weighing method, texture analyzer, and electronic nose, respectively. [Results] WBE significantly promotes yogurt fermentation ($P < 0.05$), with water-holding capacity, hardness, and content of benzene volatile flavor compounds all superior to the control group. Adding 0.9% WBE increases the water-holding capacity of yogurt by 13.11%, and the hardness and viscosity by 9.46% and 13.19%, respectively. Besides, the addition of WBE reduces the content of hydrides and nitrogen oxides in volatile flavor compounds of yogurt, while increasing the content of long-chain alkanes in volatile flavor compounds. According to correlation heat maps, the addition of 0.9% WBE is positively correlated with the water-holding capacity, content of long-chain alkanes, hardness, viscosity, absolute value of adhesiveness, and absolute value of cohesiveness of yogurt, indicating that it can synergistically optimize the texture and flavor of yogurt, and enhance the overall quality. [Conclusion] Adding 0.9% WBE helps yogurt fermentation and significantly improves the texture and flavor characteristics of set yogurt.

Keywords: white kidney bean extract; set yogurt; physicochemical properties; texture properties; flavor

以生牛(羊)乳、食品工业用浓缩乳和乳粉中的一种或多种为原料,经杀菌、接种唾液链球菌嗜热亚种和德氏乳杆菌保加利亚亚种发酵制成的产品^[1],具有调节肠道微生物态、增强免疫力和降低血糖等作用^[2-3]。研究发现,添加植

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号:2024YFD2401601,2024YFD2401602);湖南省科技创新领军人才项目(编号:2023RC1056);湖南省重点领域研发计划项目(编号:2024JK2154)

通信作者: 王建辉(1980—),男,长沙理工大学教授,博士。E-mail: wangjh0909@163.com

收稿日期: 2025-02-21 **改回日期:** 2025-05-11

引用格式: 王紫涵,李岳星,蔡勇建,等. 白芸豆提取物对凝固型酸奶品质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 211-216.

Citation: WANG Zihan, LI Yuexing, CAI Yongjian, et al. Effect of white kidney bean extract on the quality of set yogurt[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 211-216.

物源活性成分可提升酸奶健康效益,如小茴香水提液酸奶具有抗氧化特性^[4]、辣木子粉酸奶具有抗菌特性^[5]、桑叶提取物酸奶具有糖脂代谢调控作用^[6](糖化血红蛋白降低 2.92 mmol/mol)。因餐后血糖管理与肥胖防控的功能需求,可调控葡萄糖消化吸收的功能性酸奶已成为新的研究热点,且多以 α -葡萄糖苷酶(α -GLU)和 α -淀粉酶(α -Amylase)为关键考察指标。紫小麦粉酸奶的 α -GLU 抑制率达 38.35%^[7];红番石榴提取物酸奶的 α -GLU 和 α -Amylase 抑制率均达 45.2%^[8];全谷物发酵乳的 α -GLU 抑制率达 46.21%,GI 值为 22.97^[9];以上均表现出显著的酶抑制活性。功能性椰子基酸奶的氧自由基吸收能力提升了 3.2 倍, α -GLU 抑制率增强了 41%^[10];菊花枸杞发酵乳的总酚含量达 35.6 mg GAE/100 g, α -GLU 抑制率为 52.7%^[11]。植物活性成分与益生菌协同作用,可显著提升酸奶的抗氧化能力,抑制 α -GLU 和 α -Amylase 活性,从而实现控糖需求。

白芸豆提取物(white kidney bean extract, WBE)富含芸豆蛋白,含有多球蛋白,能提高人体免疫能力,增强抗病能力^[12],且白芸豆提取物含有较高活性的 α -Amylase 抑制物,可阻断淀粉分解并减少葡萄糖吸收^[13]。Jiang 等^[14]研究发现,富含 α -Amylase 抑制物的芸豆蛋白可调节肠道菌群,回调高血糖模型小鼠血脂代谢参数及炎症细胞因子谱至生理水平,维持肠道微生态稳态。白芸豆提取物酸奶干预可显著上调小鼠氨基酸、能量、核苷酸代谢通路,同时抑制聚糖生物合成相关代谢途径^[15],具备辅助降血糖及体重调控功效,但对酸奶品质和风味尚无评价。研究拟探究白芸豆提取物对以牛奶为原料制备凝固型酸奶的发酵性质、质地特性和风味的影响,以期芸豆功能性发酵乳产品的研发提供依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

白芸豆提取物(WBE):蛋白含量为 70%,西安晋恒化工有限公司;

嗜热乳链球菌、保加利亚乳杆菌:4.0 g/20 U,微康益生菌(苏州)股份有限公司;

纯牛奶:北大荒完达山乳业股份有限公司;

邻苯二甲酸氢钾、氢氧化钠、酚酞、乙醇等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高速分散器:IKA T25 digital ULTRA-TURRAX®型,德国 IKA 公司;

pH 计:pHS-25 型,中国上海仪电科学仪器股份有限公司;

台式高速冷冻离心机:TGL-16M 型,湘仪离心机仪器有限公司;

物性测定仪:TA.XT Plus 型,英国 Stable Micro Systems 公司;

电子天平:AB104-N 型,上海第二天平仪器厂;

电子鼻:PEN3 型,德国 Airsense Analytics 公司。

1.3 方法

1.3.1 白芸豆提取物凝固型酸奶的制备 将 WBE(0%, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%)、蔗糖(6%)分别加入牛奶中,9 000 r/min 均质 3 min,紫外灭菌 20 min 后,接种乳酸菌发酵剂(0.04 g/100 mL),42 ℃ 恒温培养 6 h,4 ℃ 冷藏后熟 16 h,待用^[16]。

1.3.2 pH 值测定 采用酸度计测定。

1.3.3 可滴定酸度测定 按 GB 5009.239—2016 执行。

1.3.4 持水力测定 通过离心称重法测量。离心转速 3 000 r/min,离心时间 20 min。

1.3.5 质构特性分析 通过配备有圆柱形 P/0.5 探针的质构分析仪评估酸奶样品的质构特征。测前距离 20 mm,测前速度 1 mm/s,测后速度 10 mm/s,测试深度 10 mm,触发力 0.03 N。

1.3.6 电子鼻分析 采用 PEN3 电子鼻,冲洗时间 80 s、归零时间 10 s、预采样时间 5 s、测定时间 60 s、载气流速 400 mL/min。

1.3.7 感官评价 参照文献[17],并结合 GB 19302—2025 制订如表 1 所示的感官评定表。由 10 名感官评定员按表 1 进行感官评价。

1.4 数据分析

所有试验均重复 3 次,结果均以平均值±标准偏差表示;数据统计分析使用 Excel 2021 和 IBN SPSS 22.0 软件,绘图使用 Origin 2021、SIMCA 14.1 软件。

2 结果与分析

2.1 对凝固型酸奶 pH 值和可滴定酸度的影响

2.1.1 发酵过程中的 pH 值 由图 1 可知,发酵初期,酸奶

表 1 白芸豆提取物酸奶感官评定表
Table 1 Sensory evaluation for WBE yogurt

评分	气味	滋味	质地	口感	色泽	总体可接受度
7~10	具有酸奶清香味,无异味	酸度适宜且酸甜可口	均匀细腻,允许有少量乳清析出,凝乳完整	口感光滑细腻,无颗粒感	颜色呈乳白色,色泽均一	可接受程度高
4~7	酸奶香味平淡,或稍带豆腥味等异味	酸甜比例不佳	有明显的乳清析出,凝乳较完整	口感较光滑细腻,稍有颗粒感	颜色均匀,颜色略深或略浅,无光泽	可接受程度低
0~4	基本无奶香味,有异味	酸甜比例差	凝乳不良,有大量乳清析出	口感不光滑,有颗粒感	颜色不均匀,上层或底部有沉淀	难以接受

的pH值呈下降趋势(ΔpH 为1.25~1.38),因乳酸菌通过糖酵解途径快速分解乳糖生成乳酸,同时伴随蛋白水解和脂肪分解产生的短链脂肪酸^[18]。添加WBE的酸奶在发酵过程中pH值始终维持在较低水平。当pH值降至4.5时,5种不同WBE添加量的酸奶分别在4.74,4.19,4.10,4.30,3.96 h达到凝固状态。其中,1.2% WBE添加组的凝固时间缩短了16.46% ($P<0.05$),这可能归因于外源WBE的添加能补充碳源和氮源并有效调控发酵动力学,从而显著提升发酵速率^[19-20]。

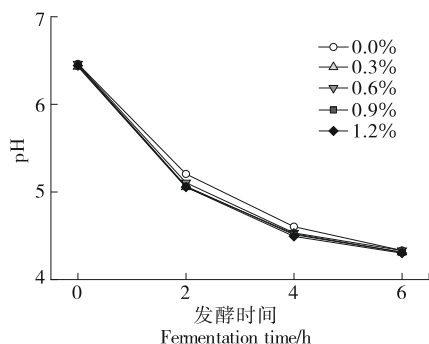


图1 白芸豆提取物对凝固型酸奶发酵过程中pH值的影响
Figure 1 Effect of WBE on pH value during fermentation of set yogurt

2.1.2 后熟完成后酸奶的pH值和可滴定酸度 由图2可知,酸奶后熟完成后,其pH值与可滴定酸度呈显著负相关($P<0.05$),WBE添加量与酸奶酸度呈正相关,表明WBE能有效促进发酵、积累有机酸。添加1.2% WBE可显著提高酸奶酸度。

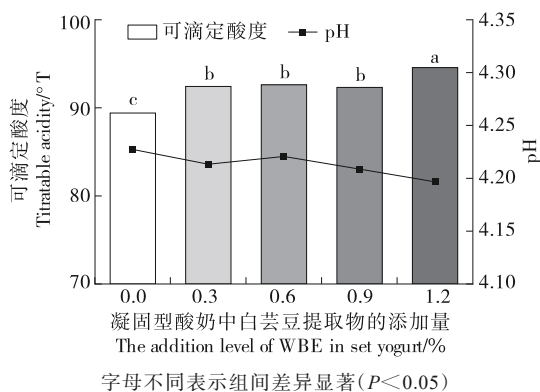


图2 白芸豆提取物对凝固型酸奶后熟后可滴定酸度和pH值的影响
Figure 2 Effect of WBE on post-ripening titratable acidity and pH value of set yogurt

2.2 对凝固型酸奶持水性的影响

凝固型酸奶的持水性是品质评价的关键指标,其直接影响产品稳定性和感官体验。由图3可知,凝固型酸奶的持水性随WBE添加量的增加呈先升后降趋势。当

WBE添加量为0~0.9%时,酸奶持水性显著增强($P<0.05$),表明添加0.9% WBE有助于提升酸奶的持水力,这归因于发酵时脂肪以脂肪球形式存在,WBE与乳蛋白吸附于界面构建网络结构,包裹水分和油滴,形成稳定的水包油乳液体系^[21-22]。但WBE的过量添加可能会絮凝并破坏凝胶网络结构,造成水分流失。

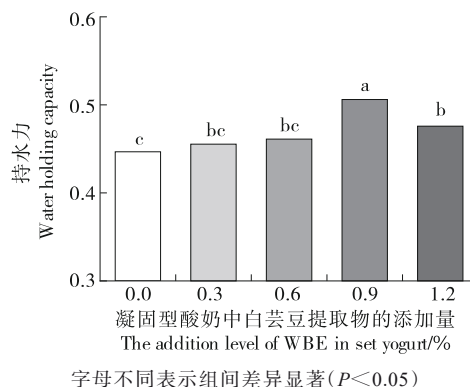


图3 白芸豆提取物对凝固型酸奶持水力的影响

Figure 3 Effect of WBE on water-holding capacity of set yogurt

2.3 对凝固型酸奶质地的影响

由表2可知,酸奶的硬度、黏稠度随WBE添加量的增加呈先上升后下降趋势,而内聚性、黏性指数则趋势相反。其中,0.9% WBE添加组样品硬度提升了9.46%,黏稠度增加了13.19%,内聚性降低了17.7%,显著优于对照组($P<0.05$)。这可能是发酵过程中,酸奶的质构受蛋白含量和双蛋白界面作用的综合影响^[23],WBE与乳蛋白形成氢键、疏水相互作用,构建紧密复合网络结构从而提高酪蛋白胶束的稳定性^[24-26]。当WBE添加量 $>1.2\%$ 时,凝胶网络结构饱和,WBE蛋白过度聚集^[27],形成不规则的团块,破坏凝胶网络均匀性,降低硬度和黏稠度。TPA结果表明,WBE添加量为0.9%的凝固型酸奶具有良好的质构特性。

2.4 对凝固型酸奶挥发性风味特征的影响

由图4可知,各处理组间,W5S传感器的响应值表现出显著差异,相较于对照组,WBE的添加显著降低了W5S响应值,即氮氧化合物风味特征减弱。氮氧化合物和硫化物常表现腥味和臭味^[28],这可能与酪蛋白和提取物中蛋白质的修饰有关,从而使具有难闻气味的化合物减弱。此外,1.2% WBE添加组样品在W1C、W3S、W2W和W1W传感器上的响应值更高,可能是WBE与乳蛋白互作并影响发酵过程,进而提高酸奶中苯类、长链烷烃、有机硫化物等具有芳香味的化合物的含量及硫化物风味的浓度,改善酸奶风味^[29]。

根据电子鼻传感器响应值构建OPLS-DA分类模型,可用以区分不同酸奶之间的气味差异^[29-30]。由图5(a)和图5(b)可知,样品 $R^2X=0.963$, $R^2Y=0.946$, $Q^2=0.853$,表明模型具有良好的解释和预测能力^[31]。模型中两个主成分累计贡献率为71.6%,可以代表样品的大部分信息特

表 2 白芸豆提取物对凝固型酸奶质构特性的影响
Table 2 Effect of WBE on texture properties of set yogurt

WBE 添加量/%	硬度/N	黏稠度/(N·s)	内聚性/N	黏性指数/(N·s)
0.0	0.16±0.002 4 ^b	1.22±0.059 ^b	-0.13±0.006 5 ^a	-0.066±0.003 3
0.3	0.17±0.005 7 ^a	1.32±0.100 ^{ab}	-0.14±0.009 8 ^{ab}	-0.067±0.009 3
0.6	0.17±0.000 9 ^a	1.34±0.045 ^{ab}	-0.15±0.003 8 ^{ab}	-0.078±0.002 9
0.9	0.17±0.003 0 ^a	1.38±0.065 ^a	-0.16±0.007 4 ^b	-0.088±0.006 7
1.2	0.16±0.002 8 ^b	1.24±0.037 ^b	-0.14±0.004 0 ^{ab}	-0.070±0.005 8

† 字母不同表示组间差异显著($P<0.05$)。

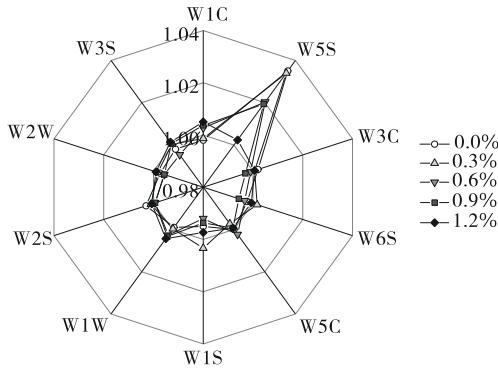


图 4 白芸豆提取物凝固型酸奶的电子鼻雷达图
Figure 4 Radar chart of electronic nose for WBE set yogurt

征。由图 5(b)和图 5(d)可知,0.0% WBE 添加组与 0.3% WBE 添加组聚集,但在 PC1 的第一象限和第四象限中分离

良好。0.6% WBE 添加组与 0.9% WBE 添加组聚集,但分别在 PC2 的正侧和负侧分离良好,可有效区分不同 WBE 添加量凝固型酸奶的风味特征。由图 5(c)可知,W6S 和 W3S 传感器对酸奶样品的区分度更为显著,表明其传感器所代表的氢化物和长链烷烃可明显区分所测酸奶风味^[32]。

2.5 对凝固型酸奶感官特性的影响

由图 6 可知,相较于对照组,适当添加 WBE 能够优化酸奶的气味、口感与质地。0.3% WBE 添加组样品的感官特性与对照组高度相似,与电子鼻分析结果一致,呈现最佳的气味、滋味、口感和总体可接受度,表明低浓度 WBE 在保持感官品质方面具有潜在优势。然而,过量添加 WBE,酸奶易出现蛋白质聚集沉淀等现象,使总体可接受度降低。

2.6 白芸豆提取物凝固型酸奶理化指标间的相关性

为了直观了解 WBE 添加量与理化指标之间的相关

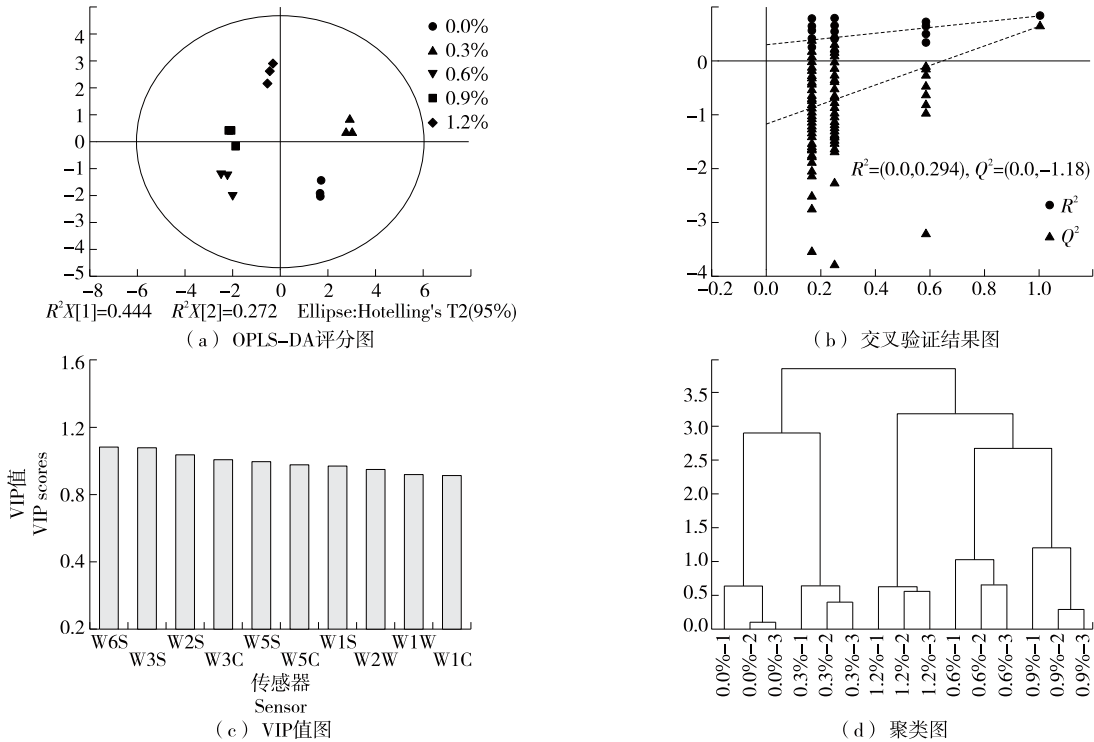


图 5 白芸豆提取物凝固型酸奶的电子鼻分析图
Figure 5 Electronic nose analysis for WBE set yogurt

性,对关键理化指标及基于 OPLS-DA 模型筛选的 VIP 值前 2 风味变量与 WBE 添加量进行相关性分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,0.3%~0.9% WBE 添加量与酸奶酸度、硬度和黏稠度呈正相关,与 Żulewska 等^[31]的研究结果相似。添加 0.9% WBE 可增加凝固型酸奶的持水力、长链烷烃挥发性风味物质含量、硬度、黏稠度、黏性及内聚性,降低氢化物挥发性风味物质含量。综上,适量添加 WBE 可能对酸奶的风味特征与质地等性质有重要影响。

3 结论

白芸豆提取物可促进凝固型酸奶发酵,其中,添加 0.9% 白芸豆提取物可使酸奶持水力显著提升 13.11%,硬度与黏稠度分别显著提高 9.46% 和 13.19%。此外,白芸豆提取物的添加会弱化氮氧化合物风味特征,强化长链

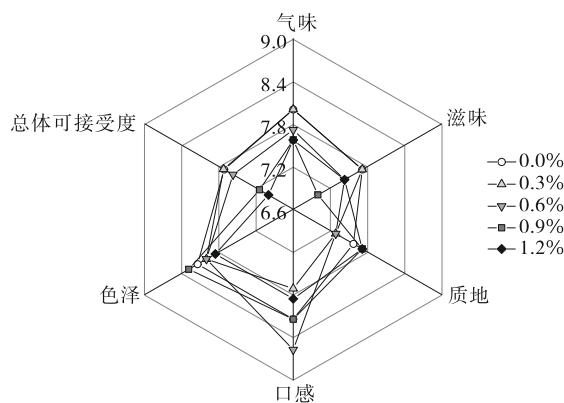


图 6 白芸豆提取物对凝固型酸奶感官特性的影响

Figure 6 Effect of WBE on sensory characteristics of set yogurt

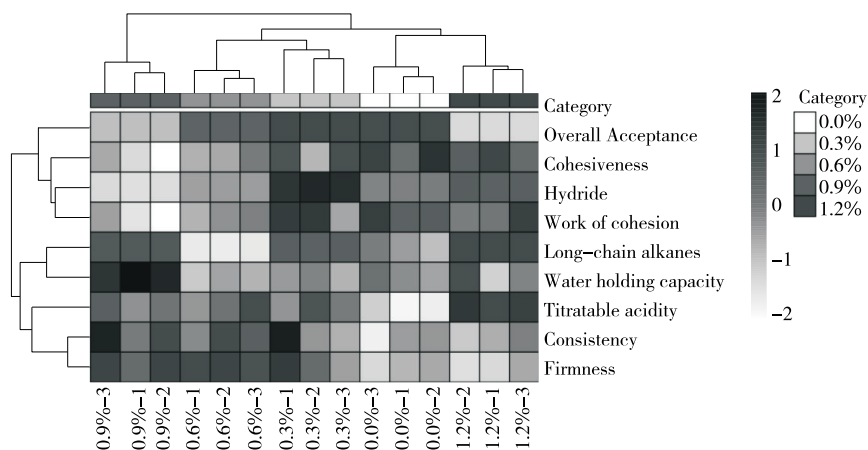


图 7 凝固型酸奶中白芸豆提取物添加量与理化指标间的分组聚类热图

Figure 7 Heat map of grouped clustering between addition of WBE and physicochemical indicators in set yogurt

烷烃芳香特征。后续可围绕白芸豆提取物酸奶对产品货架期、功能性及消化特性的影响展开深入探究,进一步优化功能性酸奶产品开发路径。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准发酵乳: GB 19302—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025: 1.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China. National standards for food safety fermented milk: GB 19302—2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025: 1.
- [2] HASEGAWA Y, BOLLING B W. Yogurt consumption for improving immune health[J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 51: 101017.
- [3] NEGM EL-DEIN A, EZZAT A, ALY H F, et al. Lactobacillus-fermented yogurt exerts hypoglycemic, hypocholesterolemic, and anti-inflammatory activities in STZ-induced diabetic Wistar rats[J]. Nutrition Research, 2022, 108: 22-32.
- [4] SHORI A B. Proteolytic activity, antioxidant, and α -amylase inhibitory activity of yogurt enriched with coriander and cumin seeds[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 133: 109912.
- [5] DHAWI F, EL-BELTAGI H S, ALY E, et al. Antioxidant, antibacterial activities and mineral content of buffalo yoghurt fortified with fenugreek and *Moringa oleifera* seed flours[J]. Foods, 2020, 9(9): 1 157.
- [6] CUI W Y, LUO K Y, XIAO Q, et al. Effect of mulberry leaf or mulberry leaf extract on glycemic traits: a systematic review and meta-analysis[J]. Food & Function, 2023, 14(3): 1 277-1 289.
- [7] ÇEBİ K, YANGİLAR F. Evaluation of α -glucosidase inhibitor activity and bioactive compounds in purple wheat flour yogurts [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135373.
- [8] DOS PEREIRA E, DE OLIVEIRA RAPHAELLI C, MASSAUT K B, et al. Probiotic yogurt supplemented with lactococcus lactis R7 and red guava extract: bioaccessibility of phenolic compounds and influence in antioxidant activity and action of α -amylase and α -glucosidase enzymes[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2024, 79(1): 219-224.
- [9] 包一枫. 低血糖生成指数全谷物发酵乳的研制[D]. 扬州: 扬州

- 大学, 2017: 2.
- BAO Y F. Development of whole grain fermented milk with a hypoglycemic index[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017: 2.
- [10] 赵晓明. 功能性椰子植物酸奶的研制及其活性评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022: 2.
- ZHAO X M. Preparation and activity evaluation of functional coconut plant-based yoghurt[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022: 2.
- [11] 杨希, 叶明. 高钙菊花枸杞酸奶的研制及其体外抗氧化降血糖功能[J]. 广西科技大学学报, 2018, 29(3): 108-114.
- YANG X, YE M. Development of high-calcium chrysanthemum wolfberry yogurt and its antioxidant hypoglycemic function *in vitro*[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2018, 29(3): 108-114.
- [12] JADHAV P B, BHOSALE H J, MAMDAPURE S V, et al. Antibacterial and anti-breast cancer activities, GC - MS profiling, molecular docking and pharmacokinetic studies of nutritious white kidney beans[J]. South African Journal of Botany, 2025, 177: 225-236.
- [13] LIU T T, GU Y, WALEED A A, et al. Challenges and opportunities in developing low glycemic index foods with white kidney bean α -amylase inhibitor[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 147: 104397.
- [14] JIANG C Y, LI S Y, SU H, et al. Kidney bean protein prevents high-fat and high-fructose diet-induced obesity, cognitive impairment, and disruption of gut microbiota composition[J]. Foods, 2024, 13(11): 1 718.
- [15] WANG S L, GUO C Y, XING Z K, et al. Dietary intervention with α -amylase inhibitor in white kidney beans added yogurt modulated gut microbiota to adjust blood glucose in mice[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 664976.
- [16] 李阳, 陈树兴. 单、双峰骆驼酸奶品质与风味的比较[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 173-179.
- LI Y, CHEN S X. A comparative study on the quality and flavor of dromedary and bifocal camel yogurt[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 173-179.
- [17] 陈夏菁, 刘红玉, 黎雁泽, 等. 鹰嘴豆营养发酵乳生产工艺及产品特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 184-188.
- CHEN X J, LIU H Y, LI Y Z, et al. Research on production process and product characteristics of nutritional fermented milk in chickpea[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 184-188.
- [18] JODŁOWSKI G S, STRZELEC E. Use of glycerol waste in lactic acid bacteria metabolism for the production of lactic acid: state of the art in Poland[J]. Open Chemistry, 2021, 19(1): 998-1 008.
- [19] 朱广成, 覃思, 聂乾忠. 梔子果提取物对酸奶发酵特性和功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 176-182.
- ZHU G C, QIN S, NIE Q Z. Effect of Gardenia fruit extract on fermentation and functional properties of yogurt[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 176-182.
- [20] 陈杨玲, 莫浩然, 焦叶, 等. 豌豆肽对凝固型酸奶品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(10): 192-196.
- CHEN Y L, MO H R, JIAO Y, et al. The effects of pea peptides on the quality of set yogurt[J]. Food & Machinery, 2023, 39(10): 192-196.
- [21] TARCHI I, KOUBAA M, OZOGUL F, et al. Influence of olive leaf extract on the physicochemical properties of yogurts made from cow, sheep, and goat milk[J]. Food Bioscience, 2025, 63: 105728.
- [22] RASHWAN A K, OSMAN A I, CHEN W. Natural nutraceuticals for enhancing yogurt properties: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2023, 21(3): 1 907-1 931.
- [23] HASHIM M A, NADTOCHII L A, MURADOVA M B, et al. Non-fat yogurt fortified with whey protein isolate: physicochemical, rheological, and microstructural properties [J]. Foods, 2021, 10(8): 1 762.
- [24] BASIRI S, HAIDARY N, SHEKARFOROUSH S S, et al. Flaxseed mucilage: a natural stabilizer in stirred yogurt[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 187: 59-65.
- [25] SAH B N P, VASILJEVIC T, MCKECHNIE S, et al. Physicochemical, textural and rheological properties of probiotic yogurt fortified with fibre-rich pineapple peel powder during refrigerated storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 978-986.
- [26] 徐若琳, 刘萍, 庞志花, 等. 乳蛋白对豆乳凝胶物性学特征的影响机理[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 18-24.
- XU R L, LIU P, PANG Z H, et al. Effect and underlying mechanism of milk protein on the physical characteristics of soymilk gel[J]. Food Science, 2022, 43(12): 18-24.
- [27] TIONG A Y J, CRAWFORD S, DE CAMPO L, et al. Legume protein gelation: the mechanism behind the formation of homogeneous and fractal gels[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 159: 110639.
- [28] ZANG J H, YU D W, LI T R, et al. Identification of characteristic flavor and microorganisms related to flavor formation in fermented common carp (*Cyprinus carpio* L.)[J]. Food Research International, 2022, 155: 111128.
- [29] PENG Q, LI S S, ZHENG H J, et al. Characterization of different grades of Jiuqu Hongmei tea based on flavor profiles using HS-SPME-GC-MS combined with E-nose and E-tongue [J]. Food Research International, 2023, 172: 113198.
- [30] 邵淑贤, 徐梦婷, 林燕萍, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术对不同产地黄观音乌龙茶香气差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 232-239.
- SHAO X S, XU M T, LIN Y P, et al. Differential analysis of aroma components of Huangguanyin oolong tea from different geographical origins using electronic nose and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2023, 44(4): 232-239.
- [31] ŻULEWSKA J, BARANOWSKA M, BIELECKA M M, et al. Effect of fortification with high-milk-protein preparations on yogurt quality[J]. Foods, 2025, 14(1): 80.
- [32] MAHIEU B, QANNARI E M, JAILLAIS B. Extension and significance testing of variable importance in projection (VIP) indices in partial least squares regression and principal components analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2023, 242: 104986.