李子晏, 陈颖, 刘瑞玲, 等. 发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽饮料功能特性与风味品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 124−137. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010273

LI Ziyan, CHEN Ying, LIU Ruiling, et al. Effect of Fermentation Time on the Functional Properties and Flavor Quality of Blueberry-Collagen Peptide Fermented Beverages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 124−137. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010273

· 研究与探讨 ·

发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽饮料功能特性与风味品质的影响

李子晏[1,2], 陈　颖[3,+], 刘瑞玲[2], 陈慧芝[2], 赵　楠[4], 缪文华[1], 房祥军[2], 吴伟杰[2], 陈杭君[2], 牛　犇[2,*], 郜海燕[2,*]

（1.浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316000;
2.浙江省农业科学院食品科学研究所, 农业农村部果品采后处理重点实验室, 全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室, 中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室, 浙江杭州 310021;
3.绍兴市群芳农业开发有限责任公司, 浙江绍兴 312000;
4.四川省农业科学院农产品加工研究所（食物与营养健康研究所）, 四川成都 610066）

摘　要: 本研究以蓝莓和鳕鱼皮胶原蛋白肽为原料，通过酵母发酵探究发酵时间（0~48 h）对蓝莓-胶原蛋白肽饮料功能特性与风味品质的影响。分析了饮料营养成分（多酚、黄酮、花色苷）、消化酶抑制活性（α-淀粉酶和脂肪酶）和自由基清除率变化。同时，利用气相色谱-离子迁移谱（gas chromatography-ion mobility spectrometry，GC-IMS）、电子舌、电子鼻及感官评价分析饮料在发酵过程中的风味变化。结果表明，蓝莓-胶原蛋白肽饮料发酵 36 h 后多酚（1.40 mg·mL^{-1}）、黄酮（1.22 mg·mL^{-1}）含量达峰值，花色苷保留量为 0.043 mg·mL^{-1}；自由基清除率皆大于 80%；α-淀粉酶和脂肪酶抑制率达 55.17% 和 43.69%。GC-IMS 分析表明，丙酸甲酯、乙酸异戊酯、己酸乙酯等酯类和异戊醇、异丁醇、正丙醇等醇类显著提高，异硫氰酸烯丙酯、二乙基三硫醚等含硫化物减少。上述分析表明，蓝莓-胶原蛋白肽饮料经 36 h 发酵后，其活性成分含量、抗氧化能力及消化酶抑制活性显著提升，同时促进了果香酯类和醇类的合成与含硫异味物质的降解。本研究通过优化发酵时间调控酵母代谢产物的定向积累，实现功能特性与风味品质的协同优化，为蓝莓高值转化及开发胶原蛋白基饮品提供了新思路。

关键词: 蓝莓, 胶原蛋白肽, 发酵, 功能特性, 挥发性风味物质

中图分类号: TS255.44　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0124−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010273　　本文网刊:

Effect of Fermentation Time on the Functional Properties and Flavor Quality of Blueberry-Collagen Peptide Fermented Beverages

LI Ziyan[1,2], CHEN Ying[3,+], LIU Ruiling[2], CHEN Huizhi[2], ZHAO Nan[4], MIAO Wenhua[1], FANG Xiangjun[2], WU Weijie[2], CHEN Hangjun[2], NIU Ben[2,*], GAO Haiyan[2,*]

（1.College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China;
2.Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Post-harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Logistics and Processing of Fresh Products, Key Laboratory of Postharvest Preservation and Processing of Fruits and Vegetables, China National Light Industry, Hangzhou 310021, China;

收稿日期: 2025−01−24　　+并列第一作者

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划（2023C04002）。

作者简介: 李子晏（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: 13924155048@163.com。
陈颖（1989−）, 女, 本科, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: xiaochen458630202@163.com。

*** 通信作者:** 牛犇（1988−）, 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: newben1989@163.com。
郜海燕（1958−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与品质调控, E-mail: spsghy@163.com。

3.Shaoxing Qunfang Agricultural Development Co., Ltd., Shaoxing 312000, China；
4.Institute of Agro-products Processing Science and Technology (Institute of Food Nutrition and Health), Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China）

Abstract: This research investigated the alterations in functional properties and flavor quality of blueberry-collagen peptide beverage under different fermentation times (0~48 h). The fermented beverage was produced through yeast fermentation using blueberry and cod skin collagen peptides. Subsequent analyses involved determining the nutrient composition (polyphenols, flavonoids, anthocyanins), digestive enzyme inhibitory activity (α-amylase and lipase), and free radical scavenging rate of the beverages. Meanwhile, gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), electronic tongue, electronic nose, and sensory evaluation were employed to assess the flavor modifications of the beverages throughout the fermentation process. The results revealed that the beverage attained peak levels of polyphenols (1.40 mg·mL^{-1}) and flavonoids (1.22 mg·mL^{-1}), with an anthocyanins retention of 0.043 mg·mL^{-1} after fermentation for 36 h. The free radical scavenging rate exceeded 80%, while the α-amylase and lipase inhibition rates were 55.17% and 43.69%, respectively. The GC-IMS analysis showed notable increases in esters such as methyl propionate, isoamyl acetate, and ethyl caproate, as well as alcohols like isoamyl alcohol, isobutanol, and n-propanol, whereas sulfide-containing compounds such as allyl isothiocyanate and diethyl trisulfide exhibited decreased levels. These results demonstrated that the blueberry-collagen peptide beverage, after 36 h of fermentation, significantly enhanced active component content, antioxidant capacity, and digestive enzyme inhibitory activity. The production of fruity esters/alcohols and the degradation of sulfur-containing off-flavor substances were promoted. By optimizing fermentation time to regulate the directional accumulation of yeast metabolites, this research achieved synergistic optimization of functional properties and flavor quality, presenting a novel approach for enhancing the value of blueberry resources and advancing the development of collagen-based beverages.

Key words: blueberry; collagen peptides; fermentation; functional properties; volatile flavor compounds

随着人们对健康日益关注，功能性饮品的研发成为食品科学的热门领域。功能性饮品不仅能满足人们对口感的追求，还能通过增强免疫力、抵抗氧化及改善身体机能等多重健康效益，推动健康生活方式的建立。蓝莓因其富含生物活性成分而备受青睐，研究指出其含有丰富的维生素、矿物质、花青素、多酚和类黄酮，具有显著的抗氧化能力，有助于预防多种慢性疾病[1]。

近年来，功能性饮品的开发聚焦于构建多组分协同增效体系，以改善单一原料生物活性的局限性。在蓝莓功能性饮品的开发中，乔慧茹等[2] 将蓝莓与铁皮石斛叶复合制备饮料，当蓝莓汁与铁皮石斛叶汁体积比为 1∶1 时，多酚含量达 1.80 mg·mL^{-1}，花色苷保留率大于 85%，羟自由基清除率较单一蓝莓体系提升 17.88%。农玉萍等[3] 开发的蓝莓-红枣-山楂复合饮料通过多酚-多糖分子相互作用形成稳定凝胶体系，使 DPPH 和 ABTS^{+}自由基清除率均高于 75%，体系稳定性提升 1.2 倍。胶原蛋白肽作为新型功能因子，具有维持皮肤弹性、促进关节健康和增强体力的功能，成为饮品功能特性强化的重要原料。鱼皮胶原蛋白肽富含甘氨酸、脯氨酸，具有良好的营养价值和高生物利用度[4]，但水产原料中氧化三甲胺分解产生的三甲胺、二甲胺，以及脂质氧化生成的醛酮类化合物具有鱼腥异味，可能影响饮品的风味品质和消费者的接受度[5]。现有研究多集中于使用物理或化学方法脱腥掩盖异味，刘欣荣等[6] 采用活性炭对胶原蛋白肽红枣复合饮料进行脱腥处理，活性炭的非特异性吸附在脱除腥味物质的同时，会不可逆地截留分子量小于 3 kDa 的功能活性肽段，导致胶原蛋白肽的血管紧张素转换酶（angiotensin-converting enzyme，ACE）抑制活性显著下降。因此，寻找改善异味并能保留功能性成分的方法显得尤为重要。

发酵技术通过微生物代谢，能有效改变饮品的营养成分和风味特征，为改善蓝莓-胶原蛋白肽饮料的风味提供了重要途径。研究表明，发酵时间对酯类等风味物质的合成及异味成分的降解具有显著调控作用，是平衡饮品果香特征与异味控制的关键因素[7]。目前，发酵蓝莓果汁饮料主要采用乳酸菌发酵，虽能提升抗氧化能力，但乳酸菌产酸的特性可能会破坏胶原蛋白肽构象。而酵母发酵可通过定向合成具有果香的酯类、醇类等物质改善风味品质，分解复杂分子提高活性物质的生物利用度[8]。Che 等[9] 在蓝莓汁中加入酵母，通过 Ehrlich 途径将亮氨酸、缬氨酸等支链氨基酸转化为乙酸异戊酯与异丁酸乙酯，显著提升酯类物质含量的同时降解具有青草味的醛类，感官评分提升 39.4%。Sui 等[10] 的研究表明酵母发酵显著提升了李子葡萄汁的抗氧化能力及酯类、酚类等挥发性风味物质的含量，并将发酵周期缩短至 72 h。然而以发酵手段解决胶原蛋白肽异味的研究较少，这限制了其工业化应用进程。

本研究以蓝莓和鳕鱼皮胶原蛋白肽为原料，探讨不同发酵时间（0~48 h）对蓝莓-胶原蛋白肽饮料功能特性与风味品质的影响。采用化学分析测定营养成分和抗氧化能力，同时运用 GC-IMS 分析挥发性化合物变化，并结合电子舌、电子鼻及感官评价，评估饮料的风味品质，以期为开发一款新型的功能性健康饮品提供科学依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

蓝莓(品种为灿烂) 采自浙江省安吉县大唐蓝莓合作社; 鳕鱼皮胶原蛋白肽(平均分子量 1 kDa, 分子量范围 0.5~1.5 kDa) 山东广财生物科技有限公司; 黄原胶、$NaCO_3$ 浙江一诺生物科技有限公司; 果酒专用酵母 RW 安琪酵母股份公司; α-淀粉酶(猪胰腺, 比活力 10 U·mg^{-1})、正构酮(2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮、2-壬酮, 均为分析纯, 组成酮类混标) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 脂肪酶(猪胰腺, 比活力 30 U·mg^{-1})、芦丁标准品(纯度≥98%)、没食子酸标准品(纯度≥98%)、矢车菊-3-葡萄糖苷标准品(纯度≥95%)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH, 纯度≥98%)、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS, 纯度≥98%) 上海源叶生物科技有限公司; 抗坏血酸标准品(纯度≥99%) Sigma-Aldrich(美国); 色谱级甲醇、乙酸乙酯(用于 GC-IMS 分析) 默克公司(德国)。

18-Y915S 破壁机 九阳股份有限公司; Read-Max 1900 酶标仪 中国上海闪谱生物科技有限公司; cTongue 电子舌 上海保圣实业发展有限公司; FOX3000 电子鼻 法国 Alpha MOS 公司; Flavour Spec®GC-IMS 德国 G.A.S.公司; MXT-WAX 色谱柱(30 m×0.53 mm, 1.0 μm) 美国安捷伦科技有限公司; CR400 色度仪 日本柯尼卡美能达公司。

1.2 实验方法

1.2.1 蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料工艺流程

1.2.1.1 胶原蛋白肽溶液配制 参考张紫涵[11] 的方法, 胶原蛋白肽在 50 ℃ 蒸馏水中 1200 r·min^{-1} 搅拌 1.5 h, 再加入黄原胶继续搅拌 0.5 h, 4 ℃ 下过夜, 使完全水合, 胶原蛋白肽的浓度为 10%(w/v), 黄原胶的浓度为 0.02%(w/v)。

1.2.1.2 蓝莓预处理 筛选大小均一、成熟度一致的新鲜蓝莓, 去除果蒂, 流水浸泡清洗后沥干。

1.2.1.3 发酵原液制备 按 1∶2(w/v)将蓝莓与胶原蛋白肽溶液混合, 破壁机 30000 r·min^{-1} 间歇破碎 5min(工作 15 s 停止 5 s, 控制温升<10 ℃), 通过添加绵白糖, 将蓝莓-胶原蛋白肽发酵原液的可溶性固形物调整到 10.7°Brix 左右。

1.2.1.4 巴氏杀菌 将发酵原液置于 85 ℃ 水浴中 10 min, 冰浴冷却至 25 ℃。

1.2.1.5 发酵 将酵母(0.001%, w/v)接种至蓝莓-胶原蛋白肽溶液中, 于 25 ℃ 下发酵 48 h, 每隔 12 h 取样。

1.2.1.6 发酵终止 取样后将样品在 12000×g 离心 10 min 去除固体沉淀物, 随后置于 85 ℃ 水浴 10 min 中进行巴氏杀菌(终止发酵反应并灭活微生物), 得到不同发酵时间的蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料[12]。

1.2.2 可溶性固形物含量、pH 和色度的测定 使用手持式折光仪确定可溶性固形物含量, 使用 pH 计测定 pH, 使用色度仪测定色度(L^*、a^*、b^*值)。

1.2.3 褐变度的测定 参考黄若涵等[13] 的方法, 取发酵后离心上清液 5 mL, 加入 0.5 mL 95% 乙醇, 涡旋振荡 30 s。将混合液在 4 ℃, 12000×g 离心 10 min, 取上清液。以 95% 乙醇为空白对照, 420 nm 波长测定吸光度, 即为褐变度(AU)。

1.2.4 透过率的测定 参考吴文龙等[14] 的方法稍作修改, 取发酵后离心上清液 10 mL, 其中 5 mL 直接测定初始透过率($T_{初始}$), 另外 5 mL 经过 0.45 μm 水系过滤膜过滤后测定透过率($T_{过滤}$)。以蒸馏水为空白对照, 660 nm 波长测定吸光度, 按式(1)计算样品透过率(%)。

$$透过率 = \frac{T_{过滤}}{T_{初始}} \times 100 \quad 式(1)$$

1.2.5 营养成分测定

1.2.5.1 可溶性蛋白含量 参考房祥军等[15] 的方法, 采用考马斯亮蓝 G250 法测定可溶性蛋白含量。

1.2.5.2 黄酮含量 参考张星等[16] 的硝酸铝显色法修改, 取 0.2 mL 发酵后离心上清液, 依次加入 0.8 mL 800 mg·mL^{-1} 甲醇、0.5 mL 50 mg·mL^{-1} 亚硝酸钠(静置 6 min), 4 mL 40 mg·mL^{-1} 硝酸铝(静置 6 min), 4 mL 40 mg·mL^{-1} NaOH, 定容至 10 mL, 避光反应 15 min。以蒸馏水为空白对照组, 510 nm 波长测定吸光度。以芦丁标准品制作标准曲线, 按式(2)计算黄酮含量(mg·mL^{-1})。

$$C_{黄酮} = \frac{(A_{样品} - A_{空白}) - b}{k} \times DF \quad 式(2)$$

式中: k 为标准曲线斜率, b 为标准曲线的截距, DF 为稀释倍数。

1.2.5.3 多酚含量 参考 Patel 等[17] 的 Folin-Ciocalteu 法修改, 取 0.4 mL 发酵后离心上清液, 加入 2 mL Folin 试剂(反应 5 min), 1.8 mL 75 g·L^{-1} Na_2CO_3(避光反应 1 h)。以蒸馏水为空白对照组, 765 nm 波长测定吸光度。以没食子酸标品制作标准曲线, 按式(3)计算多酚含量(mg·mL^{-1})。

$$C_{多酚} = \frac{(A_{样品} - A_{空白}) - b}{k} \times DF \quad 式(3)$$

式中: k 为标准曲线斜率, b 为标准曲线的截距, DF 为稀释倍数。

1.2.5.4 花色苷含量 参考 Chu 等[18] 的 pH 示差法修改, 分别用 KCl-HCl(pH1.0)和 CH_3COONa-HCl(pH4.5)缓冲液稀释发酵后离心上清液 10 倍, 避光平衡 1 h。于 520 nm 和 700 nm 波长测定吸光度, 按式(4)计算花色苷含量(mg·mL^{-1})。

$$C_{花色苷}=\frac{(A_{520}-A_{700})_{pH1.0}-(A_{520}-A_{700})_{pH4.5}}{\varepsilon\times L}\times Mw\times DF$$　　式（4）

式中：ε=26900 L·cm·mol^{-1}（矢车菊-3-葡萄糖苷消光系数），Mw=449.2 g·mol^{-1}，L 为光程，DF 为稀释倍数。

1.2.5.5　抗坏血酸含量　参考 Sindhu 等[19] 的 TCA-磷酸-$FeCl_3$ 显色法修改，以抗坏血酸标品建立标准曲线，取 1 mL 稀释样液，依次加入 1 mL 50 g·L^{-1} TCA、1 mL 无水乙醇、0.5 mL 0.4% 磷酸-乙醇液、1 mL 5 g·L^{-1} BP-乙醇液、0.5 mL 0.3 g·L^{-1} $FeCl_3$-乙醇液，混匀后室温避光反应 15 min。543 nm 处测定吸光度，按式(5)计算抗坏血酸含量(μg·mL^{-1})。

$$C_{抗坏血酸}=\frac{m'}{V}\times N$$　　式（5）

式中：m'为由标准曲线计算得的抗坏血酸的质量(μg)，V 为测定体积(mL)，N 为稀释倍数。

1.2.6　抗氧化能力测定

1.2.6.1　DPPH 自由基清除率　参考黄婕等[20] 的方法调整，200 μL 样品稀释至 2 mL，加入 4 mL 0.1 mmol·L^{-1} DPPH-甲醇溶液及 450 μL Tris-HCl 缓冲液（pH7.4），5 ℃ 水浴避光反应 30 min。517 nm 测定吸光度，按式(6)计算 DPPH 自由基清除率(%)。

$$DPPH自由基清除率=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100$$　　式（6）

式中：A_0 为空白吸光度，A_1 为样品吸光度，A_2 为样品本底吸光度。

1.2.6.2　$ABTS^+$自由基清除率　参考 Fatima 等[21] 的方法调整，7 mmol·L^{-1} ABTS 与 2.45 mmol·L^{-1} 过硫酸钾混合，避光静置 12 h 生成 $ABTS^+$·储备液；100 μL 稀释样品与 3.9 mL $ABTS^+$·工作液混合，避光反应 10 min。734 nm 测定吸光度，按式(7)计算 $ABTS^+$自由基清除率(%)。

$$ABTS^+自由基清除率=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100$$　　式（7）

式中：A_0 为空白吸光度，A_1 为样品吸光度，A_2 为样品本底吸光度。

1.2.7　消化酶抑制活性测定

1.2.7.1　α-淀粉酶抑制率　参考岑敏连等[22] 的方法稍作修改，50 μL 发酵后离心上清液与 50 μL α-淀粉酶(50 μg·mL^{-1})及 PBS 混合，37 ℃ 孵育 10 min；加入 100 μL 1% 可溶性淀粉，37 ℃ 反应 10 min。加入 100 μL DNS 试剂，沸水浴 10 min 后终止显色。于 540 nm 测定吸光度，按式(8)计算 α-淀粉酶抑制率(%)。

$$I=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_3-A_4}\right)\times 100$$　　式（8）

式中：I 为抑制率(%)，A_1 为样品+酶吸光度，A_2 为样品+PBS 的吸光度，A_3 为酶+PBS 的吸光度，A_4 为 PBS 吸光度。

1.2.7.2　脂肪酶抑制率　参考 Li 等[23] 的方法稍作修改，30 μL Tris-HCl 缓冲液（pH8.0）与 30 μL 脂肪酶液(5 mg·mL^{-1})37 ℃ 预孵育 15 min，加入 15 μL 对硝基苯酚（PNP）及 15 μL 发酵后离心上清液。150 μL 0.5 mol·L^{-1} 三氯乙酸终止，50 μL mol·L^{-1} NaOH 调 pH；405 nm 测定 PNP 生成量，按式(9)计算酶活力(U·mL^{-1})；脂肪酶抑制率(%)按式(10)计算。

$$X=\frac{c\times V}{t\times V'}$$　　式（9）

式中：X 为脂肪酶活力(U·mL^{-1})，c-PNP 浓度(mmol·L^{-1})，V 为反应体系总体积(mL)，t 为反应时间(min)，V'为酶用量(mL)。

$$I=\left(1-\frac{X'}{X}\right)\times 100$$　　式（10）

式中：I 为脂肪酶抑制率(%)，X 为空白酶活力(U·mL^{-1})，X'为加样后酶活力(U·mL^{-1})。

1.2.8　电子舌与电子鼻风味分析　参考任婧楠等[24] 的方法稍作修改，不同发酵时间的样品稀释 5 倍后取 15 mL 装入电子舌专用杯内，进行数据采集分析。取不同发酵时间的样品 10 mL 置于电子鼻顶空瓶中，样品预检 5 s，测试时间 3 min，温度 50 ℃，进行数据采集分析。

1.2.9　感官评价　参考李维妮等[25] 的实验方法稍作修改，结合鳕鱼皮胶原蛋白肽在加工过程中可能因脂质氧化及短肽释放产生的特征性鱼腥气味和蛋白异味，设定感官评价得分表（表 1）作为蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料的风味品质评价标准，选定 16 位具有食品相关背景的人员进行品尝打分，采用 9 分制标度法（0~9 分），各指标按感官强度分级描述，其中“鱼腥气味”与“鱼腥异味”指标用于评估胶原蛋白肽异味的残留强度。

1.2.10　挥发性化合物的 GC-IMS 检测　参考 Li 等[26] 的方法稍作修改，取发酵后离心上清液 1 mL 于 20 mL 顶空瓶中，顶空进样条件为：在温度 60 ℃，500 r·min^{-1} 孵育 20 min，进样针温度为 85 ℃，进样量为 500 μL。GC 条件为：色谱柱（30 m×0.53 mm，1.0 μm）温度 60 ℃，载气为高纯氮（纯度≥99.999%），流量程序设置为初始 2 mL·min^{-1} 保持 2 min，随后 8 min 内线性升至 10 mL·min^{-1}，20 min 内进一步升至 100 mL·min^{-1} 保持 10 min，总运行时间 30 min。IMS 条件为：氚源电离（3H），迁移管长度 53 mm，温度 45 ℃，电压 2700 V，漂移气体为高纯氮，漂移气流量为 75 mL·min^{-1}。

基于上述优化分离条件，对样品挥发性化合物进行定性与相对定量分析。定性分析：使用 6 种浓度为 0.1~10 μg·mL^{-1} 的酮类混标建立保留时间与保留指数的线性关系（R^2≥0.99），按式(11)计算目标物

表 1 蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料感官评价得分标准

Table 1 Sensory evaluation score criteria for blueberry-collagen peptide fermented beverage

项目	指标	说明(0~9分)
气味	果香气	0~2分: 无蓝莓香气或异味明显; 3~5分: 香气微弱且带有轻微发酵酸味; 6~8分: 果香清晰但欠饱满; 9分: 新鲜蓝莓香气浓郁, 无异味
	发酵香	0~2分: 无发酵香或杂醇味突出; 3~5分: 轻微酒精味; 6~8分: 醇香柔和但层次单一; 9分: 醇香纯正, 带酵母酯香
	鱼腥气味	0~2分: 果香主导, 无腥味残留; 3~5分: 极微弱腥味; 6~8分: 明显腥味但无腐败; 9分: 强烈鱼腥味
滋味	果鲜味	0~2分: 果味寡淡或腐败味; 3~5分: 果味较淡, 酸味失衡; 6~8分: 酸甜适中, 果味清晰; 9分: 鲜果感强烈, 层次丰富
	酸味	0~2分: 酸爽适口, 与甜味平衡; 3~5分: 柔和酸味; 6~8分: 酸度较高但可接受; 9分: 尖酸或刺激感
	甜味	0~2分: 无甜味或甜腻; 3~5分: 甜感微弱或后甜不足; 6~8分: 自然清甜; 9分: 甜味饱满且无粘喉感
	涩味	0~2分: 无不良涩味; 3~5分: 微涩增加层次感; 6~8分: 轻微涩味; 9分: 强烈收敛感
	鱼腥异味	0~2分: 口感圆润, 无腥味干扰; 3~5分: 轻微腥味(短暂残留); 6~8分: 腥味明显但可接受; 9分: 腥味突出, 有强烈金属或血腥味
	后味	0~2分: 苦味或金属味残留; 3~5分: 后味单薄; 6~8分: 回甘明显; 9分: 余味清爽持久
外观	澄清度	0~2分: 浑浊或含可见悬浮颗粒; 3~5分: 轻微浑浊; 6~8分: 基本透明, 偶见极微量悬浮物; 9分: 高度澄清, 质地均匀, 无可见浑浊或悬浮物
	色泽	0~2分: 明显褐变或褪色, 颜色不均; 3~5分: 色泽暗淡, 紫红色不鲜明; 6~8分: 均匀紫红色, 但欠鲜艳; 9分: 深紫红色透亮, 无杂色, 光泽感强
整体接受性		0~2分: 无法接受。 存在多项严重缺陷(如腥味突出、酸涩失衡、色泽浑浊), 饮用后产生明显不适感; 3~5分: 勉强接受但不愿重复饮用。 主要风味(如果香、甜味)不突出, 或存在单一负面特征(如腥味残留、后味苦涩); 6~8分: 整体协调但仍有改进空间。 果香与发酵香融合自然, 无明显异味, 但层次感不足(如酸味略高、回甘短暂); 9分: 高度愉悦。 果香、发酵香与甜酸感平衡协调, 风味饱满且无异味残留, 余味清爽持久, 具有强烈饮用欲望

的保留指数(RI), 与 NIST 2020 数据库中的 RI 值对比(匹配度≥85%), 通过 IMS 迁移时间数据库对比, 偏差≤0.5% 的化合物为目标物。

$$RI = 100n + 100 \times \frac{t'_r(x) - t'_r(n)}{t'_r(n+1) - t'_r(n)} \quad 式(11)$$

式中: RI 为保留指数, n 为烷烃的碳原子数, $t'_r(n)$为碳数为 n 的烷烃保留时间, $t'_r(n+1)$为碳数为 n+1 的烷烃保留时间, $t'_r(x)$为目标物的保留时间(min), 并且 $t'_r(n+1)>t'_r(x)>t'_r(n)$。

相对定量分析: 采用峰面积归一化法, 按式(12)计算。通过计算各目标物峰面积占总峰面积的比例表征其相对含量, 平行样间相对标准偏差(RSD)<5%。

$$相对含量(\%) = \frac{目标物峰面积}{\sum 所有目标物峰面积} \times 100 \quad 式(12)$$

风味描述检索: 挥发性化合物的风味特征通过比对 NIST 2020 数据库及权威风味数据库(LRI & Odour Database、Flavornet、FEMA Flavor Library、The Good Scents Company)中的描述信息进行标注[27]。

1.3 数据处理

所有实验平行重复 3 次, 实验结果采用平均值±标准差表示, 采用 GraphPad Prism 9.0 软件进行数据统计分析, 并用单因素方差分析检验法进行显著性分析, $P<0.05$ 具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽饮料色度、褐变度、透过率、pH 和可溶性固形物含量的影响

图 1 直观展示了不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽饮料的色泽的外观变化, 初始阶段样品呈暗紫红色, 随处理时间延长逐渐转为深宝石红色, 且呈现清亮质感。但发酵至 48 h 样品转变为紫褐色, 透亮感下降。



图 1 不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽饮料外观变化

Fig.1 Visual changes in blueberry-collagen peptide fermented beverages at different fermentation times

由表 2 可见, 随着发酵时间延长, 蓝莓-胶原蛋白肽饮料的 L^*值和 a^*值增大, 而 b^*值先增后减。褐变度持续增加, 表明美拉德反应与非酶促氧化褐变持续

表 2　不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽饮料色度、褐变度、透过率、pH 和可溶性固形物含量变化

Table 2　Changes in color parameters, browning degree, transmittance, pH, and soluble solids content of blueberry-collagen peptide beverages at different fermentation times

发酵时间(h)	L^*	a^*	b^*	褐变度(AU)	透过率(%)	pH	可溶性固形物含量(°Brix)
0	2.97±0.03^{e}	1.45±0.09^{e}	−2.75±0.06^{d}	0.17±0.01^{e}	35.92±0.23^{e}	3.45±0.03^{a}	10.77±0.06^{a}
12	7.00±0.02^{d}	1.66±0.02^{d}	−1.86±0.08^{b}	0.25±0.01^{d}	58.30±0.34^{d}	3.45±0.02^{a}	8.50±0.17^{b}
24	8.57±0.36^{c}	1.97±0.05^{c}	−1.78±0.09^{b}	0.40±0.00^{c}	73.33±0.42^{c}	3.41±0.01^{a}	8.37±0.06^{b}
36	9.13±0.09^{b}	2.33±0.02^{b}	−1.61±0.16^{a}	0.49±0.01^{b}	87.06±0.08^{a}	3.35±0.01^{b}	7.87±0.06^{c}
48	9.49±0.02^{a}	2.94±0.04^{a}	−2.51±0.02^{c}	0.68±0.00^{a}	77.99±0.42^{b}	3.34±0.02^{b}	7.63±0.06^{d}

注：表中同列数据后不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

累积。透过率持续增加并在 36 h 时达到峰值，48 h 有所降低，这一变化与酵母代谢降解胶体颗粒及自溶释放胞内多糖有关。浑浊度可通过色度参数 L^*值间接评估，L^*值升高表明浑浊度降低，主要由于发酵过程中胶体颗粒的沉淀作用，以及酵母自溶后释放的 β-葡聚糖酶对悬浮多糖的降解作用，这与石榴酒澄清机制一致[28]。发酵前 24 h 的 pH 变化小，36 h 后略降。a^*值的升高与 pH 降低诱导的花青素显色效应密切相关，酸性环境促使花青素质子转化为黄烊盐阳离子，显著增强红色调[29]。多酚与黄酮通过 β-葡萄糖苷酶介导的苷元释放及多酚氧化产物协同提升 b^*值，与黄晓杰等[30]在蓝莓酒发酵中发现酵母驱动黄酮苷元释放增强了黄色调的研究一致。发酵 48 h 后褐变程度加剧与多酚氧化物增强了蓝黑色调使 b^*值降低，与李思媛等[31]在蓝莓花色苷饮料发酵 48 h 后观察到的色泽劣变规律一致。酿酒酵母将糖转化为酒精和二氧化碳，导致饮料可溶性固形物含量下降，说明其提高了样品糖的利用率。

2.2　发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽饮料营养和生物活性成分的影响

2.2.1　可溶性蛋白、黄酮、多酚、花色苷含量分析

图 2A 可知，蓝莓-胶原蛋白肽饮料中的可溶性蛋白含量在发酵阶段缓慢下降，这可能与胶原蛋白肽与蓝莓汁中蛋白质的相互作用、酶活性变化以及微生物营养供给有关[32]。此外，酵母可利用可溶性蛋白将其水解为多肽和氨基酸，丰富饮料风味[33]。图 2B 显示不同发酵时间中黄酮含量先升后降，表明酵母发酵产生的酒精有助于类黄酮的溶解。Ovalle 等[34]的葡萄酒研究中也发现 β-葡萄糖苷酶解黄酮苷元的趋势，但本研究中黄酮峰值延迟至 36 h，可能与蓝莓果胶（来源于带皮发酵的蓝莓果肉细胞壁，未使用果胶酶预处理）通过未降解的果胶-纤维素网络包裹黄酮苷元，限制酶-底物接触有关。图 2C 展示了多酚含量变化，发酵 36 h 后显著增加（P<0.05）达到 1.40±0.02 mg·mL^{-1}，这可能是由于酵母发酵产醇促进多酚

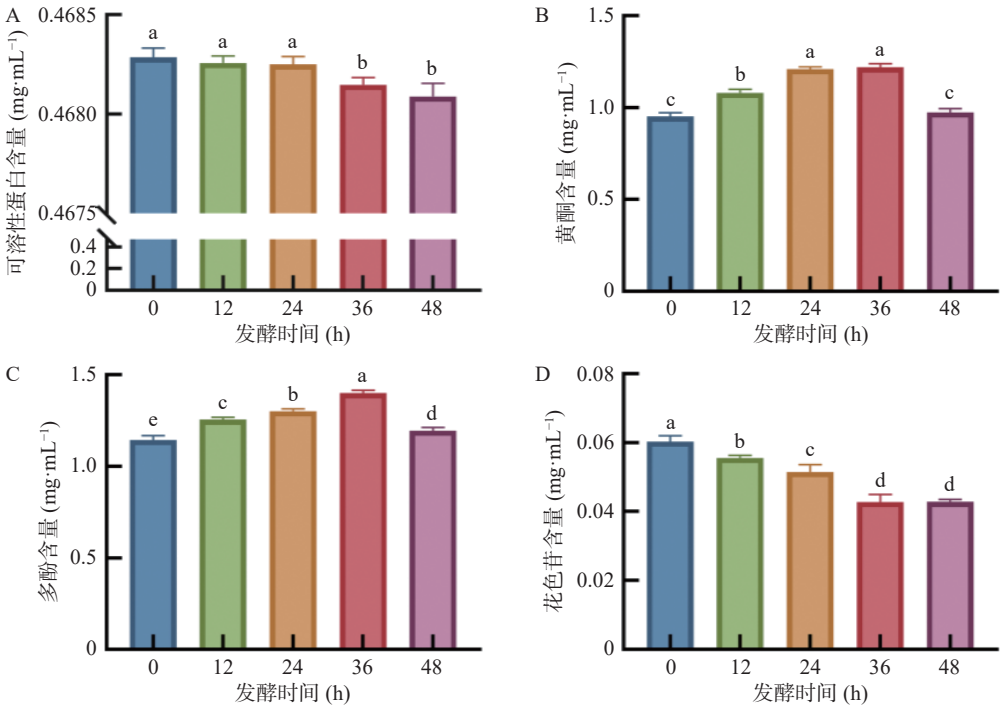


图 2　发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料可溶性蛋白（A）、黄酮（B）、多酚（C）和花色苷含量（D）的影响

Fig.2　Effect of fermentation time on soluble protein (A), flavonoids (B), polyphenols (C), and anthocyanins (D) content in blueberry-collagen peptide fermented beverages

注：图中不同字母表示差异显著（P<0.05）；图 3~图 4 同。

溶解，同时有机酸提高了细胞膜通透性，加速酚类物质释放。发酵 48 h 后，黄酮和多酚含量降低，可能是乙醛、丙酮等代谢产物与黄酮、酚类物质发生反应，导致类黄酮转化为其他代谢物[35]。图 2D 显示，发酵过程中花色苷含量持续下降，这一现象可能与酵母代谢产生的有机酸（如乙酸、乳酸）和胞外酶（如 β-葡萄糖苷酶）以及乙醇相关产物有关。有机酸引起 pH 下降（表 2）破坏花色苷的酸碱稳定性，而 β-葡萄糖苷酶通过水解花色苷的糖苷键直接降解其结构。此外，乙醇代谢过程中生成的活性物质可能与花色苷发生氧化或缩合反应，进一步降低其稳定性[36]。

2.2.2　抗坏血酸含量、DPPH 自由基与 $ABTS^+$自由基清除率分析　图 3A 显示，发酵过程中样品抗坏血酸含量下降，可能与蓝莓汁的氧化性及酵母代谢利用有关。如图 3B、C 所示，发酵过程中与新鲜样品相比，发酵样品的 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率先升后趋平，在 48 h 达到最高，DPPH 自由基清除率为 86.54%，比新鲜样品提高约 26.65%；$ABTS^+$自由基清除率为 83.59%，提高约 28.31%，说明酵母发酵显著提高了样品的抗氧化活性（P<0.05）。研究表明，抗氧化能力与多酚类及黄酮类物质变化有关[37]。酵母代谢产生的没食子酸等小分子酚酸可通过氢原子转移机制直接向 DPPH 自由基提供氢原子，实现高效清除；同时，酵母分泌的 β-葡萄糖苷酶催化大分子多酚水解为小分子酚类。这一机制与范昊安等[38] 在苹果梨发酵饮料研究中的发现一致，经发酵后的饮料多酚含量显著提升，DPPH 自由基清除率达 90.91%，研究进一步证明邻苯二酚羟基基团的暴露是活性提升的关键。此外，酵母发酵产生的乙醇作为极性溶剂可促进疏水性酚类的溶出，并通过降低体系极性增强酚类与 $ABTS^+$自由基的电子转移效率，从而进一步提升抗氧化活性[39]。

2.2.3　α-淀粉酶与脂肪酶抑制率分析　α-淀粉酶是重要的水解酶，负责碳水化合物的代谢影响血糖水平。图 4A 显示，不同发酵时间的蓝莓-胶原蛋白肽饮料对 α-淀粉酶的抑制效果明显提升，发酵时间越长，抑制率逐渐上升，48 h 达到 59.23%，相比未发酵样品显著提高约 102.63%（P<0.05）。这一效果可能

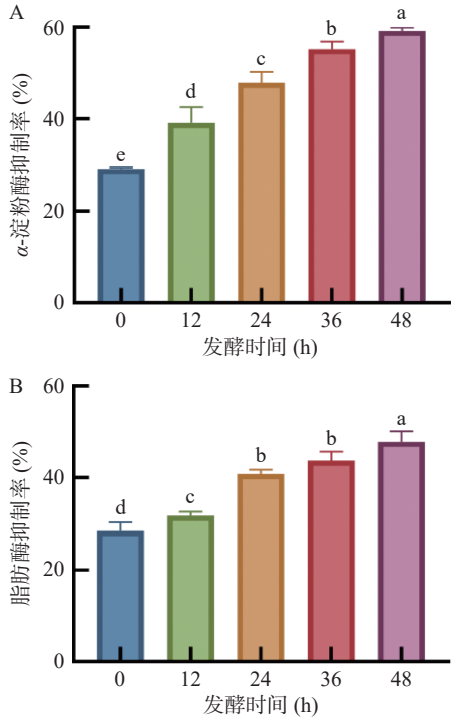


图 4　发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料 α-淀粉酶抑制率（A）和脂肪酶抑制率（B）的影响

Fig.4　Effect of fermentation time on α-amylase inhibitory activity (A) and lipase inhibitory activity (B) in blueberry-collagen peptide fermented beverages

源于样品中的酚类化合物通过羟基结构抑制 α-淀粉酶，且高浓度多酚降低了酶对糊化淀粉的可接近表面积，增加了空间位阻，有助于增强抑制效果[40]。此外，发酵样品中丰富的游离多酚也可能进一步提高抑制率[41]。

脂肪酶在甘油三酯水解中发挥核心作用，因此抑制其与预防肥胖及代谢疾病密切相关系[42]。如图 4B 所示，发酵样品对脂肪酶的抑制效果显著增强（P<0.05），且随着发酵时间延长抑制率逐步提升，48 h 达到 47.82%，相较于未发酵样品提升约 68.13%。与 Shi 等[43] 使用植物乳杆菌发酵的西瓜汁脂肪酶抑制活性从 53.94% 增至 83.36% 的趋势一致。这可能是由于发酵过程中多酚、类黄酮和花色苷含量增加，进而提升了对脂肪酶的抑制活性。

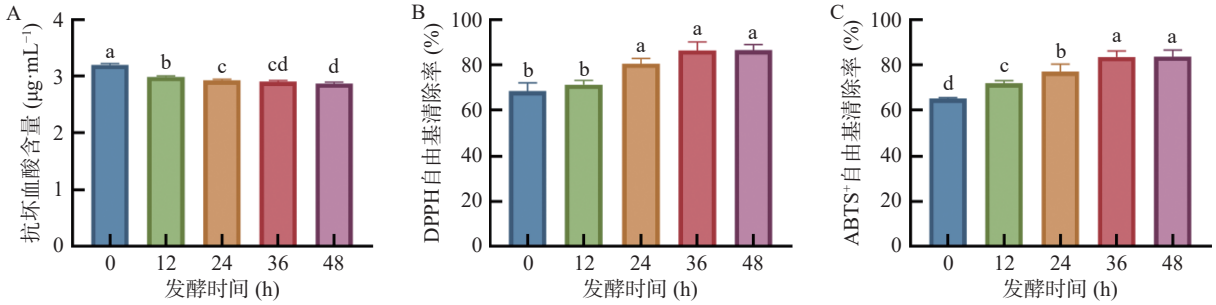


图 3　发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料抗坏血酸含量（A）、DPPH 自由基清除率（B）、$ABTS^+$自由基清除率（C）的影响

Fig.3　Effect of fermentation time on ascorbic acid content (A), DPPH radical scavenging activity (B), and $ABTS^+$ radical scavenging activity (C) in blueberry-collagen peptide fermented beverages

2.3　发酵时间对蓝莓-胶原蛋白肽饮料风味品质的影响

2.3.1　电子舌、电子鼻及感官评价分析　使用电子舌和主成分分析（principal component analysis，PCA）不同发酵时间的蓝莓-胶原蛋白肽饮料的风味差异（图 5A）。结果显示，主成分 1（PC1）和主成分 2（PC1）的贡献率分别为 65.70% 和 19.33%，累计为 85.03%，能够反映数据的整体特征。五个样品分布在不同区域，无重叠，重复性良好，未发酵与发酵样品间距离较远，表明发酵显著影响饮料风味。发酵 48 h 样品与其他样品差异更大，说明较长发酵时间引起明显变化。

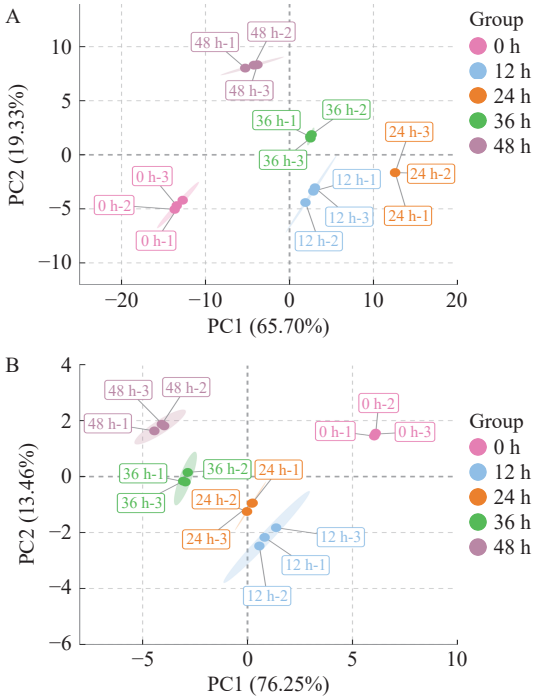


图 5　不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料电子舌（A）和电子鼻主成分分析（B）

Fig.5　Principal component analysis (PCA) of E-tongue (A) and E-nose (B) in blueberry-collagen peptide fermented beverages at different fermentation times

使用电子鼻和 PCA 分析不同发酵时间的蓝莓-胶原蛋白肽饮料的香气差异（图 5B）。PC1 与 PC2 的贡献率分别为 76.25% 和 13.46%，累计方差贡献率为 89.71%，能够反映数据的整体特征。样品间无重叠，未发酵样品与发酵样品香气差异显著，表明发酵能够大幅改变气味特征。

感官评价小组对样品的香气、口味和外观进行了评分（表 3）。结果显示，酵母发酵显著改善了蓝莓-胶原蛋白肽饮料的风味及外观品质，36 h 样品的整体接受性评分最高。在气味方面，果香气评分随发酵时间延长逐渐上升，36 h 达到最高，较初始值提升 39.4%；但继续发酵至 48 h 后，由于乙醇积累抑制酯酶活性，酯类合成减少，使果香气减少[44]，果香气评分显著降低（P<0.05）。鱼腥气味在发酵前 36 h 内持续降低，这是由于酵母代谢对三甲胺的竞争性降解[45]；

表 3　不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽饮料感官评价结果

Table 3　Sensory evaluation of blueberry-collagen peptides fermented beverages under different fermentation times

感官指标	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h
果香气	6.19±0.40^{d}	7.19±0.40^{bc}	7.50±0.63^{b}	8.63±0.50^{a}	6.94±0.44^{c}
发酵香	3.38±0.50^{d}	5.63±0.50^{c}	6.81±0.83^{b}	8.94±0.25^{a}	6.56±0.51^{b}
鱼腥气味	6.81±0.54^{a}	5.50±0.52^{b}	3.69±0.48^{d}	1.38±0.50^{e}	4.38±0.50^{c}
果鲜味	5.81±0.54^{d}	7.06±0.57^{c}	7.63±0.62^{b}	8.63±0.50^{a}	5.63±0.62^{d}
酸味	3.88±0.50^{d}	6.81±0.54^{b}	6.44±0.51^{c}	7.75±0.45^{a}	4.13±0.62^{d}
甜味	7.06±0.44^{b}	7.31±0.60^{ab}	7.50±0.52^{a}	7.69±0.48^{a}	5.56±0.51^{c}
涩味	2.44±0.63^{e}	5.06±0.68^{c}	6.31±0.60^{b}	3.75±0.45^{d}	7.50±0.73^{a}
鱼腥异味	6.63±0.50^{a}	5.31±0.60^{b}	3.00±0.52^{d}	2.19±0.40^{e}	4.13±0.62^{c}
后味	2.69±0.48^{e}	6.38±0.50^{c}	7.81±0.40^{b}	8.88±0.34^{a}	5.38±0.50^{d}
澄清度	3.88±0.62^{d}	6.00±0.82^{c}	7.38±0.50^{b}	7.69±0.60^{ab}	7.94±0.57^{a}
色泽	2.88±0.62^{e}	5.94±0.68^{d}	7.56±0.81^{b}	8.19±0.54^{a}	6.56±0.63^{c}
整体接受性	3.50±0.63^{e}	5.44±0.51^{d}	6.94±0.57^{b}	8.19±0.54^{a}	6.44±0.51^{c}

注：表中同行数据后不同小写字母表示差异显著（P<0.05），表4同。

而发酵 48 h 后，因蛋白质过度水解产生疏水性短肽与含硫化合物释放[46]，鱼腥气味评分回升至 4.38±0.50。在滋味方面，果鲜味和甜味在 36 h 评分最佳，这与酵母代谢产生的酯类物质积累密切相关[47]。酸味评分在 36 h 显著提高至 7.75±0.45（P<0.05），表明此时酸味强度明显增强，可能是酵母代谢过程中积累乙酸等有机酸所致。而发酵 48 h 后评分回落至 4.13±0.62，酸味强度有所减弱，可能与酵母进一步代谢或酸类转化有关。涩味评分在 36 h 时最低，可能是源于酵母分泌的还原性物质抑制了多酚氧化[48]；而发酵至 48 h 后，酵母自溶释放的金属离子催化多酚氧化，涩味评分显著提升至 7.50±0.73（P<0.05）。进一步分析表明，酵母发酵能有效降鱼腥异味，付湘晋等[49] 的研究表明，酵母细胞内的醇脱氢酶和醛脱氢酶可将具有腥味的醛类物质转化为无嗅醇类及羧酸。发酵 48 h 后鱼腥异味回升与杨心怡等[46] 的研究一致，过度发酵使疏水肽段聚集提高了异味强度。在外观方面，澄清度随发酵时间延长持续改善，而色泽评分在 36 h 时最优，随后因美拉德反应加剧导致褐变，48 h 评分降至 6.56±0.63。

2.3.2　挥发性成分的 GC-IMS 分析

2.3.2.1　基于 GC-IMS 的挥发性成分动态特征分析

利用 GC-IMS 对不同发酵时间的蓝莓-胶原蛋白肽饮料挥发性物质的动态分布进行分析。二维俯视图中（图 6A），横坐标为气相保留时间，纵坐标为离子迁移时间，每个点代表一种挥发性风味物质，信号点颜色深浅表示化合物浓度。未发酵样品的信号点集中于保留时间 200~400 s 及迁移时间 1.0~1.5 ms 的区域，对应短链小分子与极性化合物。随着发酵时间的延长，信号点向保留时间 400~700 s 及漂移时间 1.5~1.75 ms 区域扩散，表明酵母代谢合成的长链与非极性化合物逐渐富集。

为了更清晰地反映不同发酵时间样品间的挥发性成分差异，以未发酵的样品为基准，发酵样品扣除

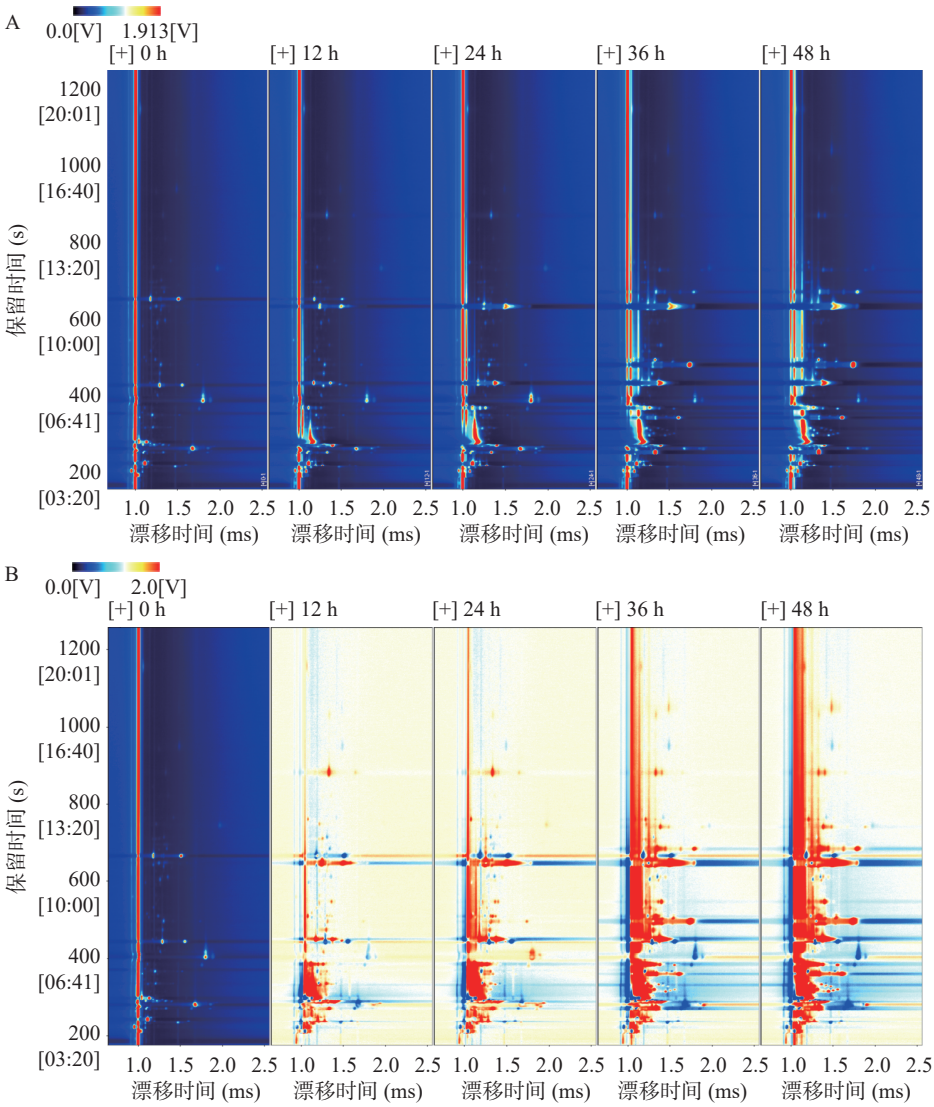


图 6　不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料挥发性化合物二维俯视图(A)、差异对比图(B)

Fig.6　Two-dimensional distribution maps of volatile flavor compounds (A) and differential compound heatmap (B) in blueberry-collagen peptide fermented beverages at different fermentation times

基准后得到差异化图谱(图 6B)。红色斑点表示发酵样品中挥发性成分变化浓度高于基准,蓝色斑点表示浓度低于基准,颜色深度与差异幅度成正相关[50]。保留时间 300~700 s,迁移时间 1.5~1.75 ms 区域的信号强度随发酵时间逐渐增强,表明酯类和醇类含量显著增加,这与 Wang 等[51] 揭示的酿酒酵母 *ATF1* 基因调控酯合成途径有关。严红光等[52] 对发酵蓝莓酒研究表明,酵母通过葡萄糖代谢和氨基酸分解途径合成酯类,显著提升果香特征,这一趋势与差异化图谱中红色斑点的分布规律一致。而蓝色斑点反映醛类和萜烯类的氧化降解及离心吸附损失,其中醛类保留率低于龚诗媚等[53] 在荔枝超滤模型中的结果,这可能与样品中多酚-胶原蛋白肽形成的强疏水性复合物会增强吸附作用有关。随发酵时间延长 pH 持续降低,进一步加速醛类氧化,而杀菌后的离心步骤会使疏水成分沉淀,这些因素共同导致保留率降低。

2.3.2.2　关键风味化合物的鉴定与指纹图谱构建

为比较不同发酵时间样品的挥发性物质种类和含量变化,建立了挥发性物质指纹图谱(图 7)。每行代表一个样品(不同发酵时间平行测定 3 次),每列的编号对应一种挥发性化合物,具体名称见表 4。蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料中鉴定出 47 种挥发性化合物,包括 13 种酯类、5 种醛类、6 种醇类、4 种烯烃类、6 种酮类、2 种含硫化物、3 种酸类、1 种吡嗪类、3 种呋喃类,以及 4 种其他类无风味的挥发性成分。指纹图谱直观展示了发酵与未发酵样品间的风味物质差异。酯类是蓝莓汁香气的关键成分,乙酸异戊酯为重要代谢产物,有明显的香蕉香气[54]。随着发酵,乙酸异丁酯、丙酸乙酯、丁酸乙酯和乳酸乙酯的信号增强,这可能与微生物酯酶的作用有关。在所有发酵样品中,醇类(如异戊醇、异丁醇、正丙醇)含量较高,主要源自胶原蛋白肽的氧化,为样品增添了花果香和芽可可的醇厚[55]。未发酵样品中,具有果香的醛类含量较高,随发酵时间延长,醛类的含量显著降低($P<0.05$),可能由于酵母的氧化或还原反应生成酸或醇[56]。但发酵后具有坚果味、焦糖香吡咯-2-甲醛显

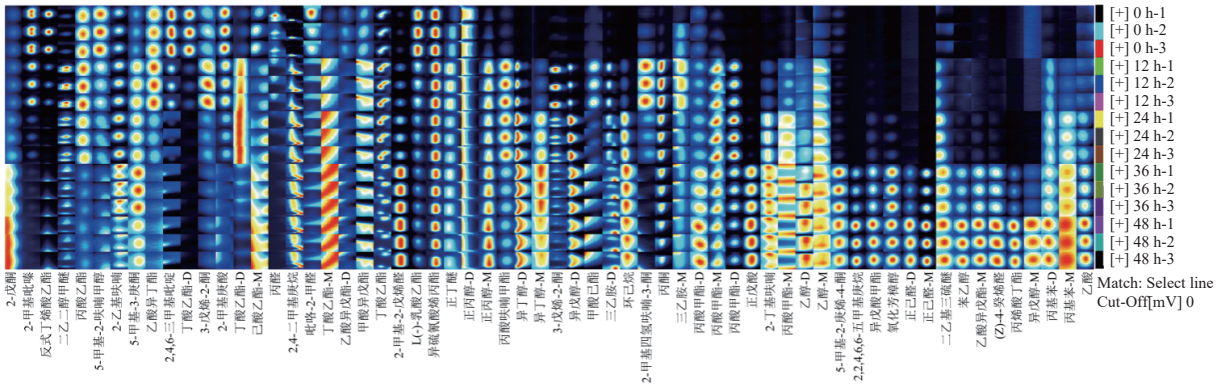


图 7　不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料挥发性风味物质指纹图谱

Fig.7　Volatile flavor compounds fingerprint of blueberry-collagen peptide fermented beverages at different fermentation times

表 4　不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料 GC-IMS 挥发性风味物质定性及相对定量结果

Table 4　Qualitative identification and relative quantification of GC-IMS volatile flavor compounds in blueberry-collagen peptide fermented beverages at different fermentation times

名称	CAS号	风味描述[25]	保留指数	保留时间(s)	相对含量(%)				
					0 h	12 h	24 h	36 h	48 h
			酯类(13种)						
丙酸甲酯	554-12-1	果香、朗姆酒味	925.2	290.671	5.85±0.16^{c}	5.38±0.15^{d}	5.06±0.06^{e}	7.76±0.03^{b}	8.23±0.08^{a}
乙酸异戊酯	123-92-2	苹果味、香蕉味、梨味	1133.7	497.433	1.41±0.05^{c}	0.98±0.01^{e}	1.06±0.01^{d}	6.63±0.03^{b}	7.70±0.05^{a}
异戊酸甲酯	556-24-1	苹果味、果香、菠萝味	1032	368.088	1.33±0.05^{a}	0.56±0.01^{b}	0.29±0.00^{c}	0.21±0.01^{d}	0.24±0.01^{d}
己酸乙酯	123-66-0	苹果皮味、菠萝味、白兰地味	1248.5	686.73	0.51±0.00^{c}	0.20±0.01^{d}	0.18±0.01^{e}	1.52±0.01^{b}	2.25±0.02^{a}
丁酸乙酯	105-54-4	菠萝味、草莓味、黄油味、奶酪味	1049.5	386.255	0.41±0.03^{e}	1.12±0.01^{d}	1.86±0.02^{c}	2.12±0.03^{a}	2.02±0.01^{b}
丙烯酸丁酯	141-32-2	–	1192.5	605.266	0.37±0.01^{a}	0.22±0.00^{b}	0.15±0.01^{c}	0.04±0.00^{d}	0.03±0.01^{d}
甲酸己酯	629-33-4	果香	1365.3	879.809	0.25±0.01^{d}	0.95±0.01^{a}	0.70±0.01^{b}	0.29±0.01^{c}	0.25±0.01^{d}
乙酸异丁酯	110-19-0	苹果味、香蕉味、花香味	996.2	334.009	0.29±0.09^{c}	0.29±0.01^{c}	0.40±0.01^{b}	0.44±0.01^{ab}	0.50±0.01^{a}
丙酸呋喃甲酯	623-19-8	花香，香料味	1101.1	446.023	0.17±0.00^{e}	0.29±0.01^{a}	0.11±0.01^{d}	0.18±0.01^{c}	0.24±0.02^{b}
L(-)-乳酸乙酯	687-47-8	果香、奶油味	811.3	232.55	0.40±0.21^{b}	0.60±0.01^{a}	0.27±0.01^{bc}	0.20±0.01^{c}	0.19±0.01^{c}
甲酸异戊酯	110-45-2	苹果味	821.7	237.338	0.11±0.01^{d}	0.86±0.01^{a}	0.88±0.01^{a}	0.47±0.02^{b}	0.35±0.01^{c}
反式丁烯酸乙酯	623-70-1	热带水果味	845.4	248.603	0.09±0.01^{c}	0.21±0.01^{a}	0.21±0.01^{a}	0.16±0.01^{b}	0.21±0.01^{a}
丙酸乙酯	105-37-3	菠萝味、草莓味、朗姆酒味	965.7	314.659	0.07±0.01^{c}	0.03±0.01^{d}	0.01±0.01^{e}	0.12±0.00^{b}	0.36±0.01^{a}
		合计			11.26±0.07^{d}	11.70±0.13^{c}	11.17±0.05^{d}	20.13±0.08^{b}	22.56±0.04^{a}
			醛类(5种)						
正己醛	66-25-1	新鲜水果味	1099.5	443.68	4.62±0.16^{a}	1.67±0.01^{b}	0.91±0.01^{c}	0.91±0.01^{c}	0.98±0.04^{c}
丙醛	123-38-6	花香味	805	229.719	0.67±0.10^{bc}	0.92±0.02^{a}	0.88±0.03^{a}	0.75±0.02^{b}	0.64±0.01^{c}
2-甲基-2-戊烯醛	623-36-9	果香	841.5	246.714	0.42±0.03^{a}	0.31±0.00^{b}	0.25±0.01^{c}	0.32±0.01^{b}	0.40±0.01^{a}
(Z)-4-癸烯醛	21662-09-9	果香	1196.3	610.484	0.28±0.01^{a}	0.11±0.01^{b}	0.07±0.00^{c}	0.04±0.00^{d}	0.04±0.00^{d}
吡咯-2-甲醛	1003-29-8	坚果味、焦糖香	1025.7	361.776	0.16±0.02^{d}	0.36±0.01^{c}	0.40±0.01^{ab}	0.41±0.01^{a}	0.38±0.01^{b}
		合计			6.14±0.08^{a}	3.36±0.01^{b}	2.51±0.02^{c}	2.43±0.03^{c}	2.44±0.03^{c}
			醇类(6种)						
乙醇	64-17-5	–	939.1	298.658	21.51±0.18^{e}	33.46±0.14^{b}	38.26±0.21^{a}	31.03±0.05^{c}	27.93±0.16^{d}
异戊醇	123-51-3	可可味、花香味、麦芽味	1222.1	647.008	2.13±0.07^{e}	8.07±0.04^{d}	10.38±0.04^{a}	10.26±0.02^{b}	9.91±0.02^{c}
异丁醇	78-83-1	苹果味、可可味、葡萄酒香	1103.1	448.986	1.72±0.11^{e}	5.69±0.04^{d}	8.72±0.02^{a}	8.10±0.02^{b}	7.80±0.03^{c}
正丙醇	71-23-8	糖果味	1048.6	385.225	0.75±0.04^{e}	3.04±0.02^{d}	5.00±0.02^{b}	5.10±0.02^{a}	4.82±0.02^{c}
苯乙醇	60-12-8	果香、蜂蜜味、丁香味、玫瑰味	1119	473.542	0.43±0.01^{b}	0.46±0.01^{a}	0.34±0.01^{c}	0.30±0.01^{d}	0.23±0.01^{e}
氧化芳樟醇	60047-17-8	花香味	1076.9	416.387	0.28±0.04^{a}	0.29±0.03^{a}	0.08±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}	0.06±0.01^{b}
		合计			26.82±0.10^{e}	51.01±0.19^{c}	62.78±0.14^{a}	54.85±0.06^{b}	50.75±0.14^{d}
			烯烃类(4种)						
丙基苯	103-65-1	–	1234.6	665.56	12.29±0.43^{a}	3.08±0.06^{b}	0.67±0.04^{d}	1.05±0.04^{c}	1.32±0.01^{c}
环己烷	110-82-7	–	762.6	211.425	5.40±0.38^{a}	2.65±0.05^{b}	1.97±0.09^{c}	1.35±0.14^{d}	1.12±0.02^{d}
2,2,4,6,6-五甲基庚烷	13475-82-6	–	1026.6	362.668	1.05±0.05^{c}	2.71±0.01^{a}	1.98±0.03^{b}	0.43±0.02^{d}	0.25±0.01^{e}
2,4-二甲基庚烷	2213-23-2	–	851.7	251.701	0.74±0.08^{c}	1.05±0.08^{bc}	1.17±0.22^{b}	1.66±0.30^{a}	1.83±0.07^{a}
		合计			19.47±0.68^{a}	9.49±0.06^{b}	5.80±0.14^{c}	4.49±0.17^{d}	4.51±0.08^{d}

续表 4

名称	CAS号	风味描述[25]	保留指数	保留时间(s)	相对含量(%)				
					0 h	12 h	24 h	36 h	48 h
			酮类(6种)						
丙酮	67-64-1	辛辣味	833	242.665	15.12±0.62^{a}	8.42±0.02^{b}	6.16±0.06^{c}	4.27±0.01^{d}	3.92±0.02^{d}
2-甲基四氢呋喃-3-酮	3188-00-9	坚果味	811.3	232.55	1.61±0.45^{a}	1.44±0.01^{a}	0.90±0.03^{b}	0.61±0.06^{b}	0.57±0.01^{b}
5-甲基-2-庚烯-4-酮	81925-81-7	咸味	994.9	333.13	0.84±0.06^{a}	0.41±0.01^{d}	0.46±0.02^{cd}	0.50±0.01^{c}	0.56±0.01^{b}
3-戊烯-2-酮	625-33-2	–	1141.2	509.951	0.15±0.01^{e}	0.35±0.00^{d}	0.86±0.01^{c}	1.81±0.03^{a}	1.75±0.02^{b}
2-戊酮	107-87-9	果香	996.1	333.89	0.06±0.02^{c}	0.06±0.01^{c}	0.07±0.01^{bc}	0.07±0.00^{b}	0.09±0.01^{a}
5-甲基-3-庚酮	541-85-5	–	987.6	328.43	0.04±0.01^{e}	0.08±0.01^{c}	0.05±0.01^{d}	0.19±0.01^{b}	0.36±0.00^{a}
		合计			17.82±0.11^{a}	10.75±0.02^{b}	8.51±0.10^{c}	7.46±0.05^{d}	7.26±0.03^{e}
			含硫化物(2种)						
异硫氰酸烯丙酯	57-06-7	大蒜味、辛辣味、硫磺味	919.4	287.364	4.63±0.10^{a}	4.59±0.06^{a}	2.60±0.04^{b}	1.80±0.0.06^{c}	1.45±0.04^{d}
二乙基三硫醚	3600-24-6	洋葱味、烧烤味	1141.3	510.187	0.21±0.01^{a}	0.14±0.00^{b}	0.05±0.01^{c}	0.02±0.00^{d}	0.02±0.00^{d}
		合计			4.84±0.10^{a}	4.73±0.06^{a}	2.65±0.04^{b}	1.82±0.06^{c}	1.47±0.05^{d}
			酸类(3种)						
乙酸	64-19-7	酸味、果香	1500.6	1159.139	2.02±0.07^{a}	1.29±0.04^{c}	1.24±0.09^{c}	1.79±0.13^{b}	2.07±0.12^{a}
正戊酸	109-52-4	辛辣味	925.8	291.024	1.39±0.17^{a}	0.63±0.01^{b}	0.49±0.00^{bc}	0.46±0.01^{c}	0.49±0.01^{bc}
2-甲基庚酸	1188-02-9	奶香味	1162.8	548.293	0.08±0.01^{c}	0.05±0.01^{d}	0.09±0.01^{c}	0.30±0.00^{b}	0.50±0.01^{a}
		合计			3.49±0.23^{a}	1.98±0.04^{d}	1.81±0.09^{d}	2.55±0.12^{c}	3.06±0.13^{b}
			吡嗪类(1种)						
2-甲基吡嗪	109-08-0	可可味、榛子味	1293.6	760.277	0.02±0.01^{d}	0.05±0.00^{c}	0.09±0.01^{a}	0.06±0.00^{b}	0.05±0.00^{c}
		合计			0.02±0.00^{d}	0.05±0.00^{c}	0.08±0.00^{a}	0.06±0.00^{b}	0.05±0.00^{c}
			呋喃类(3种)						
2-丁基呋喃	4466-24-4	潮湿干草味	933.1	295.202	0.47±0.06^{d}	0.85±0.01^{b}	0.94±0.01^{a}	0.74±0.01^{c}	0.69±0.04^{c}
2-乙基呋喃	3208-16-0	黄油味、焦糖香	974.8	320.266	0.04±0.01^{d}	0.01±0.01^{cd}	0.05±0.00^{c}	0.19±0.01^{b}	0.28±0.01^{a}
5-甲基-2-呋喃甲醇	3857-25-8	–	965.9	314.734	0.03±0.00^{d}	0.07±0.01^{c}	0.07±0.00^{c}	0.44±0.00^{b}	0.68±0.01^{a}
		合计			0.53±0.05^{e}	0.96±0.02^{d}	1.06±0.01^{c}	1.37±0.01^{b}	1.65±0.04^{a}
			其他(4种)						
三乙胺	121-44-8	–	791.6	223.773	9.26±0.40^{a}	5.59±0.03^{b}	3.44±0.03^{c}	2.85±0.05^{d}	2.96±0.07^{d}
2,4,6-三甲基吡啶	108-75-8	–	1024.3	360.386	0.26±0.03^{c}	0.14±0.00^{d}	0.12±0.01^{d}	1.93±0.01^{b}	3.22±0.01^{a}
正丁醚	142-96-1	–	998.4	335.558	0.07±0.03^{b}	0.22±0.00^{a}	0.07±0.01^{b}	0.02±0.00^{c}	0.03±0.01^{c}
二乙二醇甲醚	111-77-3	–	988.3	328.839	0.02±0.00^{b}	0.00±0.00^{d}	0.00±0.00^{d}	0.01±0.00^{c}	0.04±0.01^{a}
		合计			9.60±0.45^{a}	5.96±0.03^{b}	3.63±0.04^{d}	4.81±0.06^{c}	6.25±0.07^{b}

著增加,这使得发酵样品的风味更加丰富。样品中的酮类则来源于胶原蛋白肽中氨基酸的降解,具有果香的 2-戊酮随发酵时间增加而增加。Li 等[57] 的研究表明,2-戊酮等直链脂肪族酮类化合物因具有较高的果香气感知阈值,可在发酵过程中逐渐积累,既能有效避免异味的产生,又能通过苹果与香蕉的香调提升饮料整体风味。胶原蛋白肽可能引入不良风味,未发酵样品中异硫氰酸烯丙酯(辛辣味、硫磺味)与二乙基三硫醚(洋葱味)含量较高,二者均随发酵时间延长呈现下降趋势。在酸类挥发性物质中,具有酸味的乙酸和正戊酸随发酵时间延长而降低,而具有奶香味的 2-甲基庚酸则上升,表明酵母发酵能有效降低不良风味,提高饮料的果香和奶香[57]。

表 4 为不同发酵时间蓝莓-胶原蛋白肽饮料挥发性风味物质定性及相对定量结果,在蓝莓-胶原蛋白肽发酵体系中挥发性成分仅发生含量重组而未有新增,这一现象主要受酵母代谢特性、接种量阈值及基质互作限制的影响。酿酒酵母在初级代谢阶段通过糖酵解途径快速消耗葡萄糖生成乙醇,将乙酸、正戊酸等具有不良风味的酸类转化为具有果香的酯类,并通过抑制硫代谢酶活性减少二乙基三硫醚和异硫氰酸烯丙酯的积累。0.001%(w/v)的接种量能够减少低接种量(<0.0005%)延滞期过长、酯类合成不足和醛类残留等问题,又能减少高接种量(>0.0015%)引发的菌体自溶、菌体营养竞争产生的异味。萜烯类、吡嗪类等具有复杂风味的酵母次级代谢产物合成依赖氮源耗尽、氧化应激等胁迫信号的激活,而 0.001%(w/v)接种量的菌群密度不足以激活这类信号。此外,蓝莓果胶通过吸附 β-葡萄糖苷酶抑制黄酮苷元水解,间接抑制香草酚酸酯等新酚类的生成。但胶原蛋白肽-多酚复合物能够通过疏水作用吸附硫化物前体物质,有效减少了具有异味的硫醇类物质生成。李粟晋[58] 的研究也具有类似的发现,单一酵母发酵体系因蓝莓果胶对 β-葡萄糖苷酶的吸附抑制及氮源竞争限制,未生成新增风味成分;而引入乳酸菌可高效降解果胶-纤维素复合结构释放萜烯前体,使蓝莓汁新增 9 种酯类物质。

3 结论

本研究通过酵母发酵开发蓝莓-胶原蛋白肽饮料，探究发酵时间对其功能特性与风味品质的调控规律。结果表明，发酵 36 h 为综合性能最佳节点，此时饮料的 L^*值和 a^*值达到峰值，红色调显著增强，透过率提升至 87.06%，果香强度与整体接性最优；多酚、黄酮与花色苷含量达到峰值，抗氧化活性 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除率分别稳定在 86.41% 和 83.49%。结合 GC-IMS 分析与感官评价结果表明，酵母通过糖酵解及氨基酸代谢途径增加酯类化合物的生物合成，并抑制硫代谢关键酶活性以减少挥发性不良风味物质的积累。发酵时间延长至 48 h 虽然进一步提高了样品的抗氧化能力和酶抑制活性，但黄酮、多酚等生物活性物质含量显著降低，褐变度加剧与多酚氧化物增强了蓝黑色调，并且异味物质含量回升使风味品质下降。过度发酵引发的饮料风味品质劣变与生物活性成分损失需通过工艺优化调控，未来研究可结合菌株筛选与两阶段发酵工艺，定向平衡功能活性与风味协调性。综上所述，通过调控发酵时间，使蓝莓-胶原蛋白肽发酵饮料在维持多酚、黄酮等生物活性成分高保留率的同时，显著提升抗氧化能力及风味协调性兼具功能特性与风味品质，为健康型发酵饮料的开发提供了新思路。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ZHANG Yu, LIU Weipeng, WEI Zehua, et al. Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. LWT, 2021, 139: 110590.

[2] 乔慧茹, 房祥军, 吴伟杰, 等. 蓝莓与铁皮石斛叶复合乳酸菌发酵饮料工艺优化与品质分析[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(3): 654−666. [QIAO Huiru, FANG Xiangjun, WU Weijie, et al. Process optimization and quality analysis of composite lactic acid bacteria fermented beverage with blueberries and *Dendrobium officinale* leaves[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2025, 37(3): 654−666.]

[3] 农玉萍, 于洋. 红枣山楂蓝莓复合饮料工艺优化及抗氧化活性分析[J]. 食品工业, 2025, 46(1): 1−7. [NONG Yuping, YU Yang. Process optimization and antioxidant activity analysis of jujube, hawthorn and blueberry compound beverage[J]. The Food Industry, 2025, 46(1): 1−7.]

[4] LI Peiyao, GUO Jinying, LU Can, et al. Effects of fish skin collagen peptide on physicochemical properties of frozen dough and quality and antioxidant activity of steamed bread[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110420.

[5] WANG Yueyue, LIU Xiaofang, JIANG Pengfei, et al. Inhibition of protein denaturation and oxidation of prepared shrimp paste by sturgeon skin collagen peptide[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103766.

[6] 刘欣荣, 郭芮, 申亮, 等. 胶原蛋白肽红枣汁复合饮料的研制[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 50−57. [LIU Xinrong, GUO Rui, SHEN Liang, et al. Development of collagen peptide jujube juice compound beverage[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 50−57.]

[7] 袁辛锐, 杨其长, 王芳, 等. 紫胡萝卜复合发酵饮料的研制及其挥发性风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 201−209. [YUAN Xinrui, YANG Qichang, WANG Fang, et al. Development and volatile flavor substances analysis of purple carrot compound fermented beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 201−209.]

[8] LIAO W H, SHEN J, MANICKAM S, et al. Investigation of blueberry juice fermentation by mixed probiotic strains: Regression modeling, machine learning optimization and comparison with fermentation by single strain in the phenolic and volatile profiles[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134982.

[9] CHE Xiaming, LI Bang, ZENG Jiali, et al. Effect of co-fermentation of non-*Saccharomyces* yeasts with *Saccharomyces cerevisiae* on the quality and flavor of blueberry wine[J]. Food Research International, 2024, 196: 115051.

[10] SUI Xiuyu, ZHU Zhiqi, CHENG Fansheng, et al. Evaluation of physicochemical properties, antioxidant capacity, and volatile flavor compounds during the wine fermentation of Mei (*Prunus mume*) fruit[J]. LWT, 2024, 201: 116177.

[11] 张紫涵. 多糖对胶原蛋白肽—蔓越莓汁饮料的稳定作用及机理探究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [ZHANG Zihan. Stabilization of collagen peptide-cranberry juice drink by polysaccharides and its mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]

[12] FONSECA H C, de SOUSA MELO D, RAMOS C L, et al. Sensory and flavor-aroma profiles of passion fruit juice fermented by potentially probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* CCMA 0743 strain[J]. Food Research International, 2022, 152: 110710.

[13] 黄若涵, 张天天, 刘芳, 等. 高浓度 CO_2 胁迫预处理与电子束辐照对 NFC 苹果汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 325−332. [HUANG Ruohan, ZHANG Tiantian, LIU Fang, et al. Effect of CO_2 stress pretreatment and electron beam irradiation on the quality of NFC apple juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 325−332.]

[14] 吴文龙, 王小敏, 李维林, 等. 不同加工工艺对黑莓浆果出汁率及果汁品质的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(3): 172−175. [WU Wenlong, WANG Xiaomin, LI Weilin, et al. Effect of different juice processing technics on juice quality and juice yield of blackberry[J]. Food Science, 2008, 29(3): 172−175.]

[15] 房祥军, 吴伟杰, 穆宏磊, 等. 外源脱落酸处理对蓝莓采后低温胁迫下生理响应的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 232−242. [FANG Xiangjun, WU Weijie, MU Honglei, et al. Effect of exogenous abscisic acid on physiological response of blueberries to low temperature stress during postharvest[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 232−242.]

[16] 张星, 毕金峰, 陈芹芹, 等. 蓝莓-蓝靛果复合冻干粉贮藏期品质及加工特性[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 240−247. [ZHANG Xing, BI Jinfeng, CHEN Qinqin, et al. Quality and processing characteristics of a mixed freeze-dried powder of blueberry and blue honeysuckle berries during storage[J]. Food Science, 2022, 43(17): 240−247.]

[17] PATEL K S, SHARMA S, PATEL P R, et al. Preserving the quality of fresh-cut guava (*Psidium guajava* L.) with an *Aloe vera*-based multilayered polysaccharide edible coating[J]. Future Postharvest and Food, 2025, 2(1): 75−86.

[18] CHU Wenjing, GAO Haiyan, CHEN Hangjun, et al. Effects of cuticular wax on the postharvest quality of blueberry fruit[J].

Food Chemistry, 2018, 239: 68−74.
[19] SINDHU S, LAKSHMIPATHY K, R L, et al. Comparing ultraviolet and photocatalytic disinfection techniques and their synergistic effects on pesticide presence and quality parameters in grapes [J]. Future Postharvest and Food, 2025, 2(1): 50−62.
[20] 黄婕, 李慧馨, 胡晓, 等. 刺梨果汁成分分析、抗氧化和 α-葡萄糖苷酶抑制活性研究[J]. 食品科技, 2024, 49(3): 112−119. [HUANG Jie, LI Huixin, HU Xiao, et al. Analysis of components, antioxidant and α-glucosidase inhibitory activities of *Rosa roxbunghii* Tratt. fruit juice[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(3): 112−119.]
[21] FATIMA S, KUMAR V, BHADAURIA G. Optimization of *Aloe vera*-sodium alginate composite coating using L16 orthogonal design for extension of shelf life of mushroom[J]. Future Postharvest and Food, 2024, 1(4): 414−427.
[22] 岑敏连, 陈阵, ZOYSA P, 等. 酿酒酵母发酵混合果汁的功能性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 109−113, 119. [CEN Minlian, CHEN Zhen, ZOYSA P, et al. Research on the function of mixed fermented juice by *Saccharomyces cerevisiae* KD[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 109−113, 119.]
[23] LI Shucheng, ZHENG Yi, LI Meiling, et al. Quantitative analyses of major enzyme activities in postharvest fruit[J]. Future Postharvest and Food, 2024, 1(2): 213−221.
[24] 任婧楠, 贾潇, 张智锋, 等. 新鲜沙棘果汁和沙棘原浆的风味和营养品质分析[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 164−170. [REN Jingnan, JIA Xiao, ZHANG Zhifeng, et al. Analysis of flavor and nutritional quality of fresh sea buckthorn juice and pulp[J]. Food Science, 2024, 45(4): 164−170.]
[25] 李维妮, 郭春锋, 张宇翔, 等. 气相色谱-质谱法分析乳酸菌发酵苹果汁香气成分[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 146−154. [LI Weini, GUO Chunfeng, ZHANG Yuxiang, et al. GC-MS analysis of aroma components of apple juice fermented with lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2017, 38(4): 146−154.]
[26] LI Siying, YANG Huafeng, TIAN Hehe, et al. Correlation analysis of the age of brandy and volatiles in brandy by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Microchemical Journal, 2020, 157: 104948.
[27] XUAN Xiaoting, SUN Ruiyang, ZHANG Xiyue, et al. Novel application of HS-GC-IMS with PCA for characteristic fingerprints and flavor compound variations in NFC Chinese bayberry (*Myrica rubra*) juice during storage[J]. LWT, 2022, 167: 113882.
[28] 刘亚萍, 楚杰, 何秋霞, 等. 发酵石榴酒澄清剂的筛选及澄清条件优化[J]. 食品工业科技, 2017, 38(3): 175−179,185. [LIU Yaping, CHU Jie, HE Qiuxia, et al. Study on the selection and optimization of clarificants of pomegranate wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(3): 175−179,185.]
[29] CHEN Jinling, WANG Qiqi, ZHOU Jing, et al. Optimization of α-L-arabinofuranosidase CcABF on clarification and beneficial active substances in fermented *Ginkgo* kernel juice by artificial neural network and genetic algorithm[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139386.
[30] 黄晓杰, 柴哲, 杨钟燕, 等. 蓝莓酒发酵过程中抗氧化物质变化规律研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(17): 103−105,109. [HUANG Xiaojie, CHAI Zhe, YANG Zhongyan, et al. Research of the change rules of antioxidant substances of blueberry wines during fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(17): 103−105,109.]
[31] 李思媛, 李双健, 张会, 等. 植物乳杆菌和发酵乳杆菌发酵对蓝莓花色苷的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(8): 30−37. [LI Siyuan, LI Shuangjian, ZHANG Hui, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* and *L. fermentum* fermentation on anthocyanins in blueberry[J]. Food Research and Development, 2023, 44(8): 30−37.]
[32] MA Tingting, LI Chuan, ZHAO Fuqiang, et al. Effects of co-fermented collagen peptide-jackfruit juice on the immune response and gut microbiota in immunosuppressed mice[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130487.
[33] LI Yanan, PENG Mingye, LU Zhenming, et al. *Lactiplantibacillus plantarum* and *Komagataeibacter europaeus* enhance energy metabolism, acetic acid and aromatic amino acids catabolism flux in cider vinegar fermentation[J]. LWT, 2024, 198: 115968.
[34] de OVALLE S, BRENA B, GONZÁLEZ-POMBO P. Influence of beta glucosidases from native yeast on the aroma of Muscat and Tannat wines[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128899.
[35] LAN Yongli, WU Jin, WANG Xuejiao, et al. Evaluation of antioxidant capacity and flavor profile change of pomegranate wine during fermentation and aging process[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 777−787.
[36] 王文琼, 孙志勇, 黄冬成, 等. 乳酸菌发酵对乳清蛋白蓝莓果汁体系特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(13): 42−48. [WANG Wenqiong, SUN Zhiyong, HUANG Dongcheng, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on the characteristics of whey protein/blueberry juice system[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(13): 42−48.]
[37] YANG Yang, WANG Hui, SHUANG Quan, et al. Novel insights into flavor formation in whey fermented wine: A study of microbial metabolic networks[J]. LWT, 2024, 197: 115911.
[38] 范昊安, 沙如意, 方晟, 等. 苹果梨酵素发酵过程中的褐变与抗氧化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 116−123. [FAN Haoan, SHA Ruyi, FANG Sheng, et al. Browning and antioxidant activity of apple-pear Jiaosu during fermentation[J]. Food Science, 2020, 41(14): 116−123.]
[39] SUI Xiuyu, ZHU Zhiqi, CHENG Fansheng, et al. Dynamic changes and correlation of quality, flavor and microorganisms of Mei (*Prunus mume*) vinegar during fermentation and clarification [J]. Food Research International, 2024, 197: 115209.
[40] GAO Binhe, WANG Jingwen, WANG Yuehua, et al. Influence of fermentation by lactic acid bacteria and *in vitro* digestion on the biotransformations of blueberry juice phenolics[J]. Food Control, 2022, 133: 108603.
[41] ZHU Jianzhong, ZHANG Bin, TAN C P, et al. Effect of *Rosa roxburghii* juice on starch digestibility: A focus on the binding of polyphenols to amylose and porcine pancreatic α-amylase by molecular modeling[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 106966.
[42] ROCHA-GUZMÁN N E, GONZÁLEZ-LAREDO R F, MORENO-JIMÉNEZ M R, et al. Kombucha analogs from maqui juice: Consortium age and sugar concentration effects on anthocyanin stability and its relationship with antioxidant activity and digestive enzyme inhibition[J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136158.
[43] SHI Feifei, WANG Li, LI Shurong. Enhancement in the physicochemical properties, antioxidant activity, volatile compounds, and non-volatile compounds of watermelon juices through *Lactobacillus plantarum* JHT78 fermentation[J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136146.
[44] 李娜, 李莹, 孙悦. 酿酒酵母乙醇代谢调控机制及低产乙醇菌株选育方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15): 315−323. [LI Na, LI Ying, SUN Yue. Research progress on regula-

tion mechanism of ethanol in *Saccharomyces cerevisiae* and breeding of low-yielding strains[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 315−323.]

[45] 王悦齐, 李春生, 李来好, 等. 基于 GC-MS 联用技术分析传统鱼露发酵过程中挥发性风味成分和脂肪酸组分变化[J]. 水产学报, 2018, 42(6): 984−995. [WANG Yueqi, LI Chunsheng, LI Laihao, et al. Analysis of volatile flavor components and fatty acids in fish sauces during fermentation by GC-MS[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 984−995.]

[46] 杨心怡, 赵那娜, 刘荔, 等. 贻贝(*Mytilus edulis*)酶解液酵母发酵法脱腥工艺探究及其风味变化分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 319−327. [YANG Xinyi, ZHAO Nana, LIU Li, et al. Optimization of deodorization and analysis of flavor change of blue mussel (*Mytilus edulis*) hydrolysate by yeast fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 319−327.]

[47] SANTOS SILVA J, FERREIRA N B S, ASQUIERI E R, et al. Chemical monitoring of Baru (*Dipteryx alata* Vog.) pulp fermented beverage[J]. Food Science and Technology, 2021, 41(suppl 1): 155−162.

[48] 郭昊翔, 满都拉, 任宇婷, 等. 传统酸粥发酵过程中营养成分及风味的变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 166−172. [GUO Haoxiang, MANDLAA, REN Yuting, et al. Variation of nutrients and flavors in the fermentation process of traditional sour porridge[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 166−172.]

[49] 付湘晋, 贺海翔, 许时婴, 等. 酵母细胞液处理对白鲢鱼鱼糜脂肪氧化和风味的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(15): 95−99. [FU Xiangjin, HE Haixiang, XU Shiying, et al. Effect of wall-free cells of yeast on lipid oxidation and flavor of silver carp surimi[J]. Food Science, 2010, 31(15): 95−99.]

[50] WANG Dongwei, DENG Yani, CHEN Xiao, et al. Elucidating the effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the aroma profiles of pasteurized *Litchi* juice using multi-scale molecular sensory science[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100481.

[51] WANG Yu, FU Yu, ZHANG Qi, et al. Enhancement of ester biosynthesis in blueberry wines through co-fermentation via cell–cell contact between *Torulaspora delbrueckii* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Research International, 2024, 179: 114029.

[52] 严红光, 张建炀, 霍羽佳, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同酵母菌发酵蓝莓酒风味物质[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 235−241. [YAN Hongguang, ZHANG Jianyang, HUO Yujia, et al. Volatile compounds analysis in blueberry wine fermented with different yeasts by gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 235−241.]

[53] 龚诗媚, 邓雅妮, 张曼, 等. 贝氏酵母发酵过程中荔枝果酒的挥发性风味成分变化[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 236−241. [GONG Shimei, DENG Yani, ZHANG Man, et al. Changes of volatile flavor compounds during fermentation in *Litchi* wine fermented by *Saccharomyces bayanus*[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 236−241.]

[54] YANG Zhibo, LAN Qiuyu, LIU Xiaoyu, et al. Effects of pretreatment methods on the flavor profile and sensory characteristics of kiwi wine based on ^{1}H NMR, GC-IMS and E-tongue[J]. LWT, 2024, 203: 116375.

[55] SUN Xizhen, DU Jiawei, XIONG Yaqing, et al. Characterization of the key aroma compounds in Chinese JingJiu by quantitative measurements, aroma recombination, and omission experiment[J]. Food Chemistry, 2021, 352: 129450.

[56] LI Ting, ZHANG Yue, GU Meiqi, et al. Comprehensive analysis of flavor compounds and metabolites of vinasse hairtail fermentation based on GC-IMS and untargeted-based metabolomics[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104883.

[57] LI Ying, YUAN Li, LIU Huijie, et al. Analysis of the changes of volatile flavor compounds in a traditional Chinese shrimp paste during fermentation based on electronic nose, SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 173−182.

[58] 李粟晋. 水果内生源乳酸菌的筛选及其发酵蓝莓汁功能特性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2021. [LI Sujin. Screening of autochthonous lactic acid bacteria from fruit sources and fermentation characteristics in blueberry juice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021.]