

不同菌种对海湾裙边发酵液品质和风味的影响

赵锦荣, 王月瑶, 桑亚新, 高洁*
(河北农业大学食品科技学院 河北保定 071000)

摘要 为赋予海湾扇贝副产物裙边良好的品质和风味,使用植物乳杆菌植物亚种 Lp-4(Lp-4 组)、干酪乳杆菌 Y5-2b(Y5-2b 组)、马克斯克鲁维酵母 FCC2181(FCC2181 组)、克鲁维毕赤酵母 F29-3-5(F29-3-5 组)分别对扇贝裙边进行单菌发酵,测定接种不同发酵菌种后发酵液风味的变化,并结合风味物质变化和菌株抗氧化能力,分析游离氨基酸和游离脂肪酸作为风味前体对风味物质形成的影响。结果表明,两株乳酸菌和酵母菌在扇贝裙边蒸煮液发酵过程中生长状况良好,发酵过程中发酵液 pH 值显著降低,发酵也促进了裙边发酵液风味的形成。其中,Lp-4 组、Y5-2b 组、FCC2181 组和 F29-3-5 组活菌数分别由 7.04,6.99,5.93,6.07 lg(CFU/mL)增长至 8.49,8.17,8.01,8.18 lg(CFU/mL);发酵 36 h 后 Y5-2b 组 pH 值最低为 3.33,FCC2181 组的 pH 值最高为 5.52;FCC2181 组的样品风味物质含量最高,Lp-4 组的样品风味物质含量最少,FCC2181 组和 F29-3-5 组与其它组相比产生了更多的醇类,Lp-4 组和 Y5-2b 组产生了更多的酸类物质,发酵组比对照组产生更多的酯类物质,醛类物质在各组中占比都较高。在发酵 36 h 时,Y5-2b 组硫代巴比妥酸值含量最低(0.27 mg MDA/kg),与游离脂肪酸含量值相对应,发生较小程度的氧化。总之,使用 4 个不同菌种发酵海湾扇贝裙边,均能获得较好的风味和品质。乳酸菌发酵可得到酸味,酵母菌发酵对醇类风味物质的积累更多。本研究结果可为扇贝裙边发酵菌种的进一步优化提供科学依据。

关键词 扇贝裙边; 发酵; 游离氨基酸; 脂质氧化; 发酵菌种

文章编号 1009-7848(2025)02-0290-14 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2025.02.026

扇贝作为中国重要的养殖贝类之一,产量居世界首位^[1]。虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)和海湾扇贝(*Argopecten irradians*)是中国沿海的 3 种主要扇贝。其中,海湾扇贝生活周期短,生长速度较快,相对其它扇贝品种价格较低廉且味道鲜美,能够带来较好的经济效益,因而被养殖生产和消费^[2]。闭壳肌,也就是贝柱,为海湾扇贝最主要的食用部位,常被单独取出食用,而同样可食用的扇贝裙边,由于肉质不够丰满、口感不佳往往被视为废物大量丢弃,造成资源的浪费和环境的污染。不仅如此,扇贝在打捞之后的短时间内非常容易死亡并腐烂,如果处理不当,可能会给人类健康带来风险,这使得海湾扇贝的鲜销受到极大限制。通过合理的加工,将海湾扇贝裙边进行高值化利用并打破鲜销的限制,是针对上述问题行之有效的解决途径。

发酵是食品原料及其副产物高值化利用的重要方法之一。传统发酵食品,如泡菜、馒头、香肠、酸奶、面包等,在经微生物发酵后,不仅风味及品质得到提升,食材的保质期也得以延长。乳酸菌被广泛应用于食品发酵,在发酵过程中,一些乳酸菌可以促进蛋白质分解,形成短肽和游离氨基酸等物质^[3],发挥提升食材风味和品质的作用。此外,一些乳酸菌还可以通过产生抗氧化物质,降低氧化程度,进而缓解酸败^[4]。与自然发酵相比,接种发酵不仅可以改善食品的风味及品质,而且兼具生产效率高,过程易控制等优势^[5]。植物乳杆菌植物亚种(*Lactobacillus plantarum* subsp. *Plantarum*)和干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*)是肉制品中最常见的发酵菌种,在以往的研究中发现,发酵酸鱼中的植物乳杆菌植物亚种对风味形成起到重要的作用^[6]。梁进欣等^[7]的研究表明,将植物乳杆菌植物亚种添加到干腌鱼中,可以起到降盐增鲜的作用。Mei 等^[8]发现 1 株有抗氧化特征的植物乳杆菌植物亚种,可以减少发酵香肠的氧化程度,进而形成更好的风味。干酪乳杆菌可以提高发酵香肠的质量,还被应用于制作风味独特的发酵海鲜调味品。

收稿日期: 2024-02-24

基金项目: 河北省自然科学基金项目(C2022208020)

第一作者: 赵锦荣,女,博士生

通信作者: 高洁 E-mail: gaojiehu@163.com

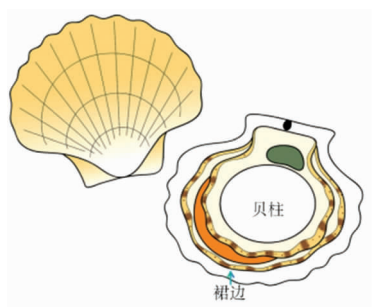


图 1 海湾扇贝示意图

Fig.1 Schematic diagram of *Argopectens irradians*

陈正荣等^[9]将干酪乳杆菌应用到鱼糜发酵中,改善了产品的风味质量。Rashid 等^[10]发现干酪乳杆菌发酵后的海鲈鱼内脏水解物比对照组具有更高的抗氧化能力。作为“发酵之母”的酵母菌,一方面可以通过产生醇类和酯类等风味物质来改善发酵食品的整体风味,另一方面可以通过自身代谢消耗氧气,从而减少食物自身的氧化^[11]。马克斯克鲁维酵母(*Kluyveromyces marxianus*)和克鲁维毕赤酵母(*Pichia kluyveri*)在以往的研究中被应用于肉制品和水产品的发酵中,如 Gao 等^[12]使用马克斯克鲁维酵母和克鲁维毕赤酵母制作具有果味的新型鱼露。Li 等^[13]指出接种克鲁维毕赤酵母的猪肉酶解物,挥发性醇类物质和酯类物质含量提升显著。

微生物发酵海鲜制品味道鲜美,可以添加到酱油和食物中,是良好的天然鲜味增强剂。Zhou 等^[14]使用植物乳杆菌植物亚种、食窦魏斯氏菌(*Weissella paramesenteroides*)和清酒乳杆菌(*Lactobacillus sakei*)作为发酵剂,制作低盐鲭鱼调味料。Li 等^[15]分析了在低温环境下发酵的新型低盐虾酱的理化性质,为虾酱产业提供新思路。Gao 等^[16]在接种发酵剂,不添加食盐的情况下制备发酵鱼露,该鱼露具有很好的香气。综上,接种发酵海湾扇贝裙边具有良好的开发潜力。本文使用植物乳杆菌植物亚种、干酪乳杆菌、马克斯克鲁维酵母和克鲁维毕赤酵母 4 株菌作为发酵菌种,制备裙边发酵液,借助微生物发酵,提升扇贝裙边蒸煮液的风味品质,使之有可能成为调味基料。本研究不仅为扇贝裙边调味料产品开发奠定理论基础,还可为阐释微生物发酵过程中脂肪氧化和蛋白质分解对风味形成的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜海湾扇贝,购于河北省保定市农业大学科技市场;菌株购自中国工业微生物菌种保藏管理中心(CICC):马克斯克鲁维酵母 FCC2181(*Kluyveromyces marxianus* FCC2181),植物乳杆菌亚种植物亚种 Lp-4(*Lactobacillus plantarum* subsp. *Plantarum* Lp-4),干酪乳杆菌 Y5-2b(*Lactobacillus casei* Y5-2b),克鲁维毕赤酵母 F29-3-5(*Pichia kluyveri* F29-3-5)。

食用葡萄糖,河南亿邦化工技术公司;硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid reactive substances, TBARS)、三氯乙酸(Trichloroacetic acid, TCA),国药集团化学试剂有限公司;PDA 培养基、MRS 培养基,北京奥博星有限公司。

1.2 仪器与设备

Trace 1300 ISQ 气相色谱-质谱联用仪,美国赛默飞世尔科技公司;7820A 气相色谱仪,美国安捷伦公司;FE28 pH 计,上海梅特勒-托利多仪器有限公司;LC-2030 Plus 液相色谱仪,日本岛津公司;均质机,中国九阳有限公司。

1.3 方法

1.3.1 菌株培养 乳酸菌及酵母菌培养参考姜娇等^[17]的方法并稍作修改。乳酸菌使用 MRS 肉汤培养基,在 37 °C 条件下培养 24 h,连续活化 2 次后备用。酵母菌使用 YPD 培养基,在 28 °C 条件下培养 24 h,连续活化 2 次后备用。发酵前,将菌株活化液在 5 000 r/min 离心 2 min,取菌泥,重复 2 次。加入无菌生理盐水,涡旋摇匀,使菌体细胞悬浮于生理盐水中,备用。

1.3.2 扇贝裙边蒸煮液的制备 蒸煮液制备参考张彩凤^[18]的方法并稍作修改。将海湾扇贝中的扇贝裙边取出,洗净。生扇贝裙边与蒸馏水按照固液比为 1:2 进行均质。倒入煮锅中加热,水沸腾后开始计时。开盖煮沸蒸发浓缩 30 min,制成扇贝裙边蒸煮液。将扇贝裙边蒸煮液分装至锥形瓶,并添加 2% 的葡萄糖,121 °C 高压灭菌 15 min。灭菌后的样品被分为 5 个批次:对照组(CN)、接种 FCC2181 组、接种 F29-3-5 组、接种 Lp-4 组和接种 Y5-2b 组。在无菌条件下接菌,使扇贝裙边蒸煮液中初始活菌数在 FCC2181 组、F29-3-5 组、Lp-4 组和

Y5-2b 分别约为: 10^6 , 10^6 , 10^7 , 10^7 CFU/mL。将装在锥形瓶中的样品放入培养箱, 30 °C 培养 36 h, 每隔 12 h, 取上清液测定指标。发酵结束后再在 121 °C 下高压灭菌 15 min 结束发酵。用无菌的双层纱布过滤扇贝裙边蒸煮液, 弃去残渣, 得到发酵液。

1.3.3 发酵过程中裙边蒸煮液 pH 值的测定 扇贝裙边蒸煮液发酵至 0, 12, 24, 36 h 分别取样, 摇匀后使用 pH 计测定 pH 值。

1.3.4 发酵过程中裙边蒸煮液中活菌数的测定 参考曹晓玉等^[19]的方法并稍作修改, 每组样品发酵至 0, 12, 24, 36 h 分别取样, 涡旋摇匀, 分别取出 1 mL, 用无菌的生理盐水进行梯度稀释。乳酸菌计数时使用 MRS 培养基, 37 °C 培养 48 h, 酵母菌计数时使用 PDA 培养基, 28 °C 培养 48 h。选取菌落数在 30~300 CFU 的平板进行计数。

1.3.5 发酵过程中裙边蒸煮液的硫代巴比妥酸值测定 将 10 mL 的 7.5 g/100 mL TCA 装入锥形瓶中, 加入 0.1 g 的乙二胺四乙酸 (Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA), 充分溶解后加入发酵前、后的扇贝裙边蒸煮液样品 5 mL, 均质 10 s, 5 000 r/min 离心 10 min。然后, 取 5 mL 上清液与 5 mL 的 0.02 mol/L 的三丁基铝 (Tri-n-butyl aluminum, TBA) 溶液在 90 °C 下水浴 30 min, 取出后冰浴并在波长 532 nm 处测量吸光度^[20]。

1.3.6 接种发酵菌种对裙边蒸煮液挥发性风味物质的影响 分别取 5 mL 的扇贝裙边蒸煮液和 4 组接种菌株后的扇贝裙边蒸煮液样品置于 20 mL 样品瓶中。加入内标, 盖紧。用气相色谱-质谱法 (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 进行分析^[21]。

色谱条件如下: 色谱柱为 DB-WAX (30.0 m × 250 μm, 0.25 μm); 柱温升温程序: 流速: 1.0 mL/min; 升温程序: 初始温度 40 °C, 保留 3 min; 以 5 °C/min 的速率升温至 90 °C, 最后以 10 °C/min 的速率升温至 230 °C, 保留 7 min。进样口温度: 200 °C; 检测器温度: 250 °C; 载气: N₂, 流量 0.8 mL/min, 不分流。

1.3.7 接种发酵菌种对裙边蒸煮液游离氨基酸的影响 样品前处理参照刘成模等^[22]的方法。流动相 A: 乙腈, 流动相 B: 乙酸-乙酸钠缓冲液 (2.5 g 乙酸钠、1.5 mL 三乙胺和 1.17 mL 冰乙酸溶于 1 L

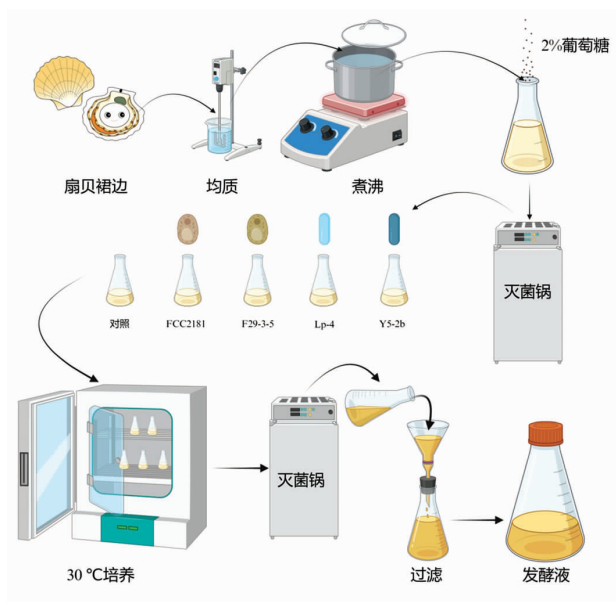


图 2 制备扇贝裙边蒸煮液的工艺流程图

Fig.2 Process flow diagram for the preparation of irradiated skirt cooking liquid

水中), 流速: 1.5 mL/min, 梯度洗脱程序见表 1。

1.3.8 接种发酵菌种对裙边蒸煮液游离脂肪酸的影响 样品前处理参照韦友兵等^[23]的方法, 并以十一烷酸甲酯作为内标物。按照表 2 和表 3 条件进行分析。

表 1 洗脱程序

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%
0	18	82
6.5	18	82
10	20	80
20	34	66
23	45	55
25	55	45
27	18	82
30	18	82

表 2 分析参数

项目	参数
色谱柱型号	安捷伦 HP-88
进样口温度/°C	270
分流比	30:1
检测器温度/°C	280
空气流量/(mL/min)	400
氢气燃气流量/(mL/min)	40
尾吹气流量/(mL/min)	25

表3 升温程序

Table 3 Temperature program

梯度	温度/℃	升温速率/ (℃/min)	升温时间/ min
初始温度	100	-	13
梯度1	180	10	8
梯度2	180	-	6
梯度3	200	1	20
梯度4	200	-	12
梯度5	230	10	3
梯度6	230	-	10

注：“-”表示在该阶段温度保持恒定，不进行升温。

1.3.9 接种发酵菌种对裙边蒸煮液感官的影响

10名人员对发酵前、后的扇贝裙边蒸煮液进行感官评价。每个样品取2 mL倒入透明塑料杯中，杯子上标记随机数字。以10分制对每种感官属性进行打分(鲜味、甜味、酸味、肉味、油脂味、腥味和腐臭味及整体喜爱度)，其中，0分代表无这种风味，10分代表风味极强，5分代表中等强度。

1.3.10 数据分析 采用SPSS 23.0软件进行邓肯多元比较法分析差异的显著性， $P < 0.05$ 代表显著性差异使用。Origin 2021对样本进行载荷图可视化分析。

2 结果与讨论

2.1 发酵过程中活菌数的变化

扇贝裙边蒸煮液发酵过程中的菌株生长曲线如图3所示。两株乳酸菌和两株酵母菌生长情况良好。植物乳杆菌植物亚种Lp-4接种的发液中活菌数由7.04 lg(CFU/mL)增长至8.49 lg(CFU/mL)。干酪乳杆菌Y5-2b接种的发液中活菌数由6.99 lg(CFU/mL)增长至8.17 lg(CFU/mL)。马克斯克鲁维酵母FCC2181和克鲁维毕赤酵母F29-3-5活菌数分别由5.93 lg(CFU/mL)和6.07 lg(CFU/mL)增长至8.01 lg(CFU/mL)和8.18 lg(CFU/mL)。酵母菌在发酵24 h以内生长速度较快，在发酵24 h后增长放缓。

2.2 发酵过程中pH值的变化

扇贝裙边蒸煮液发酵过程中的pH值变化如图4所示。发酵过程中各组发酵液pH值都显著降低。发酵结束时，接种乳酸菌的样品pH值低于

接种酵母菌的样品。发酵36 h接种植物乳杆菌植物亚种Lp-4、干酪乳杆菌Y5-2b、马克斯克鲁维酵母FCC2181和克鲁维毕赤酵母F29-3-5的蒸煮液pH值分别达到3.35、3.33、5.52、4.96。发酵过程中的pH值降低是由乳酸菌及酵母菌代谢产生有机酸导致的^[24]。

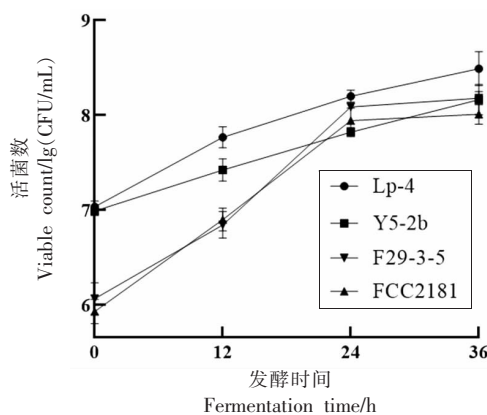


图3 发酵期间菌株的生长曲线

Fig.3 The growth curve of strains during the fermentation

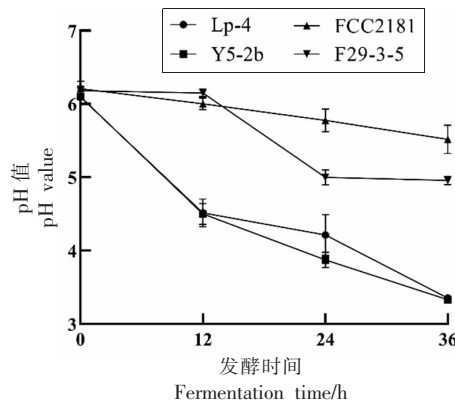


图4 发酵期间pH值的变化

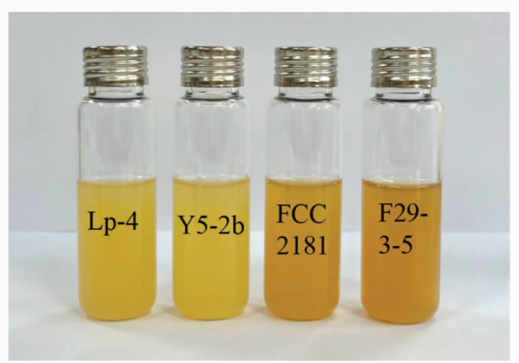
Fig.4 Changes of pH value during the fermentation

2.3 扇贝裙边发酵液图

通过发酵扇贝裙边蒸煮液制得裙边发酵液，图5为分别接种4种发酵液的样品图。发酵终点样品色泽金黄。其中，Lp-4组、Y5-2b组的样品颜色较浅，FCC2181组、F29-3-5组样品颜色较深。

2.4 裙边发酵液硫代巴比妥酸(TBARS)值的变化

TBARS值是评价脂肪氧化程度的常用指标。图6为各发酵时间段测定各组样品的TBARS值。



注:从左到右依次为 Lp-4 组、Y5-2b 组、FCC2181 组、F29-3-5 组。

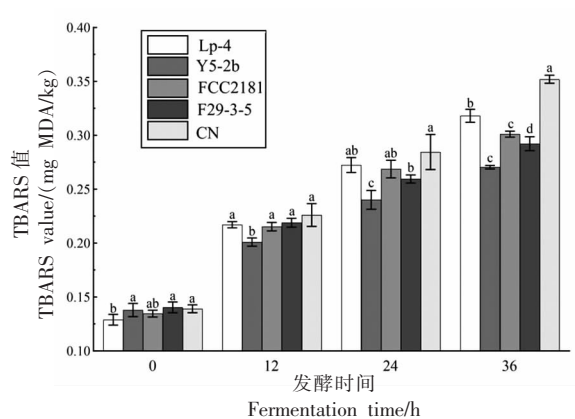
图 5 发酵液样品图

Fig.5 Finished picture of fermented seasoning

从图 6 可知,在发酵 12 h 之后,各组样品 TBARS 值持续上升。接种发酵菌种的各组样品都比对照组有更低的 TBARS 值,可能是因为酵母可以通过自身呼吸作用消耗氧气^[4]。一些乳酸菌则可以通过分泌抗氧化物质来抑制氧化作用^[25]。例如,Mei 等^[8]证实了发酵香肠中乳酸菌的抗氧化作用,其抑制了 TBARS 值的升高,并且对风味起到了良好的作用。在发酵 36 h 时,对照组的 TBARS 值最高,Y5-2b 组的 TBARS 值最低,Lp-4 组的 TBARS 值与对照组最接近。不同样品中的 TBARS 值反映了接种微生物对裙边蒸煮液脂质氧化的影响。4 种菌种的抑制脂肪氧化的能力从高到低依次是:Y5-2b 组、F29-3-5 组、FCC2181 组、和 Lp-4 组。

2.5 裙边发酵液挥发性风味物质的变化

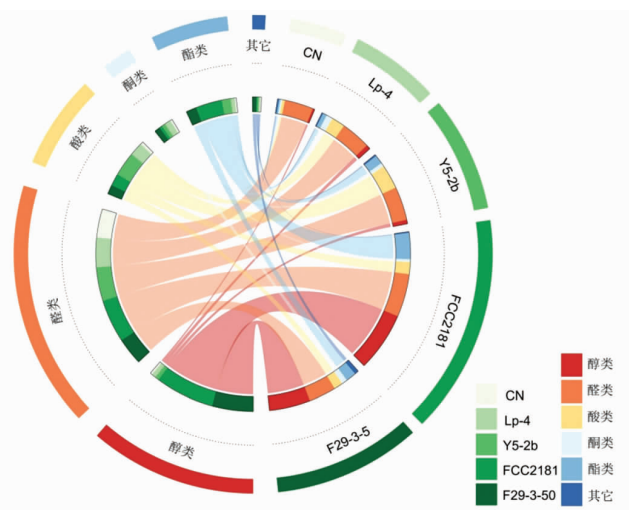
用 5 组样品中的挥发性风味物质浓度绘制弦图(图 7)。从图 7 中可以看出,相比于对照组,4 种发酵菌种发酵的蒸煮液中检测出了更高浓度的风味物质,说明发酵促进了裙边蒸煮液风味的形成。在接种发酵菌种的 4 组样品中,接种马克斯克鲁维酵母 FCC2181 的样品风味物质含量最高;接种植物乳杆菌植物亚种 Lp-4 的样品风味物质含量最少。另外,通过对比各批次样品中醇类、醛类、酮类、酸类、酯类及其它类风味物质的变化,可以更加清晰地观察不同发酵菌种对裙边蒸煮液各风味物质的影响。结果显示:接种马克斯克鲁维酵母 FCC2181、克鲁维毕赤酵母 F29-3-5 的 2 个批次的样品较其它组相比产生了更多的醇类;而接种



注:不同小写字母表示组间差异显著($P < 0.05$)。

图 6 发酵前、后裙边蒸煮液的硫代巴比妥酸值

Fig.6 Thiobarbituric acid value of cooking liquor before and after fermentation



注:图中不同长度的线段表示菌种与风味物质间之相关性的强度,线段越长表示菌种与对应的风味物质之间相关性越强。

图 7 发酵前、后裙边蒸煮液的挥发性风味物质浓度弦图

Fig.7 Chord diagram of the concentration of volatile flavor substances in the mantle cooking liquor before and after fermentation

植物乳杆菌植物亚种 Lp-4 的样品和接种干酪乳杆菌 Y5-2b 的样品产生了更多的酸类物质;接种 4 种发酵菌种的样品中检测到了比对照组更多的酯类物质,说明发酵促进了酯类物质的生成;醛类物质在各组中占比都较高,其作为肉制品及水产品中重要的特征风味来源,对样品风味起到重要的作用。

接种不同发酵菌种的裙边蒸煮液挥发性风味

物质的含量见表 4。在发酵前、后的扇贝裙边蒸煮液中共检测出 100 种挥发性风味物质,其中,对照组 52 种,Lp-4 组 53 种,Y5-2b 组 42 种,FCC2181 组 48 种,F29-3-5 组 53 种。

酯类物质可以由微生物通过酯化反应产生,其主要提供果香。有研究发现,酵母菌和乳酸菌发酵作用可以促进酯类物质形成,这与本文的结果相似。另外,结果显示乙酯类化合物含量在 Y5-2b 组、FCC2181 组中增加,尤其是在 FCC2181 组中增加显著,这可能与 FCC2181 组中由酵母菌代谢产生的乙醇有关。增加的乙酯类包括己酸乙酯、月桂酸乙酯、肉豆蔻酸乙酯、棕榈酸乙酯等。酯类物质对样品产生更好的感官品质贡献重要的力量,其在发酵后的 4 组样品中检测到比对照组更高的含量。在 FCC2181 组和 F29-3-5 组样品中检测到较高的酯类物质含量可能与其代谢过程中产生的醇类物质有关,这些醇类可以作为酯类物质的合成前体。然而,并不是所有菌株都会通过发酵促进酯类物质的产生,产酯能力也与菌株性质有关。例如,Chen 等^[26]将乳酸菌接种到猪肉肌浆蛋白中,在接种的发酵样品中并未检测到酯类物质的提高。

醇类物质为发酵制品提供特殊的清香味,可以为发酵水产品提供具有代表性的独特风味,例如日本和泰国的鱼露中均含有 3-甲基-1-丁醇、乙醇、辛醇、丙醇等醇类物质^[27]。碳水化合物代谢、脂质氧化和氨基酸脱羧是醇类物质的主要来源^[28]。醇类物质在接种酵母的 FCC2181 组和 F29-3-5 组样品中增加较明显,这与酵母的代谢特性有关。直链的一级醇对风味影响较小,而随着碳链增长,醇类呈现出清香和脂肪香,包括 1-辛烯-3-醇在内的一些不饱和醇,因阈值较低,较大程度地影响着风味^[29]。

醛类在各组样品中含量较高,其主要来自于脂肪氧化和氨基酸降解作用^[30]。壬醛、己醛、庚醛和辛醛,这些醛类作为脂肪族醛类,在 Lp-4 组中具有较高的含量,而在 Y5-2b 组含量较低。这些醛类来源于不饱和脂肪酸的氧化,其含量出现的显著差异可能与菌株抑制氧化的能力有关。大多数支链醛则主要由支链氨基酸的降解产生,例如:发酵后显著升高的苯甲醛,有杏仁的香甜味道。

酸类是发酵制品中具有特殊风味的成分,可

能由脂质氧化产生,也可能源于氨基酸降解或糖代谢^[31]。其在 Lp-4 组和 Y5-2b 组检测到更高的含量。酮类源于脂质氧化,在发酵后的样品中,酮类在 Lp-4 组检测到最高值,其次是 F29-3-5 组。这可能与菌株的抑制脂肪氧化能力有关。另外,一些酮类物质由发酵产生,如 3-羟基-2-丁酮,其具有奶香味,在对照组中未检测到,在 Lp-4 组、FCC2181 组和 F29-3-5 组中显著增加。

2.6 裙边发酵液游离氨基酸含量分析

游离氨基酸不仅是滋味的主要贡献者,还可以作为风味物质的前体^[32]。为了评估发酵菌种对蒸煮液中蛋白质分解的影响,对 5 组样品进行游离氨基酸含量的测定,结果如表 5 所示。发酵后的各组样品中总游离氨基酸含量显著增加,说明在发酵过程中,微生物分泌的蛋白酶显著促进了蛋白质的分解。FCC2181 组中总游离氨基酸含量最高,其次是 Y5-2b 组,这意味着马克斯克鲁维酵母和干酪乳杆菌对裙边蒸煮液中蛋白质的降解作用更显著。F29-3-5 组与 Lp-4 组游离氨基酸总量虽然没有显著差异,但也高于对照组。谷氨酸是鲜味氨基酸,其含量在发酵后的各组样品中显著增加。鲜味氨基酸天冬氨酸在 F29-3-5 组、Y5-2b 组中含量与对照组没有显著性差异,在 Lp-4 组和 FCC2181 组中含量下降。丙氨酸含量在发酵后的各组样品中含量显著增加,其中,在 FCC2181 组中含量最高。一些文献指出,丙氨酸可以增强酱油的鲜味^[14]。

2.7 接种发酵菌种的裙边蒸煮液游离脂肪酸含量分析

游离脂肪酸经氧化后形成大量风味物质^[33]。图 8 为游离脂肪酸的含量变化图。结果显示,样品中的游离脂肪酸以饱和脂肪酸 (Saturated fatty acid, SFA) 为主,不饱和脂肪酸中含量较高的是多不饱和脂肪酸 (Polyunsaturated fatty acid, PUFA),而最强烈的氧化损失发生在多不饱和脂肪酸中^[34]。有研究表明,不饱和脂肪酸更容易被氧化^[35]。壬醛和辛醛在 Lp-4 组中具有较高的含量,而在 Y5-2b 组含量较低,其被认为是油酸的氧化产物。与 TBARS 值相对应的是,Lp-4 组游离脂肪酸氧化损失量最多,Y5-2b 组游离脂肪酸氧化损失量最少。这在一定程度上反映了菌株的抗氧化

表4 接种不同发酵菌种对裙边蒸液挥发性风味物质的影响
Table 4 Effects of inoculating different fermentation strains on volatile flavor substances of cooking liquid

序号	化合物	CAS号	气味描述	含量/(mg/L)				
				CN	Lp-4	Y5-2b	FCC2181	F29-3-5
C1	己酸乙酯	123-66-0	果味	—	—	—	0.53 ± 0.01	—
C2	辛酸乙酯	106-32-1	果味、葡萄酒、脂肪味	—	—	5.89 ± 0.40 ^b	10.75 ± 0.94 ^a	—
C3	月桂酸乙酯	106-33-2	蜡味、甜味	—	—	0.84 ± 0.09 ^b	1.88 ± 0.02 ^a	—
C4	癸酸乙酯	110-38-3	甜、脂肪味、果味	—	—	—	13.05 ± 0.78	—
C5	肉豆蔻酸乙酯	124-06-1	甜蜡花香	—	—	—	0.92 ± 0.11	—
C6	棕榈酸乙酯	628-97-7	温和的脂肪味、果味、奶油	—	—	—	1.11 ± 0.01	—
C7	亚油酸甲酯	112-63-0	油性、脂肪、木质香	—	—	—	—	4.02 ± 0.75
C8	异硬脂酸甲酯	5129-61-3	—	—	—	—	—	1.50 ± 0.14
C9	乙基乙酸芳樟酯	72845-33-1	花香	0.12 ± 0.01	—	—	—	—
C10	棕榈酸甲酯	112-39-0	脂肪味	1.12 ± 0.20 ^d	2.23 ± 0.43 ^{bc}	1.89 ± 0.09 ^{cd}	2.98 ± 0.50 ^b	6.93 ± 0.54 ^a
C11	甲酸己酯	629-33-4	果味	0.21 ± 0.01	—	—	—	—
C12	甲酸庚酯	112-23-2	青草味	0.43 ± 0.02 ^b	1.15 ± 0.21 ^a	0.45 ± 0.06 ^b	0.48 ± 0.11 ^b	0.32 ± 0.12 ^b
C13	辛酸辛酯	2306-88-9	椰子油、果味	—	0.70 ± 0.05	—	—	—
C14	邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	微弱气味	—	0.76 ± 0.13 ^b	1.01 ± 0.01 ^a	—	—
C15	γ-壬内酯	104-61-0	椰子、奶油	—	0.19 ± 0.01 ^c	0.44 ± 0.09 ^a	0.31 ± 0.00 ^b	—
C16	1,4-辛内酯	104-50-7	椰子	—	—	0.07 ± 0.00	—	—
C1	2-十八烯酸单甘油酯	3443-84-3	—	—	—	0.23 ± 0.04	—	—
C18	2-甲基戊酸甲酯	2177-77-7	果味	—	—	0.24 ± 0.06	—	—
C19	乙酸异戊酯	123-92-2	甜、果味、香蕉	—	—	—	0.62 ± 0.03	—
C20	戊醇	71-41-0	辛辣、酒精味	0.46 ± 0.02 ^c	0.77 ± 0.10 ^{ab}	0.69 ± 0.07 ^b	0.67 ± 0.03 ^b	0.88 ± 0.08 ^a
C21	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	泥土、青草味、脂肪味和蘑菇味	0.27 ± 0.02 ^c	0.49 ± 0.04 ^b	0.25 ± 0.03 ^c	0.82 ± 0.06 ^a	0.43 ± 0.01 ^b
C22	庚醇	111-70-6	青草味	0.28 ± 0.01 ^c	—	0.63 ± 0.12 ^b	—	0.93 ± 0.04 ^a
C23	辛醇	111-87-5	脂肪味、青草味、玫瑰味、蘑菇味	0.28 ± 0.02 ^c	—	0.82 ± 0.02 ^b	1.01 ± 0.03 ^b	1.64 ± 0.29 ^a
C24	2-癸烯-1-醇	22104-80-9	脂肪味、新鲜空气、柑橘味、玫瑰味	0.10 ± 0.02 ^c	—	—	0.27 ± 0.11 ^b	0.65 ± 0.02 ^a
C25	异戊醇	123-51-3	酒果味、香蕉	—	0.37 ± 0.06 ^c	—	22.96 ± 0.3 ^a	4.60 ± 0.28 ^b
C26	顺-5-辛烯-1-醇	64275-73-6	青草味	0.18 ± 0.01 ^{bc}	—	—	0.50 ± 0.05 ^b	1.66 ± 0.35 ^a
C27	壬醇	143-08-8	花香	0.84 ± 0.03	—	—	—	—
C28	2-苯乙醇	60-12-8	花香	—	—	—	11.78 ± 0.61	11.44 ± 0.22
C29	糠醇	98-00-0	面包味	—	2.04 ± 0.25	2.03 ± 0.10	—	2.38 ± 0.47
C30	十六醇	36653-82-4	脂肪味、油腻、花香	—	0.65 ± 0.08	—	—	—
C31	己醇	111-27-3	甜、青草味	—	0.15 ± 0.07 ^b	0.33 ± 0.01 ^a	0.38 ± 0.05 ^a	—

(续表 4)

序号	化合物	CAS 号	气味描述	含量/(mg/L)				
				CN	Lp-4	Y5-2b	FCC2181	F29-3-5
C32	顺式-2-辛烯醇	26001-58-1	甜花	—	0.20 ± 0.01	—	—	—
C33	百秋李醇	5986-55-0	木质香	—	0.63 ± 0.04	—	—	0.74 ± 0.13
C34	(Z)-4-癸烯-1-醇	57074-37-0	脂肪味	—	—	0.13 ± 0.01	—	—
C35	丙醇	71-23-8	酒精	—	—	—	0.54 ± 0.07	—
C36	异丁醇	78-83-1	麦芽香	—	—	—	2.71 ± 0.02 ^a	0.26 ± 0.06 ^b
C37	呋喃-3-甲醇	4412-91-3	—	—	—	—	1.54 ± 0.05 ^a	0.99 ± 0.15 ^b
C38	3-甲硫基丙醇	505-10-2	硫磺味	—	—	—	0.53 ± 0.04	—
C39	乙醇	64-17-5	—	—	—	—	29.8 ± 1.41 ^a	23.40 ± 2.28 ^b
C40	反-2-十二碳烯醇	69064-37-5	脂肪味	—	—	—	—	0.93 ± 0.11
C41	己醛	66-25-1	果味、叶子	0.58 ± 0.01 ^c	4.04 ± 0.03 ^a	0.66 ± 0.06 ^c	2.65 ± 0.01 ^b	—
C42	庚醛	111-71-7	坚果、清新、青草味	0.63 ± 0.06 ^b	1.22 ± 0.21 ^a	0.15 ± 0.03 ^c	1.18 ± 0.27 ^a	1.22 ± 0.16 ^a
C43	顺-4-庚烯醛	6728-31-0	青草味	0.07 ± 0.02	—	—	—	—
C44	辛醛	124-13-0	果味、脂肪味	1.11 ± 0.13 ^b	4.41 ± 0.22 ^a	0.86 ± 0.16 ^b	0.85 ± 0.11 ^b	1.09 ± 0.12 ^b
C45	壬醛	124-19-6	脂肪味、醛香、橙皮味、玫瑰味	2.56 ± 0.19 ^d	8.15 ± 0.11 ^a	3.54 ± 0.43 ^c	7.43 ± 0.22 ^b	3.05 ± 0.08 ^{cd}
C46	3-呋喃甲醛	498-60-2	—	0.32 ± 0.04 ^c	0.56 ± 0.05 ^b	0.39 ± 0.02 ^c	—	1.38 ± 0.06 ^a
C47	(E,E)-2,4-庚二烯醛	4313-03-5	脂肪味、甜味、果味	0.84 ± 0.10 ^b	0.49 ± 0.05 ^{bc}	—	3.43 ± 0.35 ^a	0.21 ± 0.04 ^{cd}
C48	癸醛	112-31-2	甜味、脂肪味、柑橘味、花卉	0.69 ± 0.05 ^c	0.25 ± 0.00 ^d	1.14 ± 0.01 ^b	1.31 ± 0.01 ^a	0.13 ± 0.04 ^c
C49	苯甲醛	100-52-7	杏仁、果味	1.12 ± 0.12 ^c	3.11 ± 0.42 ^a	2.78 ± 0.10 ^{ab}	2.32 ± 0.04 ^b	1.42 ± 0.42 ^c
C50	2,6-壬二烯醛	557-48-2	青草味、黄瓜、甜瓜、脂肪味	0.78 ± 0.06 ^b	1.17 ± 0.22 ^b	0.46 ± 0.04 ^b	1.28 ± 0.15 ^b	4.54 ± 0.68 ^a
C51	2,4-壬二烯醛	6750-03-4	脂肪味、青草味	0.32 ± 0.04 ^a	0.11 ± 0.01 ^b	—	0.51 ± 0.14 ^a	0.35 ± 0.06 ^a
C52	2-十一烯醛	2463-77-6	果味、橙皮味	1.13 ± 0.17 ^d	1.76 ± 0.23 ^d	7.40 ± 0.09 ^a	4.88 ± 0.42 ^b	2.59 ± 0.27 ^c
C53	(E,E)-2,4-十二碳二烯醛	21662-16-8	—	0.07 ± 0.02	—	—	—	—
C54	3,5-二甲基苯甲醛	5779-95-3	—	4.52 ± 0.09	4.01 ± 0.55	—	—	—
C55	十六醛	629-80-1	纸板味	2.76 ± 0.19 ^a	0.85 ± 0.06 ^b	—	—	1.81 ± 0.37 ^b
C56	二十烷醛	2400-66-0	—	0.60 ± 0.05 ^b	0.58 ± 0.03 ^b	—	0.68 ± 0.12 ^b	1.36 ± 0.01 ^a
C57	十八烷醛	638-66-4	油味	4.43 ± 0.26 ^d	13.02 ± 2.62 ^a	6.39 ± 0.38 ^c	—	9.14 ± 1.62 ^b
C58	顺式-2-十烯醛	2497-25-8	脂肪味	2.02 ± 0.09 ^b	1.67 ± 0.19 ^b	0.13 ± 0.01 ^c	12.48 ± 0.78 ^a	1.36 ± 0.05 ^b
C59	丁香醛	53447-47-5	甜美花香	3.40 ± 0.55 ^b	0.70 ± 0.14 ^c	—	5.41 ± 0.55 ^a	—
C60	(Z)-13-十八碳烯醛	58594-45-9	蜡味	0.89 ± 0.17 ^b	2.90 ± 0.23 ^a	—	—	—
C61	顺式-2-庚烯醛	57266-86-1	—	—	0.22 ± 0.01 ^c	—	0.65 ± 0.10 ^b	1.12 ± 0.09 ^a
C62	反-2-癸烯醛	3913-81-3	脂肪味	—	—	7.69 ± 0.43 ^a	8.57 ± 0.73 ^a	3.00 ± 0.13 ^b
C63	反-2-庚烯醛	18829-55-5	脂肪味、带有水果味	0.16 ± 0.01	—	—	—	—
C64	2,4-壬二烯醛	6750-03-4	脂肪味、青草味	0.16 ± 0.06	—	—	—	—
C65	E,E-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	脂肪味、果味	1.85 ± 0.06	—	—	—	—
C66	反,反-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	脂肪味	3.65 ± 0.20 ^a	0.30 ± 0.01 ^b	—	—	—
C67	(Z)-6-壬烯醛	2277-19-2	甜瓜味	0.09 ± 0.02	—	—	—	—

(续表 4)

序号	化合物	CAS号	气味描述	含量/(mg/L)				
				CN	Lp-4	Y5-2b	FCC2181	F29-3-5
C68	顺-11-十六稀醛	53939-28-9	蜡味	0.25 ± 0.01	—	—	—	—
C69	2-戊酮	107-87-9	甜果味	0.51 ± 0.00	—	—	—	—
C70	2-壬酮	821-55-6	果味、甜味、脂肪味、肥皂味、 奶酪、青草味、椰子	0.16 ± 0.01 ^c	0.28 ± 0.03 ^b	0.10 ± 0.01 ^d	—	0.45 ± 0.04 ^a
C71	2-十一酮	112-12-9	果味	1.55 ± 0.34 ^b	—	—	2.51 ± 0.18 ^b	5.48 ± 0.79 ^a
C72	羧基丙酮	116-09-6	焦糖	0.10 ± 0.04 ^c	0.19 ± 0.03 ^b	0.41 ± 0.02 ^a	—	0.18 ± 0.03 ^b
C73	2,3-丁二酮	431-03-8	甜、奶油、黄油、辛辣、焦糖	—	5.66 ± 0.28 ^a	3.87 ± 0.21 ^b	—	—
C74	3-羧基-2-丁酮	513-86-0	黄油味	—	1.54 ± 0.19 ^a	—	0.28 ± 0.05 ^b	0.21 ± 0.04 ^c
C75	3,5-辛二烯-2-酮	30086-02-3	果味、青草味	—	0.25 ± 0.01	—	—	—
C76	3,5-辛二烯酮	38284-27-4	果味、脂肪、蘑菇	—	—	0.18 ± 0.04	—	—
C77	5-甲基-3-庚酮	541-85-5	草药、甜、油味	—	—	—	0.40 ± 0.05	—
C78	3-辛酮	106-68-3	草本、薰衣草、甜、蘑菇	—	—	—	0.25 ± 0.05	—
C79	4-甲基-2-庚酮	6137-06-0	—	—	—	—	—	0.18 ± 0.04
C80	2-甲基环己酮	583-60-8	薄荷	—	—	—	—	0.22 ± 0.03
C81	2-辛酮	111-13-7	泥土味	—	—	—	—	0.20 ± 0.01
C82	己酸	142-62-1	酸腻的汗水、奶酪	0.44 ± 0.03 ^b	1.55 ± 0.33 ^a	1.82 ± 0.46 ^c	1.41 ± 0.13 ^a	2.02 ± 0.02 ^a
C83	肉豆蔻酸	544-63-8	脂肪味、肥皂、椰子	1.53 ± 0.22 ^c	2.39 ± 0.28 ^b	2.23 ± 0.03 ^b	0.82 ± 0.15 ^b	4.30 ± 0.34 ^a
C84	醋酸	64-19-7	酸	—	1.74 ± 0.16 ^b	2.14 ± 0.05 ^a	—	0.39 ± 0.02 ^c
C85	乙醇酸	79-14-1	温和的黄油味	—	0.18 ± 0.02	—	—	—
C86	庚酸	111-14-8	脂肪味、出汗、发酵、果味	—	1.48 ± 0.13	1.78 ± 0.37	—	—
C87	辛酸	124-07-2	汗水、奶酪味	0.59 ± 0.10 ^d	2.51 ± 0.18 ^c	5.29 ± 0.80 ^b	8.21 ± 0.43 ^a	1.84 ± 0.24 ^c
C88	壬酸	112-05-0	脂肪味、发酵乳制品味	0.77 ± 0.18 ^c	7.06 ± 0.31 ^b	14.38 ± 0.18 ^a	4.69 ± 0.41 ^c	2.74 ± 0.29 ^d
C89	月桂酸	143-07-7	月桂油香味	—	—	2.54 ± 0.04	—	—
C90	吡嗪	290-37-9	坚果味	0.17 ± 0.02 ^a	0.05 ± 0.01 ^b	—	—	—
C91	2-甲基吡嗪	109-08-0	坚果味	0.2 ± 0.03	0.09 ± 0.01	—	—	0.72 ± 0.17
C92	1,3-茛并噻唑	95-16-9	含硫、坚果、噻唑气味	0.16 ± 0.01 ^c	0.20 ± 0.02 ^c	0.70 ± 0.07 ^a	0.53 ± 0.05 ^b	0.51 ± 0.09 ^b
C93	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	酚醛	0.64 ± 0.05 ^b	0.59 ± 0.04 ^b	0.50 ± 0.04 ^b	0.69 ± 0.01 ^b	1.90 ± 0.47 ^a
C94	苯乙烯	100-42-5	香醋	0.08 ± 0.01 ^b	0.02 ± 0.01 ^c	—	—	0.22 ± 0.03 ^a
C95	反式-2-(2-戊烯基)呋喃	70424-14-5	—	0.08 ± 0.01 ^{cd}	0.11 ± 0.02 ^b	0.37 ± 0.05 ^a	—	0.20 ± 0.06 ^b
C96	甲酸己酯	629-33-4	果味	0.21 ± 0.01 ^a	0.04 ± 0.01 ^b	—	—	—
C97	3-氨基-2-甲基吡啶	3430-10-2	—	—	0.29 ± 0.04	—	—	—
C98	2-戊基呋喃	3777-69-3	青草味	—	—	0.20 ± 0.01	—	—
C99	十四烷	629-59-4	轻度脂肪味	—	—	—	—	0.45 ± 0.07
C100	2,6-二叔丁基对苯二酚	2444-28-2	—	—	—	—	—	0.91 ± 0.30

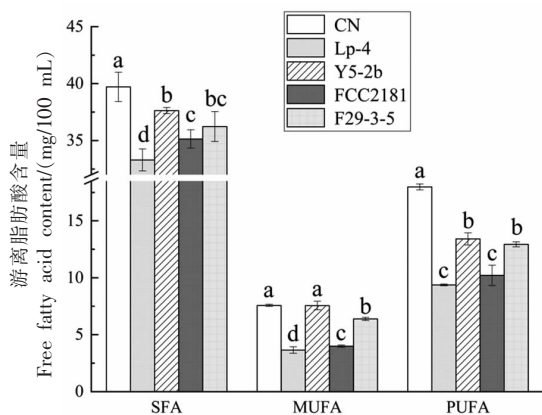
注:不同字母代表样品间的显著性差异(P<0.05);“—”表示未检出。

表 5 接种不同发酵菌种对蒸煮液的游离氨基酸组成的影响

Table 5 Effects of inoculating different fermentation strains on free amino acid composition of cooking liquid

组别	缩写	游离氨基酸含量/(mg/L)				
		CN	Lp-4	Y5-2b	FCC2181	F29-3-5
天冬氨酸	Asp	123.76 ± 4.31 ^a	102.85 ± 2.25 ^b	121.43 ± 10.33 ^a	98.28 ± 12.93 ^b	126.93 ± 11.00 ^a
谷氨酸	Glu	277.76 ± 9.70 ^b	315.93 ± 11.27 ^a	335.53 ± 9.60 ^a	328.96 ± 13.20 ^a	319.85 ± 18.06 ^a
甘氨酸	Gly	859.04 ± 61.11 ^b	714.99 ± 34.16 ^{bc}	699.09 ± 46.68 ^c	1 229.13 ± 151.43 ^a	827.75 ± 1.43 ^{bc}
苏氨酸	Thr	693.70 ± 50.79 ^b	951.93 ± 8.87 ^a	630.46 ± 17.49 ^b	984.69 ± 56.27 ^a	501.78 ± 76.62 ^c
丝氨酸	Ser	182.35 ± 0.99 ^c	290.50 ± 4.43 ^a	240.38 ± 18.07 ^b	265.20 ± 12.36 ^{ab}	274.08 ± 23.12 ^a
丙氨酸	Ala	88.13 ± 2.68 ^d	132.37 ± 7.34 ^b	134.54 ± 1.59 ^b	155.90 ± 5.31 ^a	119.07 ± 4.10 ^c
精氨酸	Arg	68.67 ± 0.21 ^d	96.39 ± 7.49 ^b	94.85 ± 0.74 ^b	121.81 ± 6.54 ^a	80.36 ± 0.64 ^c
脯氨酸	Pro	222.95 ± 1.06 ^c	239.40 ± 10.46 ^b	359.91 ± 4.38 ^a	201.60 ± 11.47 ^d	243.88 ± 4.33 ^b
组氨酸	His	87.71 ± 0.80 ^c	84.56 ± 3.70 ^c	149.55 ± 10.08 ^a	61.70 ± 4.53 ^d	101.92 ± 2.77 ^b
缬氨酸	Val	112.21 ± 3.37 ^c	123.91 ± 4.17 ^c	195.11 ± 5.52 ^a	154.12 ± 13.34 ^b	159.86 ± 11.14 ^b
蛋氨酸	Met	223.51 ± 14.42 ^a	176.10 ± 14.50 ^b	189.26 ± 9.25 ^b	183.66 ± 19.35 ^b	167.35 ± 24.28 ^b
异亮氨酸	Ile	471.40 ± 3.23 ^b	501.29 ± 1.89 ^a	491.01 ± 12.69 ^a	463.63 ± 7.02 ^b	500.73 ± 14.47 ^a
亮氨酸	Leu	279.66 ± 6.84 ^c	284.70 ± 3.74 ^{bc}	308.20 ± 3.66 ^b	273.78 ± 8.40 ^c	367.98 ± 28.28 ^a
苯丙氨酸	Phe	93.03 ± 4.13 ^b	113.33 ± 5.27 ^a	116.62 ± 2.16 ^a	83.43 ± 7.69 ^b	112.91 ± 9.67 ^a
赖氨酸	Lys	540.61 ± 3.41 ^b	584.59 ± 67.83 ^b	791.83 ± 35.57 ^a	528.10 ± 27.14 ^b	752.35 ± 5.46 ^a
酪氨酸	Tyr	62.60 ± 22.26 ^b	68.10 ± 13.44 ^b	76.40 ± 26.25 ^{ab}	105.50 ± 5.89 ^a	97.57 ± 16.81 ^{ab}
胱氨酸	Cys	83.43 ± 11.51 ^a	71.40 ± 14.39 ^{ab}	76.62 ± 3.51 ^a	53.41 ± 3.57 ^c	56.69 ± 5.49 ^{bc}
氨基酸总量	/	4 470.52 ± 15.11 ^d	4 852.35 ± 45.41 ^c	5 010.78 ± 59.11 ^b	5 292.90 ± 80.42 ^a	4 811.06 ± 47.25 ^c

注:上角标中不同的字母代表样品间的显著性差异($P < 0.05$)。



注:不同小写字母表示组别之间的显著性差异($P < 0.05$)。

图 8 发酵前、后裙边蒸煮液的游离脂肪酸含量

Fig.8 Free fatty acid content of cooking liquor before and after fermentation

能力对游离脂肪酸氧化作用的影响。

各种研究表明,由脂肪分解产生的游离脂肪酸是风味物质的主要前体,而脂质氧化进一步形成的挥发性化合物也是肉制品形成其特征风味的

重要因素^[36]。在发酵前、后的 5 组样品中共检测到 15 种游离脂肪酸。棕榈酸、硬脂酸和二十二碳六烯酸是发酵前、后蒸煮液中主要的游离脂肪酸。有研究表明,棕榈酸与肉味具有显著相关性,硬脂酸也与风味有较高的相关性^[37]。在发酵过程中,游离脂肪酸的含量整体呈下降趋势,说明在发酵过程中游离脂肪酸发生了氧化作用,这与一些风味物质的形成有关。适度的脂肪氧化可以形成肉类的典型风味,而过度的脂肪氧化会导致酸败而对食品的风味产不良影响。

2.8 裙边发酵液感官分析

对发酵前、后的 5 组样品进行感官评分,包括鲜味、肉味、酸味、油脂味、甜味、腥味、腐臭味和整体喜爱度。发酵后各组样品的腥味下降,这是微生物代谢的结果。发酵后各组样品酸味增加,这与微生物代谢产生的挥发性酸类物质有关。FCC2181 和 F29-3-5 组的甜味增加,是由于与酵母代谢生成的醇类物质和酯类物质。接种马克斯克鲁维酵母 FCC2181 的批次的整体接受度显著高于其它

表6 接种不同发酵菌种对蒸煮液的游离脂肪酸组成的影响

Table 6 Effects of inoculating different fermentation strains on free fatty acid composition of cooking liquid

组别	游离脂肪酸含量/(mg/100 mL)				
	CN	Lp-4	Y5-2b	FCC2181	F29-3-5
肉豆蔻酸	1.31 ± 0.05 ^a	0.46 ± 0.07 ^e	0.94 ± 0.04 ^b	0.74 ± 0.02 ^d	0.84 ± 0.01 ^c
十五烷酸	0.46 ± 0.01 ^a	0.18 ± 0.01 ^d	0.36 ± 0.01 ^b	—	0.33 ± 0.02 ^c
棕榈酸	19.38 ± 0.83	18.47 ± 0.59	18.80 ± 0.56	19.34 ± 0.98	19.79 ± 0.98
棕榈油酸	1.38 ± 0.04 ^a	0.47 ± 0.16 ^c	1.11 ± 0.47 ^{ab}	0.63 ± 0.06 ^c	0.91 ± 0.16 ^{bc}
十七烷酸	0.51 ± 0.01 ^a	0.22 ± 0.02 ^b	0.54 ± 0.01 ^a	0.21 ± 0.18 ^b	0.44 ± 0.02 ^a
银杏酸	0.42 ± 0.01 ^a	—	0.30 ± 0.04 ^b	0.25 ± 0.02 ^c	0.26 ± 0.01 ^c
硬脂酸	18.05 ± 0.54 ^a	13.98 ± 0.4 ^d	16.98 ± 0.28 ^b	14.85 ± 0.01 ^c	14.83 ± 0.52 ^c
油酸	2.47 ± 0.11 ^b	1.44 ± 0.02 ^d	2.98 ± 0.11 ^a	2.06 ± 0.01 ^c	2.56 ± 0.01 ^b
亚油酸	2.03 ± 0.03 ^c	1.20 ± 0.01 ^c	2.74 ± 0.26 ^a	1.60 ± 0.01 ^d	2.39 ± 0.01 ^b
亚麻酸	0.64 ± 0.02 ^b	—	0.62 ± 0.03 ^b	0.54 ± 0.03 ^b	1.21 ± 0.44 ^a
二十碳烯酸	0.58 ± 0.05 ^a	0.16 ± 0.14 ^b	0.59 ± 0.02 ^a	—	0.50 ± 0.04 ^a
二十二碳一烯酸	3.15 ± 0.04 ^a	1.58 ± 0.04 ^d	2.88 ± 0.01 ^b	1.30 ± 0.05 ^e	2.41 ± 0.03 ^c
二十碳四烯酸	—	0.23 ± 0.01 ^a	—	—	—
二十碳五烯酸	5.89 ± 0.25 ^a	3.10 ± 0.09 ^c	5.49 ± 0.17 ^a	2.15 ± 0.3 ^d	4.43 ± 0.34 ^b
二十二碳六烯酸	9.01 ± 0.12 ^a	4.85 ± 0.01 ^c	4.28 ± 0.13 ^d	5.68 ± 0.61 ^b	4.64 ± 0.06 ^{cd}
总量	65.27 ± 1.57 ^a	46.32 ± 0.60 ^e	58.61 ± 0.29 ^b	49.35 ± 0.88 ^d	55.56 ± 1.23 ^c

注:不同字母代表样品间的显著性差异($P<0.05$),“—”表示未检出。

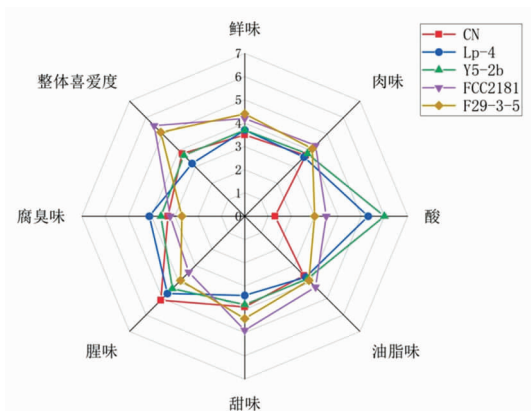


图9 发酵前、后蒸煮液的感官评分

Fig.9 Sensory evaluation of cooking liquor before and after fermentation

组,其次是接种克鲁维毕赤酵母 F29-3-5 的批次,接种植物乳杆菌植物亚种 Lp-组整体接受度最低,可能是因为它发生了最强烈的氧化作用。感官评分的结果与挥发性风味物质的结果相对应。

3 结论

本文使用植物乳杆菌亚种植物亚种 Lp-4、干酪乳杆菌 Y5-2b、马克思克鲁维酵母 FCC2181、克

鲁维毕赤酵母 F29-3-5 做为发酵菌种改善扇贝裙边蒸煮液的风味品质,发酵后的样品中检测出了更高浓度的风味物质。其中,接种马克思克鲁维酵母 FCC2181 的样品风味物质含量最高;接种植物乳杆菌亚种植物亚种 Lp-4 的样品风味物质含量最少;接种马克思克鲁维酵母 FCC2181、克鲁维毕赤酵母 F29-3-5 的 2 个样品较其它组相比产生了更多的醇类;而接种植物乳杆菌亚种植物亚种 Lp-4 的样品和接种干酪乳杆菌 Y5-2b 的样品产生了更多的酸类物质;接种 4 个菌种的样品中都检测到了比对照组更多的酯类物质。Y5-2 组和 Lp-4 组因具有不同的抗氧化能力而形成了游离脂肪酸含量差异和风味成分的差异。壬醛、己醛、庚醛和辛醛,这些源于不饱和脂肪酸氧化的脂肪族醛类,在 Lp-4 组中具有较高的含量,而在 Y5-2b 组含量较低。另外,FCC2181 组的游离氨基酸含量最高,其风味物质总量最高,且生成了最多含量的酯类物质。本研究结果表明,乳酸菌发酵赋予海湾扇贝裙边较多酸类风味物质,酵母菌发酵赋予较多醇类物质,为扇贝裙边调味料产品开发奠定了理论基础。

参 考 文 献

- [1] 胡婧, 欧阳海鹰, 孙英泽, 等. 中国与日本扇贝养殖差异性分析[J]. 世界农业, 2016(6): 115-120.
HU J, OUYANG H Y, SUN Y Z, et al. China and Japan have differences in scallop aquaculture practices[J]. World Agriculture, 2016(6): 115-120.
- [2] 徐晓莹, 胡丽萍, 贺加贝, 等. 海湾扇贝形态性状对质量性状的影响效应分析[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(4): 73-78.
XU X Y, HU L P, HE J B, et al. Effects of morphometric traits of *Argopecten irradians* on its quality traits[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(4): 73-78.
- [3] 李丹阳, 李宇辉, 高云云, 等. 新疆哈萨克族风干肉中产蛋白酶乳酸菌的筛选及酶学特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 57-63.
LI D Y, LI Y H, GAO Y Y, et al. Screening of protease-producing lactic acid bacteria from Xinjiang Kazakh air-driedmeat and their enzymatic characteristics[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9): 57-63.
- [4] GHIASI F, HASHEMI S M B, ABEDI E. Effective enhancement of food oxidative stability induced by *Lactobacillus* strains: *In vitro* activity[J]. Food Control, 2023, 153: 109912.
- [5] XIAO N Y, XU H Y, HU Y, et al. Unraveling the microbial succession during the natural fermentation of grass carp and their correlation with volatile flavor formation[J]. Food Research International, 2023, 165: 112556.
- [6] XU H Y, XIAO N Y, XU J N, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* and flavourzyme on physicochemical and safety properties of grass carp during fermentation[J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100392.
- [7] 梁进欣, 陈晓红, 李珊, 等. 植物乳杆菌亚种对干腌马鲛鱼降盐增鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 174-180.
LIANG J X, CHEN X H, LI S, et al. Salt-reducing and umami-enhancing effect of *Lactobacillus plantarum* on dry cured mackerel[J]. Food Science, 2022, 43(6): 174-180.
- [8] MEI L, PAN D M, GUO T T, et al. Role of *Lactobacillus plantarum* with antioxidation properties on Chinese sausages[J]. LWT, 2022, 162: 113427.
- [9] 陈正荣, 蒋欣容, 桑健, 等. 干酪乳杆菌发酵鱼糜工艺条件的研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(8): 116-119.
CHEN Z R, JIANG X R, SANG J, et al. Process conditions in fermented fish minces inoculated with *Lactobacillus casei* [J]. Food Research and Development, 2016, 37(8): 116-119.
- [10] RASHID N Y A, MANAN M A, PA'EE K F, et al. Evaluation of antioxidant and antibacterial activities of fish protein hydrolysate produced from Malaysian fish sausage (Keropok Lekor) by-products by indigenous *Lactobacillus casei* fermentation [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 347: 131303.
- [11] ZHANG Q H, SHEN J L, MENG G G, et al. Selection of yeast strains in naturally fermented cured meat as promising starter cultures for fermented cured beef, a traditional fermented meat product of northern China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 104(2): 883-891.
- [12] GAO P, XIA W S, LI X Z, et al. Use of wine and dairy yeasts as single starter cultures for flavor compound modification in fish sauce fermentation[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 2300.
- [13] LI X Z, LEE P R, TANIASURI F, et al. Effects of yeast fermentation on transforming the volatile compounds of unsalted pork hydrolysate[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(5): 2291-2303.
- [14] ZHOU Y Q, WU S M, PENG Y L, et al. Effect of lactic acid bacteria on mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) seasoning quality and flavor during fermentation[J]. Food Bioscience, 2021, 41: 100971.
- [15] LI W Y, MI S, LIU X C, et al. Variations in the physicochemical properties and bacterial community composition during fermentation of low-salt shrimp paste[J]. Food Research International, 2022, 154: 111034.
- [16] GAO P, LI L, XIA W S, et al. Valorization of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fish head for a novel fish sauce by fermentation with selected lactic acid bacteria[J]. LWT, 2020, 129: 109539.
- [17] 姜娇, 史学容, 柴梦森, 等. 优选本土乳酸菌-酵母接种时序对模拟红葡萄酒汁混菌发酵特性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 114-124.

- JIANG J, SHI X R, CHAI M M, et al. Effects of inoculating timing of selected indigenous lactic acid bacteria and yeast on fermentation in red synthetic grape juice medium[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 114-124.
- [18] 张彩凤. 发酵法制作扇贝裙边海鲜酱油的工艺研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2019.
- ZHANG C F. Research on the fermentation process of scallop skirt seafood sauce[D]. Yantai: Yantai University, 2019.
- [19] 曹晓玉, 王绪晶. 乳酸菌饮料活菌数符合度鉴定及温度对乳酸菌的影响[J]. 食品安全导刊, 2023(12): 78-80, 86.
- CAO X Y, WANG X J. Identification of conformity degree of *Lactobacillus* viable count in beverage and the effects of temperature on it[J]. China Food Safety Magazine, 2023(12): 78-80, 86.
- [20] 贺莹, 刘恩悦, 庞晓婷, 等. 姜黄素/壳聚糖可食性复合膜对鲈鱼片保鲜效果的研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(5): 83-91.
- HE Y, LIU E Y, PANG X T, et al. Effects of curcumin/chitosan edible composite film on the preservation of bass slices[J]. Printing and Digital Media Technology Study, 2023(5): 83-91.
- [21] WANG Y Y, TIAN G F, MAO K M, et al. Effects of four cooking methods on flavor and sensory characteristics of scallop muscle[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1022156.
- [22] 刘成模, 杨曦, 莫彩娜, 等. 高效液相色谱法检测饲料中6种游离氨基酸[J]. 中国饲料, 2022(3): 99-102.
- LIU C M, YANG X, MO C N, et al. High performance liquid chromatography method for determination of six free amino acids in feed[J]. China Feed, 2022(3): 99-102.
- [23] 韦友兵, 吴香, 周辉, 等. 萨拉米香肠发酵成熟过程中蛋白质水解及脂质氧化规律[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 67-73.
- WEI Y B, WU X, ZHOU H, et al. Protein hydrolysis and lipid oxidation during salami fermentation and ripening[J]. Food Science, 2019, 40(20): 67-73.
- [24] YE Z, SHANG Z X, ZHANG S Y, et al. Dynamic analysis of flavor properties and microbial communities in Chinese pickled chili pepper (*Capsicum frutescens* L.): A typical industrial-scale natural fermentation process[J]. Food Research International, 2022, 153: 110952.
- [25] 戴志伟, 孔令明, 刘伟, 等. 西梅发酵乳酸菌的筛选、鉴定及其抗氧化特性研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(7): 310-318.
- DAI Z W, KONG L M, LIU W, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria fermenting prunes and studies on their antioxidant properties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(7): 310-318.
- [26] CHEN Q, LIU Q, SUN Q X, et al. Flavour formation from hydrolysis of pork sarcoplasmic protein extract by a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2015, 100: 110-117.
- [27] 臧金红. 酸鱼发酵过程中特征风味形成与微生物的关系研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- ZANG J H. Study on the relationship between characteristic flavors formation and microorganisms in Suanyu fermentation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [28] LI Y X, CAO Z X, YU Z H, et al. Effect of inoculating mixed starter cultures of *Lactobacillus* and *Staphylococcus* on bacterial communities and volatile flavor in fermented sausages[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 200-211.
- [29] HU Y Y, LI Y J, LI X A, et al. Application of lactic acid bacteria for improving the quality of reduced-salt dry fermented sausage: Texture, color, and flavor profiles[J]. LWT, 2022, 154: 112723.
- [30] CARTUS A T, LACHENMEIER D W, GUTH S, et al. Acetaldehyde as a food flavoring substance: Aspects of risk assessment[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2023, 67(23): 2200661.
- [31] XIE H, GAO P Y, LU Z M, et al. Changes in physicochemical characteristics and metabolites in the fermentation of goji juice by *Lactiplantibacillus plantarum*[J]. Food Bioscience, 2023, 54: 102881.
- [32] XIANG Q, XIA Y X, CHEN L, et al. Flavor precursors and flavor compounds in Cheddar-flavored enzyme-modified cheese due to pre-enzymolysis combined with lactic acid bacteria fermentation[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102698.
- [33] YANG P, ZHONG G X, YANG J C, et al. Metagenomic and metabolomic profiling reveals the correlation between the microbiota and flavor com-

- pounds and nutrients in fermented sausages[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131645.
- [34] MOUTINHO S, OLIVA-TELES A, PULIDO-RODRÍGUEZ L, et al. Effects of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae oil on fillet quality and nutritional traits of gilthead seabream[J]. Aquaculture, 2024, 579: 740219.
- [35] CHEN Q, KONG B H, HAN Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development[J]. LWT, 2017, 77: 389–396.
- [36] TATIYABORWORNTHAM N, OZ F, RICHARDS M P, et al. Paradoxical effects of lipolysis on the lipid oxidation in meat and meat products[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100317.
- [37] 王东. 发酵处理对兔肉酱营养与品质的影响[J]. 中国调味品, 2017, 42(11): 57–62.
- WANG D. Effect of fermentation treatment on nutrition and quality of rabbit meat sauce [J]. China Condiment, 2017, 42(11): 57–62.

Effects of Different Strains of Bacteria on the Quality and Flavor of Rgopecten Skirted Fermentation Liquid

ZHAO Jinrong, WANG Yueyao, SANG Yaxin, GAO Jie*

(College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei)

Abstract To enhance the quality and flavor of the byproduct skirt of *Argopecten irradians*, *Lactobacillus plantarum* subsp. *Plantarum* Lp-4 (Lp-4 group), *Lactobacillus casei* Y5-2b (Y5-2b group), *Kluyveromyces marxianus* FCC2181 (FCC2181 group), and *Pichia kluyveri* F29-3-5 (F29-3-5 group) were used to carry out single-organism fermentation of irradians skirts, determined the changes of flavor substances in the fermentation broths of the inoculation of different fermentation strains, and analyzed the effects of free amino acids and free fatty acids as flavor precursors on the flavor substances in the context of the changes of flavor substances and the antioxidant capacity of the strains. The results showed that both lactic acid bacteria and yeast strains grew well during the fermentation process of the scallop skirt cooking liquid. The pH value of the fermentation liquid decreased significantly, and the fermentation promoted the formation of the skirt fermentation liquid flavor. Specifically, the viable cell counts of the Lp-4 group, Y5-2b group, FCC2181 group, and F29-3-5 group increased from 7.04, 6.99, 5.93, 6.07 lg (CFU/mL) to 8.49, 8.17, 8.01, 8.18 lg (CFU/mL), respectively. After 36 hours of fermentation, the Y5-2b group had the lowest pH of 3.33, while the FCC2181 group had the highest pH of 5.52. The FCC2181 group had the highest content of flavor compounds, while the Lp-4 group had the least. Compared to other groups, the FCC2181 and F29-3-5 groups produced more alcohols, while the Lp-4 and Y5-2b groups produced more acids. The fermentation groups had more esters than the control group, and aldehydes were relatively high in all groups. At 36 hours of fermentation, the Y5-2b group had the lowest thiobarbituric acid value of 0.27 mg MDA/kg, corresponding to a lower content of free fatty acids, indicating a smaller degree of oxidation. In summary, fermenting the bay scallop skirt with the four different strains resulted in good flavor and quality. Lactic acid bacteria fermentation yielded acidity, while yeast fermentation accumulated more alcohol flavor compounds. The results of this study provide a scientific basis for further optimization of fermentation strains for scallop skirt.

Keywords irradians skirts; fermentate; free fatty acid; lipid oxidation; fermentation strains