

发酵过程中乌鳢鱼糜的品质特征变化

李松林¹, 钱心睿¹, 张艺彤¹, 马海清²

(1.淮阴工学院生命科学与食品工程学院, 江苏 淮安 223003; 2.淮安市产业投资有限公司, 江苏 淮安 223001)

摘要:与自然发酵组作对比,以pH值、总酸、挥发性盐基氮、脂肪酸、色差、质构特性、氨基酸和感官评分为评价指标,分析接种戊糖片球菌对乌鳢鱼糜发酵过程中品质特征的影响。结果表明,与pH值下降的趋势相反,总酸含量逐渐升高,且接种发酵组在发酵48 h后比自然发酵组增加了52.29%。与自然发酵组相比,接种发酵组总挥发性盐基氮值的增加受到显著抑制。饱和脂肪酸含量在自然发酵组中增加,而在接种发酵组中降低。与单不饱和脂肪酸含量呈减少的趋势不同,接种发酵组多不饱和脂肪酸含量在发酵完成后高于自然发酵组。接种发酵组具有更高的 L^* 值,且硬度和附着性的绝对值高于自然发酵组。接种发酵提高了鱼糜总必需氨基酸和鲜味氨基酸含量,必需氨基酸指数从73.9提高到74.8。发酵48 h后,接种发酵组的气味、色泽和总体接受度评分高于自然发酵组,且与品质特征显著相关。综上,采用戊糖片球菌发酵可以更好地提升乌鳢鱼糜的品质。

关键词:乌鳢; 鱼糜; 戊糖片球菌; 发酵; 品质

Changes in Quality Characteristics of Snakehead Surimi during Fermentation

LI Songlin¹, QIAN Xinrui¹, ZHANG Yitong¹, MA Haiqing²

(1. Faculty of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China;

2. Huai'an Industry Investment Co. Ltd., Huai'an 223001, China)

Abstract: In this study, the effects of *Pediococcus pentosaceus* inoculation on the quality characteristics of snakehead surimi during fermentation were analyzed in comparison with natural fermentation. The quality of fermented surimi was evaluated in terms of pH, total acid, total volatile basic nitrogen (TVB-N), fatty acids, color difference, texture, amino acids and sensory scores. The results showed that pH declined and total acid content gradually increased during fermentation. After fermentation for 48 h, total acid content in the inoculated fermentation group increased by 52.29% when compared with that in the natural fermentation group. Compared with the natural fermentation group, the increase in TVB-N content was significantly inhibited in the inoculated fermentation group. The content of saturated fatty acids increased during natural fermentation, but decreased during inoculated fermentation. The content of monounsaturated fatty acids was lower while the content of polyunsaturated fatty acids was higher in the inoculated fermentation group than in the natural fermentation group at the end of fermentation. The inoculated fermentation group showed an increase in L^* value and the absolute values of hardness and adhesiveness, and increased the contents of total essential amino acids and umami amino acids in surimi samples and the essential amino acid index from 73.9 to 74.8. After fermentation for 48 h, the scores for odor, color and overall acceptability in the inoculated fermentation group were higher than those in the natural fermentation group, which were significantly correlated with quality characteristics. Therefore, the quality of snakehead surimi can be better improved by fermentation with *P. pentosaceus*.

Keywords: snakehead; surimi; *Pediococcus pentosaceus*; fermentation; quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230329-299

中图分类号: TS201.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2024)02-0203-08

引文格式:

李松林, 钱心睿, 张艺彤, 等. 发酵过程中乌鳢鱼糜的品质特征变化[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 203-210. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230329-299. <http://www.spkx.net.cn>

LI Songlin, QIAN Xinrui, ZHANG Yitong, et al. Changes in quality characteristics of snakehead surimi during fermentation[J]. Food Science, 2024, 45(2): 203-210. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230329-299. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2023-03-29

基金项目: 淮安市自然科学研究计划项目(HAB201945)

第一作者简介: 李松林(1982—)(ORCID: 0009-0005-9877-5174), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品生物技术。

E-mail: lisonglin@hyit.edu.cn

乌鳢 (*Channa argus*) 是蛇头鱼科的主要品种, 因其蛋白质和多不饱和脂肪酸含量高、脂肪含量低以及价格相对便宜而受到关注, 在我国是重要的淡水养殖鱼类, 年产量超过50万 t^[1-2]。目前乌鳢加工方式较为简单, 且产品类型较少, 主要以冷冻鱼片作为出口水产品^[3]。因此, 开展乌鳢精深加工, 对更好地利用乌鳢资源以及提高其产品经济价值具有重要意义。

鱼糜是一种深受世界各地消费者喜爱的高蛋白、低脂肪的健康食品, 将鱼肉加工成鱼糜, 可以丰富产品的多样性, 增加其附加值^[4]。目前对于乌鳢鱼糜的研究主要集中于鱼糜的品质研究。吴丰芮^[5]研究了当归、党参和山药的添加对乌鳢鱼糜质构特性和感官评价的影响。米红波等^[6]对乌鳢鱼糜与其他淡水鱼的营养特性和品质差异进行了分析比较。俞启^[7]建立了乌鳢鱼糜制品品质的快速检测方法, 对近红外光谱技术应用于鱼糜制品原料的质量控制进行了探究。微生物发酵技术被广泛应用于食品加工中, 鱼糜的风味、质地、色泽等品质属性在经过发酵后会发生变化。传统发酵鱼制品主要依靠自然界和原料自身携带的微生物在适宜温湿度条件下发酵而成, 存在发酵时间长、产品质量不稳定等缺点^[8]。而接种发酵剂进行发酵是提升发酵鱼制品品质的一种有效途径, 可以缩短发酵过程, 提升营养、质地和风味品质^[9]。益生菌尤其是片球菌属被广泛应用于生产淡水鱼糜。Xu Yanshun等^[10]采用戊糖片球菌发酵鲢鱼鱼糜48 h后, 可形成致密的凝胶网络, 增强了凝胶强度, 提升了质构品质。Li Chunsheng等^[11]发现戊糖片球菌发酵改善了鱼糜的凝胶强度和硬度等物理特性, 同时显著提高了鲜味和甜味游离氨基酸含量。此外, Nie Xiaohua等^[12]采用戊糖假单胞菌GY23发酵草鱼香肠, 发现接种菌株在发酵过程中可以快速降解蛋白质, 显著增加了与风味形成相关的游离氨基酸浓度。虽然微生物发酵技术在鱼糜加工中得到了广泛的研究与应用, 但对于采用微生物发酵剂接种发酵乌鳢鱼糜提升其品质的研究鲜见报道。

因此, 本研究采用戊糖片球菌发酵乌鳢鱼糜, 以自然发酵鱼糜为对照, 以pH值、总酸、总挥发性盐基氮 (total volatile basic nitrogen, TVB-N) 值、色差、质构特性、游离氨基酸、总氨基酸、脂肪酸和感官评价为主要指标, 研究发酵过程中鱼糜的品质变化情况, 以期为人工接种发酵剂进行乌鳢鱼糜加工提供理论依据和支撑。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

乌鳢、食盐和葡萄糖 (食品级) 购于本地超市。

戊糖片球菌 中国工业微生物菌种保藏管理中心; MRS培养基 上海弘顺生物科技有限公司; 沃特曼4号滤纸 英国Whatman公司; 氯仿、甲醇 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

TA-XT物性测试仪 英国Stable Micro Systems公司; SP907R料理机 浙江绍兴苏泊尔生活电器有限公司; 5810R冷冻高速离心机 德国艾本德股份有限公司; BG-160隔水式培养箱 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; PHS-2F型pH计 上海仪电科学仪器股份有限公司; MiniScan EZ4000L色差仪 美国HunterLab公司; L-8800氨基酸分析仪 日本日立公司; 6890-5973型气相色谱-质谱联用仪、HP-88毛细管柱 美国安捷伦公司。

1.3 方法

1.3.1 乌鳢发酵鱼糜的制备

戊糖片球菌在MRS培养基中以30 ℃培养24 h, 进行2次传代, 随后4 ℃、10 000 r/min离心15 min收集菌体, 用无菌生理盐水稀释成 $10^8 \sim 10^9$ CFU/mL的菌悬液, 用于鱼糜接种。乌鳢去除鳞片、头、刺和内脏后, 将鱼肉切片, 使用无菌水清洗3次后搅成肉糜。以原料鱼糜质量为基准加入质量分数2%食盐和1%葡萄糖, 随后混合均匀。最后, 将适量的菌悬液接种至鱼糜中, 使其最终浓度为7 (lg (CFU/g))。将接种后的鱼糜灌入直径32 mm塑料肠衣中, 35 ℃发酵48 h, 每12 h取非熟化鱼糜制品进行分析检测。

1.3.2 pH值、总酸和TVB-N值的测定

取鱼糜制品 (5.0 g) 加入50 mL蒸馏水研磨均质后, 采用pH计测定pH值; 总酸的测定方法参考GB 12456—2021《食品中总酸的测定》^[13]; TVB-N值的测定方法参考GB 5009.228—2016《食品中挥发性盐基氮的测定》^[14]。

1.3.3 色差的测定

将鱼糜制品切成块状 (20 mm×20 mm×15 mm), 采用色差仪测定 L^* (亮度值)、 a^* (红/绿值) 和 b^* (黄/蓝值)。

1.3.4 质构特性的测定

将半固态的鱼糜制品切成块状 (20 mm×20 mm×15 mm), 采用带P/5探头的物性测试仪测定硬度、附着性、弹性和内聚性。测试速率和触发力分别为0.7 mm/s和0.2 N, 两次压缩过程的时间间隔为5 s, 实验样本平行测定6次。

1.3.5 游离氨基酸和总氨基酸的测定

在鱼糜样品 (5.0 g) 中加入45 mL蒸馏水进行研磨均质, 随后在4 ℃、10 000 r/min离心10 min获得上清液。上清液经过0.22 μm过滤膜过滤后, 采用氨基酸分析仪测定游离氨基酸。另取5.0 g鱼糜样品与10 mL盐酸溶液 (6 mol/L) 混合后置于水解管中, 110 ℃水解22 h。随后将冷却至室温的水解液过滤至容量瓶中, 定容至50 mL。取1.0 mL滤液于10 mL试管中进行干燥, 随后加入柠檬酸

钠缓冲溶液 (pH 2.2), 经过0.22 μm过滤膜过滤后, 采用氨基酸分析仪测定总氨基酸。

1.3.6 蛋白质质量评价

化学评分和必需氨基酸指数按照参考文献[15]的方法进行计算, 分别如式(1)、(2)所示:

$$\text{化学评分} = \frac{\text{样本必需氨基酸含量}}{\text{推荐必需氨基酸含量}} \quad (1)$$

$$\text{必需氨基酸指数} = \sqrt[n]{\frac{\text{赖氨酸}^s \times \text{亮氨酸}^s \times \dots \times \text{组氨酸}^s}{\text{赖氨酸}^r \times \text{亮氨酸}^r \times \dots \times \text{组氨酸}^r}} \quad (2)$$

式中: s 为实验样本中的氨基酸含量; r 为1~2岁儿童的必需氨基酸需求量; n 为氨基酸数量(取苯丙氨酸+酪氨酸、甲硫氨酸+半胱氨酸为1)。

1.3.7 脂肪酸的测定

将研磨后鱼糜制品(20.0 g)与氯仿-甲醇(50 mL, 2:1, V/V)的混合物以11 000 r/min均质60 s, 随后继续加入25 mL氯仿, 以相同速率均质30 s, 通过沃特曼4号滤纸进行过滤。氯仿相使用旋转蒸发器在30 °C进行蒸发, 并使用氮气吹干去除残留溶剂。采用气相色谱法测定鱼糜制品中的游离脂肪酸^[16]。色谱柱: HP-88毛细管柱(100 m×0.25 mm, 0.20 μm); 升温程序: 初温60 °C, 保持2 min, 以28 °C/min的速率增加到180 °C, 然后以2 °C/min的速率增加到248 °C, 保持10 min; 进样口和检测温度分别设置为250 °C和300 °C。

1.3.8 感官评价

发酵鱼糜制品的色泽、组织状态、气味和总体接受度由5名男生和5名女生组成的感官鉴评小组采用九点快感标度法进行感官评定^[17]。

1.4 数据处理

除质构特性测定外, 实验样本平行测量3次, 采用Origin 2021和GraphPad软件进行显著性差异分析与作图。采用R软件(4.2.2版), 通过dplyr、linkET和ggplot2软件包进行Mantel检验, 分析感官特征与品质指标之间的相关性, 并使用qcorrplot指令进行绘图。

2 结果与分析

2.1 发酵过程中鱼糜pH值和总酸的变化

如图1所示, 鱼糜在发酵过程中pH值逐渐下降, 发酵48 h后, 接种发酵组pH值从6.40降至4.97。与pH值下降的趋势相反, 总酸含量随发酵时间的延长而上升, 发酵完成时接种发酵组的总酸含量比自然发酵组增加了52.29%。自然发酵组pH值的下降可能是由于鱼死后内源酶或自身携带的微生物酶的作用引起三磷酸和糖原分解, 导致乳酸、磷酸和其他酸含量的增加^[18-19]。接种发酵组在发酵过程中, 由于戊糖片球菌能够有效分解碳水化合物而产生酸类物质, 从而进一步快速降低pH值^[20]。

李培瑜等^[21]在探究鲮鱼糜发酵过程中理化特性的变化规律时, 同样发现由于戊糖片球菌的生长繁殖而产生大量有机酸, 导致pH值在发酵36 h后大幅降低。低pH值在对食品感官评价产生影响的同时, 形成的酸化环境会对致病菌和碱性腐败菌的生长进行抑制, 从而提升食品安全性^[22]。

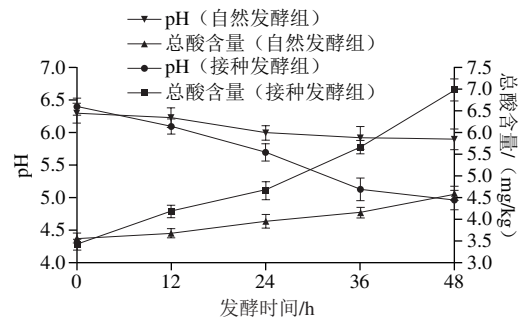


图1 发酵过程中鱼糜pH值和总酸含量的变化

Fig. 1 Changes in pH and total acid content of surimi samples during fermentation

2.2 发酵过程中鱼糜TVB-N值的变化

鱼肉中的TVB-N值反映了酶和微生物对蛋白质进行分解而产生氨和碱性含氮物质的作用程度, 是肉制品新鲜度重要的评价指标之一^[23]。随着发酵时间的延长, 自然发酵组和接种发酵组的TVB-N值均呈增加趋势(图2)。虽然两组样品在发酵48 h后的TVB-N值未超过GB 10136—2015规定的上限值(30 mg/100 g)^[24], 但是自然发酵组比接种发酵组增加了14.61%, 接种发酵组的TVB-N值增长速率受到显著抑制。Zhang Yulong等^[22]同样发现使用戊糖片球菌发酵可以延缓肉制品中TVB-N值的增加, 进一步提升肉类产品的新鲜度。戊糖片球菌在发酵过程中产生的乳酸可以中和肉制品中的挥发性碱性氮, 从而减少TVB-N的积累^[25-26]。

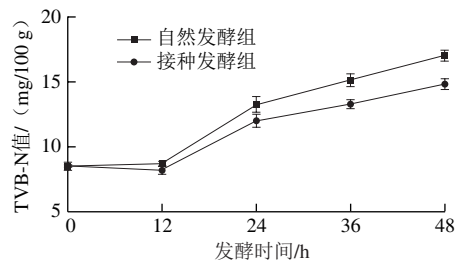


图2 发酵过程中鱼糜TVB-N值的变化

Fig. 2 Changes in TVB-N content of surimi samples during fermentation

2.3 发酵过程中鱼糜的色差变化

色差参数反映了肉制品的光学特性, 鱼糜发酵过程中的 L^* 、 a^* 和 b^* 值的变化如图3所示。发酵鱼糜的 L^* 值呈现增加趋势, 发酵48 h后, 接种发酵组 L^* 值显著高于自然发酵组。这是由于在戊糖片球菌发酵过程中, 随着总酸含量的增加, 鱼糜及其蛋白凝胶的pH值下降, 在酸性

条件下血红素蛋白发生变性并产生渗出物, 最终导致接种发酵组具有更高的 L^* 值^[27-28]。发酵过程中 a^* 值和 b^* 值同样增加, 但是在接种发酵组与自然发酵组之间均无显著区别。Zhao Changcheng等^[29]在鲷鱼肉发酵48 h后发现 a^* 值增加, 认为这与肌红蛋白的氧化和氧性肌红蛋白的形成有关。 b^* 值的增加则是磷脂头基中胺或蛋白质中胺发生脂质氧化造成的结果^[30]。

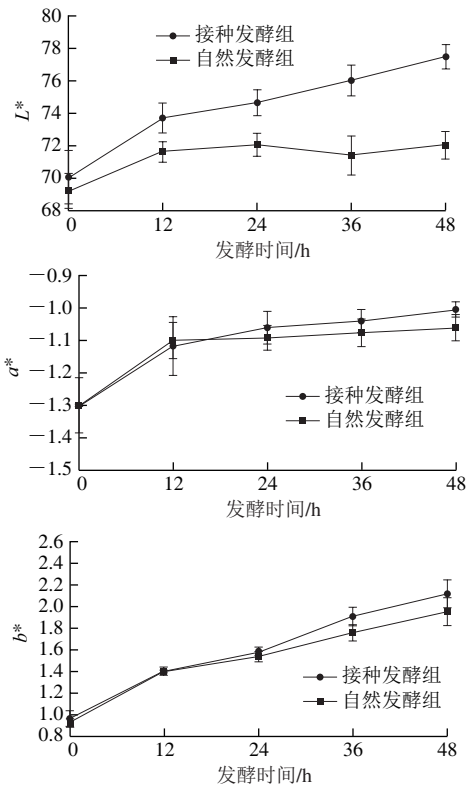


图3 发酵过程中鱼糜的色差变化

Fig. 3 Changes in color difference of surimi samples during fermentation

2.4 发酵过程中鱼糜的质构特性变化

如图4所示, 与自然发酵组的硬度在发酵过程中持续下降不同, 接种发酵组的硬度在前24 h增加, 这是由于接种发酵组中更高的总酸含量导致鱼糜蛋白产生酸诱导凝胶; 此外形成的低pH值环境导致蛋白质发生变性、肌原纤维收缩而引起硬度增加^[27,31]。在随后的24 h发酵过程中, 硬度的下降是由于内源性组织蛋白酶和微生物对蛋白质进行降解, 降低了肌肉间细胞结合力, 导致鱼糜肌肉结构松弛^[32-33]。但发酵结束时, 接种发酵组的硬度仍然高于自然发酵组。接种发酵组的附着性绝对值在发酵结束时同样高于自然发酵组。Zhou Xuxia等^[34]认为鱼糜附着性在发酵过程中持续增加的原因是由于鱼糜蛋白不断被水解以及其他大分子降解为小分子。发酵48 h后, 接种发酵组的弹性和内聚性比自然发酵组分别降低了14.46%和39.06%。这是由于接种微生物、内源蛋白酶和pH值降低等因素导致了肌蛋白质的水解而进一步降低产品的弹

性^[35]。由于鱼糜蛋白质在戊糖片球菌发酵过程中被大量水解, 破坏了蛋白质分子之间、蛋白质与脂肪之间的凝胶网络结构^[36], 最终导致接种发酵组的内聚性低于自然发酵组。

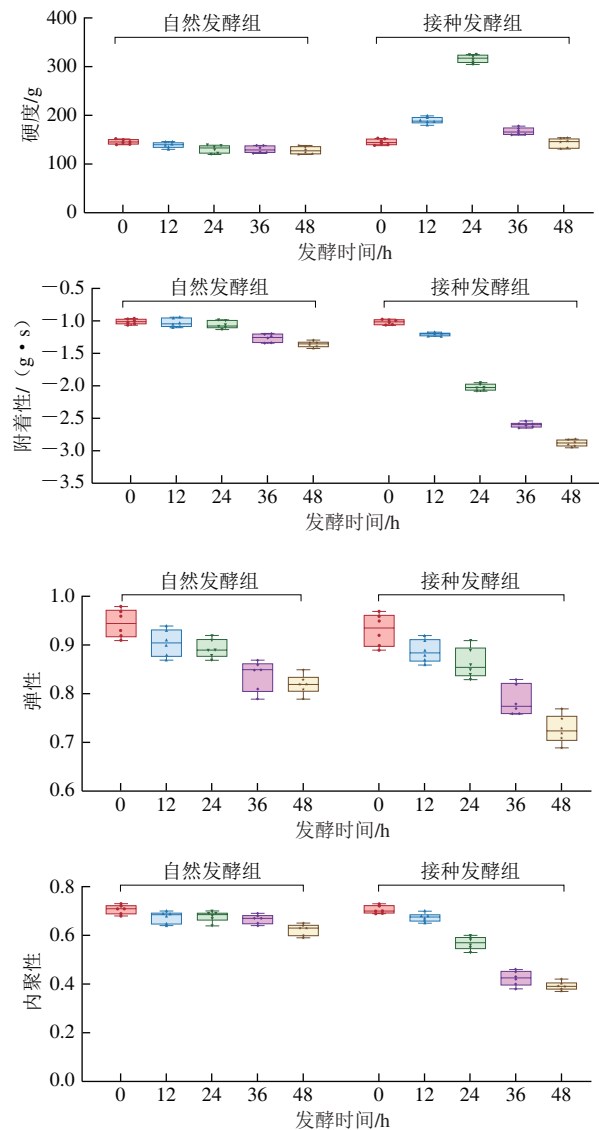


图4 发酵过程中鱼糜的质构特性变化

Fig. 4 Changes in texture property of surimi samples during fermentation

2.5 发酵过程中鱼糜的氨基酸变化

由表1可知, 总必需氨基酸质量分数在接种戊糖片球菌发酵后提高了1.28%, 且必需氨基酸中的苏氨酸、赖氨酸和异亮氨酸的含量显著提高 ($P < 0.05$)。游离氨基酸中的总必需氨基酸含量在接种发酵后同样显著增加, 其中赖氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸+酪氨酸、异亮氨酸、亮氨酸以及甲硫氨酸+半胱氨酸含量显著提高 ($P < 0.05$), 而色氨酸含量显著降低 ($P < 0.05$)。除丙氨酸、组氨酸和精氨酸含量未有显著变化, 游离氨基酸中的其余非必需氨基酸含量在接种发酵后增加

($P < 0.05$)。接种发酵对甜味氨基酸和苦味氨基酸含量没有显著影响,但是鲜味氨基酸含量显著增加($P < 0.05$)。肌肉蛋白质的初始分解主要是由于内源性蛋白酶的作用,随后微生物肽酶将蛋白质片段进一步降解为小肽和游离氨基酸,进而影响最终的质地和风味。Li Chunsheng等^[11]发现采用戊糖片球菌发酵30 h的罗非鱼肠的游离氨基酸含量达到最高值,此外鲜味氨基酸的浓度也显著提高。Nie Xiaohua等^[12]发现接种戊糖片球菌GY23的草鱼香肠中发生了由内源酶和微生物酶引起的蛋白质水解作用,其中微生物酶主要是参与小分子蛋白质和多肽的二次水解,此外由于戊糖片球菌GY23具有更多的外肽酶,可以从肌肉蛋白质和多肽的N-氨基端产生游离氨基酸。采用联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) 1~2岁儿童的必需氨基酸需求量作为参照进行评价^[37],与未发酵鱼糜相比,苏氨酸、赖氨酸和异亮氨酸的化学评分均显著提高($P < 0.05$)。此外,必需氨基酸指数从73.9提高到74.8,表明戊糖片球菌接种发酵可以有效提高鱼糜蛋白质的营养价值。

表1 接种发酵鱼糜总氨基酸和游离氨基酸组成

Table 1 Total and free amino acid composition of fermented surimi inoculated with *P. pentosaceus*

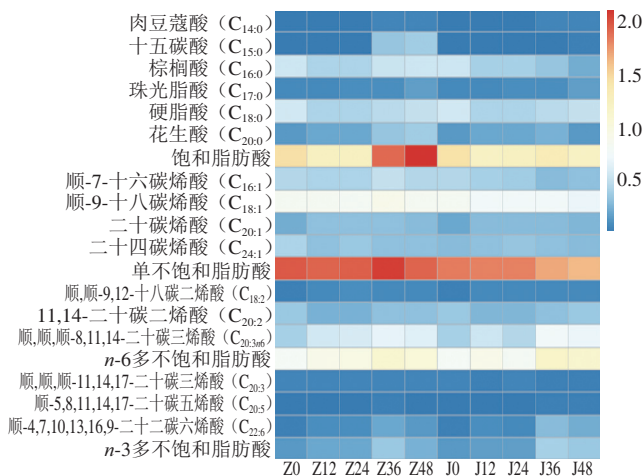
氨基酸	总氨基酸质量分数/%		FAO参照物	化学评分		游离氨基酸含量/(mg/100 g)	
	未发酵鱼糜	接种发酵鱼糜(48 h)		未发酵鱼糜	接种发酵鱼糜(48 h)	未发酵鱼糜	接种发酵鱼糜(48 h)
必需氨基酸							
苏氨酸 ^A	3.86±0.03 ^a	3.95±0.03 ^b	27	1.43±0.01 ^a	1.46±0.01 ^b	128.39±6.88 ^a	129.02±4.70 ^a
赖氨酸 ^A	6.76±0.03 ^a	6.90±0.06 ^b	52	1.30±0.01 ^a	1.33±0.01 ^b	45.45±0.98 ^a	62.49±2.10 ^b
缬氨酸 ^B	6.64±0.06 ^a	6.67±0.05 ^a	41	1.62±0.01 ^a	1.63±0.01 ^a	51.31±1.01 ^a	64.31±1.50 ^b
苯丙氨酸+酪氨酸 ^B	5.21±0.05 ^a	5.28±0.03 ^a	46	1.13±0.01 ^a	1.15±0.01 ^a	145.87±6.76 ^a	165.89±8.24 ^b
异亮氨酸 ^B	4.22±0.04 ^a	4.32±0.03 ^b	31	1.36±0.01 ^a	1.39±0.01 ^b	51.61±1.46 ^a	59.44±1.00 ^b
色氨酸 ^B	—	—	7	—	—	15.18±0.59 ^a	10.29±0.68 ^b
亮氨酸 ^B	6.36±0.04 ^a	6.40±0.02 ^a	63	1.01±0.01 ^a	1.02±0.00 ^a	171.31±5.28 ^a	187.01±6.08 ^b
甲硫氨酸+半胱氨酸 ^B	2.90±0.05 ^a	2.89±0.03 ^a	25	1.16±0.02 ^a	1.16±0.01 ^a	63.73±0.43 ^a	86.17±1.46 ^b
非必需氨基酸							
谷氨酸 ^C	9.77±0.05 ^a	9.88±0.07 ^a	—	—	—	9.58±0.31 ^a	41.70±1.83 ^b
天冬氨酸 ^C	9.59±0.18 ^a	11.00±0.25 ^b	—	—	—	35.44±0.76 ^a	110.20±3.94 ^b
脯氨酸 ^A	6.76±0.08 ^a	6.65±0.06 ^a	—	—	—	42.67±2.25 ^a	69.57±2.37 ^b
丙氨酸 ^A	4.75±0.03 ^b	4.65±0.06 ^a	—	—	—	82.01±1.40 ^a	80.71±1.91 ^a
丝氨酸 ^A	5.59±0.06 ^a	5.47±0.07 ^a	—	—	—	35.25±1.00 ^a	38.63±1.77 ^b
甘氨酸 ^A	5.26±0.10 ^a	5.36±0.06 ^a	—	—	—	63.99±0.43 ^a	77.00±2.06 ^b
组氨酸 ^B	2.81±0.05 ^a	2.74±0.04 ^a	—	—	—	86.43±0.99 ^a	85.33±4.48 ^a
精氨酸 ^B	9.60±0.06 ^a	9.62±0.05 ^a	—	—	—	93.33±2.06 ^a	93.90±3.94 ^a
鲜味氨基酸	19.35±0.20 ^a	20.88±0.29 ^b	—	—	—	—	—
甜味氨基酸	32.98±0.24 ^a	32.98±0.09 ^a	—	—	—	—	—
苦味氨基酸	37.75±0.18 ^a	37.93±0.11 ^a	—	—	—	—	—
总必需氨基酸	35.95±0.13 ^a	36.41±0.13 ^b	—	—	—	759.29±16.16 ^a	849.95±18.85 ^b

注: 相同指标同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$); —.未检出; A.甜味氨基酸; B.苦味氨基酸; C.鲜味氨基酸。

2.6 发酵过程中鱼糜的脂肪酸成分变化

对脂肪酸在接种发酵组和自然发酵组之间的差异使用热图进行分析(图5),颜色表示脂肪酸成分的相对丰

度。随着发酵时间的延长,饱和脂肪酸含量在自然发酵组中增加,而在接种发酵组中降低。与单不饱和脂肪酸在自然发酵组和接种发酵组中均呈降低趋势不同, $n-6$ 多不饱和脂肪酸和 $n-3$ 多不饱和脂肪酸含量在发酵过程中增加。多不饱和脂肪酸不仅是重要的营养物质,在生物系统中也具有广泛的生物学功能。 $n-6$ 多不饱和脂肪酸通过降低血脂表现出抗动脉粥样硬化作用, $n-3$ 多不饱和脂肪酸则可以抑制血小板的聚集而作为抗凝血剂,同时降低胆固醇和磷脂^[38]。脂肪氧化是导致肉制品和鱼糜贮藏过程中品质下降的主要原因^[39]。发酵完成时,接种发酵组多不饱和脂肪酸含量高于自然发酵组,这是由于戊糖片球菌在发酵过程中可以抑制不饱和脂肪酸的生物氢化或脂质过氧化而导致的降解^[40-41]。其中,对人体健康至关重要的二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸在发酵后含量增加,提高了发酵鱼糜的营养品质^[42-43]。发酵过程中的微生物代谢可以产生由异构酶和水解酶引起的脂肪酸相互转换,同时可以将多不饱和脂肪酸水解成其他低分子质量的脂肪酸,进而促进发酵产品中特征香气化合物和内酯的形成^[44]。上述结果表明,接种发酵对鱼糜脂肪酸组成有重要影响,在降低饱和脂肪酸含量的同时,增加了多不饱和脂肪酸含量,提升了营养价值。



Z.自然发酵; J.接种发酵。数字表示发酵时间(h)。

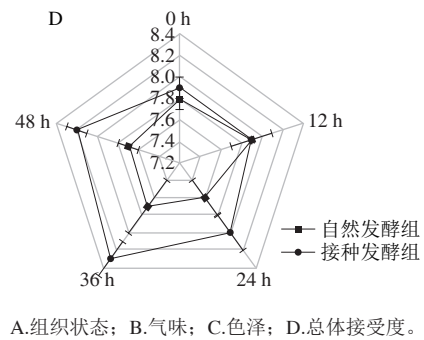
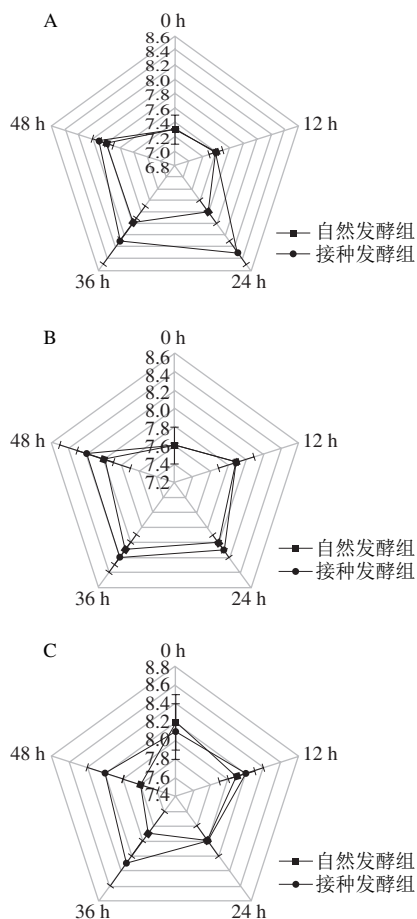
图5 鱼糜发酵过程中的脂肪酸成分变化热图

Fig. 5 Heatmap showing changes in fatty acid composition in surimi samples during fermentation

2.7 发酵鱼糜的感官评价与Mantel检验

通过对食品的组织状态、气味、色泽、总体接受度等感官特征进行评价,可以直观地反映评价者的接受程度和喜好。发酵开始时,接种发酵组的4种感官特征的评分均与自然发酵组无显著区别(图6)。发酵48 h后,接种发酵组的气味、色泽和总体接受度评分均高于自然发酵组,但是鱼糜组织状态评分在两组之间没有显著差别。图7中,对4项感官特征与17项品质指标进行了Pearson相关性分析和Mantel检验。用颜色梯度表示品质

指标的两两比较,蓝色表示正相关,红色表示负相关,颜色越深,相关性越强。此外,连接感官特征与品质指标的线颜色和宽度分别代表统计学显著性和Mantel检验的 r 统计量^[45]。Mantel检验结果表明,气味与 $n-3$ 多不饱和脂肪酸、 $n-6$ 多不饱和脂肪酸、pH值、TVB-N值和鲜味氨基酸之间存在明显的相关性($0.2 < r < 0.4$ 或者 $r \geq 0.4$, $P < 0.01$)。戊糖片球菌发酵过程中产生的活性酶对蛋白质和脂类物质进行水解,产生氨基酸、多肽、脂肪酸等风味前体物质,最终通过微生物碳水化合物代谢和非酶褐变反应形成其特有风味^[40,46]。此外,发酵产酸不仅使鱼糜具有独特的乳酸风味,同时可以掩盖或抑制鱼腥味。发酵过程中pH值与气味和色泽指标均具有明显的相关性(Mantel's $r \geq 0.4$, $P < 0.01$)。Pearson相关性分析表明 L^* 与 a^* 、 b^* 呈负相关关系,接种发酵虽然促进了 L^* 值的进一步提高,但是与 L^* 相比, a^* 、 b^* 与色泽和总体接受度具有更显著的相关性(Mantel's $r \geq 0.4$, $P < 0.01$)。硬度与附着性、弹性、内聚性具有正相关关系,然而与硬度指标相比,附着性、弹性、内聚性与总体接受度具有更加显著的相关性(Mantel's $r \geq 0.4$, $P < 0.01$)。综上所述,戊糖片球菌发酵鱼糜的理化性质与感官特征中的色泽、气味和总体接受度存在显著统计学相关性,接种发酵对鱼糜的感官品质有重要影响。



A. 组织状态; B. 气味; C. 色泽; D. 总体接受度。

图6 鱼糜发酵过程中的感官评分变化

Fig. 6 Changes in sensory scores of surimi samples during fermentation

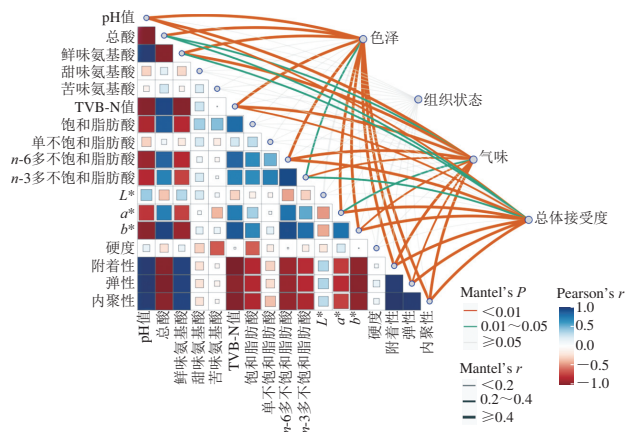


图7 感官特性与品质指标之间的Pearson相关性分析和Mantel检验

Fig. 7 Pearson correlation analysis and Mantel tests between organoleptic characteristics and quality indicators

3 结论

将戊糖片球菌接种到乌鳢鱼糜中,探究在35℃发酵时其对鱼糜品质特性的影响。接种发酵组的pH值显著下降,在总酸含量增加的同时,抑制了TVB-N的形成,进而提升了鱼糜的新鲜度。发酵可以提升鱼糜的亮度,Pearson相关性分析和Mantel检验表明感官指标中的色泽和总体接受度评分在接种发酵后的提高与 a^* 和 b^* 具有明显的相关性。接种发酵并未对组织状态评分产生显著影响,Mantel检验同样表明组织状态与品质指标均无显著相关性。戊糖片球菌发酵过程中对蛋白质进一步水解,提高了鱼糜蛋白质的营养价值。接种发酵提高了多不饱和脂肪酸含量,这对于风味的形成和气味指标评分的提高起到了促进作用。本研究可以为发酵乌鳢产品的开发和品质改善提供理论参考。

参考文献:

- [1] SUN L G, LV J X, LIU Y, et al. Effects of combined carnosine and ultra-high pressure on the inhibition of fishy off-odor of snakehead filets and the possible mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 395: 133615. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133615.

- [2] LIU W T, ZHANG Y Z, CUI N B, et al. Extraction and characterization of pepsin-solubilized collagen from snakehead (*Channa argus*) skin: effects of hydrogen peroxide pretreatments and pepsin hydrolysis strategies[J]. *Process Biochemistry*, 2019, 76: 194-202. DOI:10.1016/j.procbio.2018.10.017.
- [3] 张权, 王为, 吴思纷, 等. 黑鱼油精制过程中品质及风味成分变化[J]. *食品科学*, 2023, 44(12): 208-216. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220816-192.
- [4] YANG F J, JIANG W T, CHEN X, et al. Investigation on the quality regulating mechanism of antifreeze peptides on frozen surimi: from macro to micro[J]. *Food Research International*, 2023, 163: 112299. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131054.
- [5] 吴丰芮. 三种药膳食材对黑鱼鱼糜凝胶特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 1-2. DOI:10.27158/d.cnki.ghznu.2016.000129.
- [6] 米红波, 千春录, 傲特海, 等. 淡水鱼鱼糕加工适性和微冻特性的研究[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(3): 84-95. DOI:10.16429/j.1009-7848.2012.03.018.
- [7] 俞启. 基于近红外光谱技术建立鱼糜制品品质快速检测的方法[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2011: 1-3.
- [8] 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: 10.
- [9] LIU J G, LIN C X, ZHANG W, et al. Exploring the bacterial community for starters in traditional high-salt fermented Chinese fish (Suanyu)[J]. *Food Chemistry*, 2021, 35: 129863. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129863.
- [10] XU Y S, XIA W S, YANG F, et al. Protein molecular interactions involved in the gel network formation of fermented silver carp mince inoculated with *Pediococcus pentosaceus*[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120: 717-723. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.10.068.
- [11] LI C S, ZHAO Y, WANG Y Q, et al. Microbial community changes induced by *Pediococcus pentosaceus* improve the physicochemical properties and safety in fermented tilapia sausage[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110476. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110476.
- [12] NIE X H, LIN S L, ZHANG Q L. Proteolytic characterisation in grass carp sausage inoculated with *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus pentosaceus*[J]. *Food Chemistry*, 2014, 145: 840-844. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.08.096.
- [13] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品中总酸的测定: GB 12456—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-3.
- [14] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中挥发性盐基氮的测定: GB 5009.228—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3-5.
- [15] 毛军伟. 含大豆、玉米和小米烘烤婴幼儿营养米粉的糊化特性研究和营养评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2015: 49-52.
- [16] RESTUCCIA D, SPIZZIRRI U G, BONESI M, et al. Evaluation of fatty acids and biogenic amines profiles in mullet and tuna roe during six months of storage at 4 °C[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2015, 40: 52-60. DOI:10.1016/j.jfca.2014.12.014.
- [17] 黄俊逸, 王凤娜, 吴香, 等. 复合发酵剂的筛选及其对发酵香肠加工过程中品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 95-101. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191023-241.
- [18] SHARP J G. Post mortem breakdown of glycogen and accumulation of lactic acid in fish-muscle at low temperatures[J]. *Biochemical Journal*, 1935, 29(4): 850-853. DOI:10.1042/bj0290850.
- [19] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, RIEBROY S, et al. Gel-forming properties of surimi produced from bigeye snapper, *Priacanthus tayenus* and *P. macracanthus*, stored in ice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, 82(13): 1442-1451. DOI:10.1002/jsfa.1207.
- [20] 许惠雅. 乳酸菌和风味蛋白酶联合对发酵草鱼品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 15. DOI:10.27314/d.cnki.gsscu.2022.000869.
- [21] 李培瑜, 刘弈彤, 李思源, 等. 鲢鱼糜发酵过程中理化特性及挥发性风味成分变化[J]. *肉类研究*, 2020, 34(5): 59-63. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200305-061.
- [22] ZHANG Y L, HU P, XIE Y Y, et al. Co-fermentation with *Lactobacillus curvatus* LAB26 and *Pediococcus pentosaceus* SWU73571 for improving quality and safety of sour meat[J]. *Meat Science*, 2020, 170: 108240. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108240.
- [23] TAHIR H E, HASHIM S B H, MAHUNU G K, et al. Smart films fabricated from natural pigments for measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content of meat for freshness evaluation: a systematic review[J]. *Food Chemistry*, 2022, 396: 133674. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.133674.
- [24] 国家卫生和计划生育委员会. 动物性水产制品: GB 10136—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 2.
- [25] 龚珏, 唐善虎, 李思宁, 等. 乳酸菌对发酵牦牛肉灌肠理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(4): 57-64. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022514.
- [26] 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. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100392.
- [27] RIEBROY S, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Effect of iced storage of bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) on the chemical composition, properties and acceptability of Som-fug, a fermented Thai fish mince[J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(1): 270-280. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.05.017.
- [28] PAKER I, BEAMER S, JACZYNSKI J, et al. pH shift protein recovery with organic acids on texture and color of cooked gels[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(2): 275-280. DOI:10.1002/jsfa.6712.
- [29] ZHAO C C, KIM D W, EUN J B. Physicochemical properties and bacterial community dynamics of hongoe, a Korean traditional fermented skate product, during fermentation at 10 °C[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 104: 109-119. DOI:10.1016/j.lwt.2019.01.048.
- [30] LIU P X, WANG S W, ZHANG H, et al. Influence of glycosylated nitrosohaemoglobin prepared from porcine blood cell on physicochemical properties, microbial growth and flavour formation of Harbin dry sausages[J]. *Meat Science*, 2019, 148: 96-104. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.10.008.
- [31] VISESSANGUAN W, BENJAKUL S, RIEBROY S, et al. Changes in composition and functional properties of proteins and their contributions to Nham characteristics[J]. *Meat Science*, 2004, 66(3): 579-588. DOI:10.1016/S0309-1740(03)00172-4.
- [32] YU D W, JIANG Q X, XU Y S, et al. The shelf life extension of refrigerated grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets by chitosan coating combined with glycerol monolaurate[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 101: 448-454. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.03.038.
- [33] WEI P Y, ZHU K X, CAO J, et al. The inhibition mechanism of the texture deterioration of tilapia fillets during partial freezing after treatment with polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127647. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127647.
- [34] ZHOU X X, ZHAO D D, LIU J H, et al. Physical, chemical and microbiological characteristics of fermented surimi with *Actinomyces elegans*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 335-341. DOI:10.1016/j.lwt.2014.05.045.

- [35] WANG Z H, XU Z, SUN L M, et al. Dynamics of microbial communities, texture and flavor in Suan zuo yu during fermentation[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127364. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127364.
- [36] 王伟, 王昱, 陈日新, 等. 海藻酸钠分子质量对低脂乳化肠凝胶特性的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(6): 1-6. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190325-069.
- [37] FAO. Dietary protein quality evaluation in human nutrition: report of an FAO expert consultation[R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2013: 27.
- [38] JOANNA T, DOROTA C S, PAULINA B, et al. Milk fermentation affects amino acid and fatty acid profile of mare milk from Polish Coldblood mares[J]. International Dairy Journal, 2021, 121: 105137. DOI:10.1016/j.idairyj.2021.105137.
- [39] 宁云霞, 杨淇越, 鲍佳彤, 等. 抗氧化剂对未漂洗革胡子鲶鱼鱼糜氧化品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(7): 84-90. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200410-091.
- [40] ZHAO Y F, ZHOU C Y, NING J W, et al. Effect of fermentation by *Pediococcus pentosaceus* and *Staphylococcus carnosus* on the metabolite profile of sausages[J]. Food Research International, 2022, 162: 112096. DOI:10.1016/J.FOODRES.2022.112096.
- [41] ZHANG X, GUO X S, LI F H, et al. Antioxidant, flavonoid, α -tocopherol, β -carotene, fatty acids, and fermentation profiles of alfalfa silage inoculated with novel *Lactiplantibacillus Plantarum* and *Pediococcus acidilactici* strains with high-antioxidant activity[J]. Animal Feed Science and Technology, 2022, 288: 115301. DOI:10.1016/J.ANIFEEDSCI.2022.115301.
- [42] FETTERMAN J W, ZDANOWICZ M M. Therapeutic potential of *n*-3 polyunsaturated fatty acids in disease[J]. American Journal of Health-System Pharmacy, 2009, 66(13): 1169-1179. DOI:10.2146/ajhp080411.
- [43] SAINI R K, KEUM Y S. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: dietary sources, metabolism, and significance: a review[J]. Life Sciences, 2018, 203: 255-267. DOI:10.1016/j.lfs.2018.04.049.
- [44] LEE S, HWANG Y, KIM M, et al. Comparison of volatile and nonvolatile compounds in rice fermented by different lactic acid bacteria[J]. Molecules, 2019, 24(6): 1183. DOI:10.3390/molecules24061183.
- [45] TIAN L, WANG L. A meta-analysis of microbial community structures and associated metabolic potential of municipal wastewater treatment plants in global scope[J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114598. DOI:10.1016/j.envpol.2020.114598.
- [46] WANG H, XU J H, LIU Q, et al. Effect of the protease from *Staphylococcus carnosus* on the proteolysis, quality characteristics, and flavor development of Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2022, 189: 108827. DOI:10.1016/j.meatsci.2022.108827.