

# 戊糖片球菌发酵大黄鱼风味代谢途径分析

秦 菲<sup>1</sup>, 张舒雨<sup>1,2</sup>, 魏好程<sup>1,2,\*</sup>, 倪 辉<sup>1,2,3</sup>

(1.集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021; 2.福建省食品微生物与酶工程重点实验室, 福建 厦门 361021; 3.厦门海洋职业技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘 要:** 本研究在低盐腌制大黄鱼中接种戊糖片球菌制备低盐发酵大黄鱼, 并采用风味代谢组学和风味分子感官科学表征其风味轮廓和挥发性风味化合物, 鉴定关键气味活性化合物, 同时开展脂肪酸风味前体的差异代谢调查和关键气味活性化合物的相关性分析, 探讨戊糖片球菌促进脂肪酸生成关键气味活性化合物的代谢途径。研究表明, 戊糖片球菌发酵大黄鱼减弱了青草味和鱼腥味, 增强了脂肪味和肉香味, 提升了大黄鱼可接受度。庚醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、十一醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛8种化合物被鉴定为关键气味活性化合物。本研究还明晰了(Z,Z)-9,12-十八碳烯酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸等4种差异脂肪酸在戊糖片球菌发酵中经氧化、降解生成1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛及(E,E)-2,4-癸二烯醛关键气味活性化合物的潜在代谢途径。

**关键词:** 大黄鱼; 戊糖片球菌; 挥发性风味化合物; 关键气味活性化合物; 游离脂肪酸; 代谢途径

## Flavor Metabolic Pathways of Fermented Large Yellow Croaker with *Pediococcus pentosaceus*

QIN Fei<sup>1</sup>, ZHANG Shuyu<sup>1,2</sup>, WEI Haocheng<sup>1,2,\*</sup>, NI Hui<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Food Microbiology and Enzyme Engineering, Xiamen 361021, China; 3. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In this study, low-salt fermented large yellow croaker was prepared by inoculating low-salt cured yellow croaker with *Pediococcus pentosaceus* and fermenting it, its flavor profile and volatile flavor compounds were characterized using flavor metabolomics and molecular sensory science, and its key odor-active compounds were identified. The differential metabolism of fatty acid flavor precursors was investigated and the correlation between the key odor-active compounds and free fatty acids was analyzed. Moreover, the metabolic pathways of *P. pentosaceus* for promoting the production of the key odor-active compounds from fatty acids were explored. The results showed that fermentation with *P. pentosaceus* reduced the grassy and fishy smell while enhancing the fatty and meaty aroma, thereby improving the acceptability of large yellow croaker. Eight compounds, including heptanal, 1-octen-3-ol, nonanal, (E,Z)-2,6-nonadienal, (E)-2-nonenal, decanal, undecanal, and (E,E)-2,4-decadienal, were identified as the key odor-active compounds. The study also elucidated the potential metabolic pathways for the oxidation and degradation of four differential fatty acids, including (Z,Z)-9,12-octadecadienoic acid and (Z,Z,Z)-9,12,15-octadecatrienoic acid, by *P. pentosaceus* to produce the key odor-active compounds 1-octen-3-ol, (E,Z)-2,6-nonadienal, (E)-2-nonenal, decanal, and (E,E)-2,4-decadienal.

**Keywords:** large yellow croaker; *Pediococcus pentosaceus*; volatile flavor compounds; key odor-active compounds; free fatty acid; metabolic pathway

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240512-091

中图分类号: TS254.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 24-0081-11

引文格式:

秦菲, 张舒雨, 魏好程, 等. 戊糖片球菌发酵大黄鱼风味代谢途径分析[J]. 食品科学, 2024, 45(24): 81-91. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240512-091. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2021J01832); 海洋休闲食品腥味控制技术及其示范应用项目(2022S0052);

国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2018YFD0901003); 集美大学科研启动项目(ZQ02024071)

第一作者简介: 秦菲(1998—)(ORCID: 0009-0007-8489-6762), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品科学。

E-mail: qinfeifei1998@163.com

\*通信作者简介: 魏好程(1978—)(ORCID: 0000-0002-7159-2854), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品风味化学。

E-mail: whc\_xm@jmu.edu.cn

QIN Fei, ZHANG Shuyu, WEI Haocheng, et al. Flavor metabolic pathways of fermented large yellow croaker with *Pediococcus pentosaceus*[J]. Food Science, 2024, 45(24): 81-91. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240512-091. <http://www.spkx.net.cn>

我国是水产品生产、加工和消费大国,水产品总产量连续多年位居世界第一,2022年水产品总产量达6 865.91万 t<sup>[1]</sup>。水产品富含蛋白质、不饱和脂肪酸及维生素等营养成分,深受消费者喜爱<sup>[2]</sup>,同时水产品也是响应“大食物观”理念以及“蓝色粮仓”中提供优质食物的重要来源。然而水产品在加工、贮存、运输和销售过程中极易产生风味劣变等问题,严重限制了水产品工业化生产和推广应用<sup>[3]</sup>。

腥味是水产品主要异味,会严重影响和限制消费者的选择。目前水产品的风味改良加工手段包括物理法、化学法和生物法等。前者多采用强机械力和强酸、强碱,易损害肌肉组织和营养成分,而生物法反应温和且对组织损伤小,安全性更高<sup>[4]</sup>。发酵法是在微生物和酶作用下延长水产品的贮藏期并产生独特风味的脱腥、增香方法。传统水产品的自然发酵加工更多依赖于经验化的指导,优势微生物演替、发酵进程以及产物的不可控,会造成传统发酵水产品风味优势不突出、生物胺和氨类异味难以控制等问题。人工接种外源发酵剂的加工方式可多角度弥补传统发酵的不足,能够促进优势微生物生长、缩短发酵进程、定向生成特征风味化合物,便于发酵水产品的风味调控。已有大量研究开展了植物乳杆菌、酿酒酵母等在鱼类发酵加工中的风味改良<sup>[5-6]</sup>。戊糖片球菌作为发酵肉制品及香肠中常用的外源发酵剂,但在发酵水产品中的风味贡献鲜有报道<sup>[7]</sup>。发酵水产品的挥发性风味化合物主要由风味前体脂肪酸、氨基酸在发酵过程中受微生物、酶和环境等影响生成,进而形成发酵水产品典型的风味特征<sup>[8]</sup>。风味前体靶向代谢组研究表明,脂肪酸风味前体是发酵鱼主要的风味来源,可代谢生成不同气味特征的挥发性风味化合物<sup>[9]</sup>,如亚油酸可自发氧化为呈油脂味的(*E*)-2-壬烯醛,亚麻酸可氧化为呈青草味的(*E,Z*)-2,6-壬二烯醛,花生四烯酸易降解为呈蘑菇味的1-辛烯-3-醇等<sup>[10-11]</sup>,这些化合物对发酵水产品风味轮廓起重要作用,然而基于戊糖片球菌发酵处理引起的风味化合物代谢途径尚不明确。

挥发性风味化合物含量低、易转化,其检测分析具有挑战性。Greger等<sup>[12]</sup>提出了将风味化合物的提取和检测融为一体的风味分子感官科学,目前是风味研究的主流方法。水产品风味提取技术主要有同时蒸馏萃取(simultaneous distillation extraction, SDE)、固相微萃取(solid phase microextraction, SPME)、溶剂辅助风味蒸发(solvent-assisted flavor evaporation, SAFE)等,SDE不适用热敏性化合物的提取,SPME不适用弱

挥发性化合物的吸附,而SAFE可在低温、高真空条件下从复杂基质中全面提取挥发性化合物,对热敏性、弱挥发性、痕量化合物的定量分析更准确<sup>[13-14]</sup>。水产品风味检测多采用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用技术、气相色谱-嗅闻(gas chromatography-olfactometry, GC-O)等<sup>[15]</sup>。基于挥发性风味化合物具有人体感官阈值特性的定量描述分析(quantitative descriptive analysis, QDA)、气味活性值(odor activity value, OAV)分析、气味提取物稀释分析(aroma extract dilution analysis, AEDA)等<sup>[16]</sup>是将嗅觉与仪器结合的方法,已广泛应用于鱼类中热敏性挥发性化合物的研究<sup>[17]</sup>。

大黄鱼(*Larimichthys crocea*)又称黄花鱼,金鳞朱唇、肉质鲜美,被誉为“国鱼”<sup>[18]</sup>。目前大黄鱼加工水平滞后,冷链储运成本高、易腐烂、腐烂后气味难闻<sup>[19]</sup>。黄鱼鲞是传统盐腌加工大黄鱼,利用高浓度盐腌技术抑制腐败菌生长。但是较高的食盐浓度与当前低盐健康生活模式不相宜,同时高盐处理还会抑制风味功能微生物活性而导致产品风味单一,难以实现工业化生产<sup>[20]</sup>。戊糖片球菌(*Pediococcus pentosaceus*)是肉制品中常用的发酵剂,能抑制致病性和腐败微生物生长,减少肉制品中亚硝酸盐、胺类残留,提高发酵食品安全性并抑制异味<sup>[21]</sup>。同时戊糖片球菌还表现出降解蛋白质和脂质的能力,可以提升香气风味<sup>[22-23]</sup>,然而关于戊糖片球菌在海水鱼中发酵加工的研究还鲜有报道。综上所述,本研究以大黄鱼为材料,采用人工接种戊糖片球菌对低盐腌制大黄鱼进行发酵加工,结合SAFE-GC-MS、GC-O等技术对戊糖片球菌发酵大黄鱼挥发性风味化合物的种类、含量进行检测,运用QDA、OAV及AEDA等分析手段确定关键气味活性化合物,探究戊糖片球菌发酵大黄鱼中关键气味活性化合物的形成机理,以期水产品风味品质的提升提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

选择福建宁德深海网箱人工养殖的12月龄健康大黄鱼,单尾质量0.4~0.5 kg,捕捞后次日冰鲜运至实验室进行预处理。戊糖片球菌(*P. pentosaceus* ATCC 33316)购自中国普通微生物菌种保藏管理中心。

色谱级标准品:癸酸乙酯、2,4,6-三甲基吡啶、正构烷烃(C<sub>8</sub>~C<sub>20</sub>)、己醛、庚醛、辛醛、(*E,E*)-2,4-庚二烯

醛、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、2,4-二叔丁基酚、姥鲛烷、蒎烯、柠檬烯、1-十三烯、 $\alpha$ -柏木烯、1-辛烯-3-醇、 $\alpha$ -松油醇、十四醇、3-羟基-2-丁酮 美国Sigma-Aldrich公司；无水乙醇 上海麦克林生化科技有限公司。

## 1.2 仪器与设备

GC-MS-QP-2020 GC-MS仪 日本岛津公司；Rtx-5MS毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25  $\mu$ m) 美国Restek公司；OP275嗅闻仪 日本GL Sciences公司；SAFE装置 德国Glasbläserei-Bahr公司；XB-CPJ高速多功能粉碎机 永康市久品工贸有限公司；SPS402F电子天平 奥豪斯国际贸易(上海)有限公司；HH-1数显恒温水浴锅 常州国华电器有限公司；TS-25C高温杀菌锅 北京兰德梅克科技开发有限公司；SW-CJ-2FD双人单面净化工作台 苏州净化设备有限公司；LRH-150恒温箱 上海一恒科学仪器有限公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 发酵大黄鱼的制备

冰鲜大黄鱼“三去”处理，沿背脊将鱼剖开，清洗鱼腔内膜、血污等，沥干后统一剪成3 cm $\times$ 3 cm $\times$ 2 cm的鱼块。戊糖片球菌(*P. pentosaceus* ATCC 33316)在37  $^{\circ}$ C MRS培养基中培养24 h，在4  $^{\circ}$ C、8 000 r/min条件下离心15 min，弃上清液后，向沉淀物中加入适量无菌水，稀释至OD<sub>600 nm</sub>为0.7，使菌液浓度达 $10^7\sim 10^8$  CFU/mL作为发酵液。

参考周长艳等<sup>[24]</sup>的工艺条件并略作修改。鱼肉用质量分数为3%的食盐水按固液比1:3(g/mL)低盐腌制大黄鱼，10  $^{\circ}$ C盐腌8 h，作为空白对照组(记为SA)。同上述腌制条件，鱼肉与发酵液按固液比1:2(g/mL)接种戊糖片球菌，37  $^{\circ}$ C发酵6 h，作为实验处理组(记为PP)。各实验处理组重复3次。

### 1.3.2 发酵大黄鱼感官评价分析

采用QDA，感官评价小组由15名受过发酵鱼风味感官培训成员(年龄20~30岁，男性5人、女性10人)组成，采用GB/T 16291.1—2012《感官分析 选拔、培训与管理 评价员一般导则 第1部分：优选评价员》中的方法培训。根据发酵鱼气味特征及相关研究结果<sup>[25-26]</sup>将风味定义为青草味、甜香味、蘑菇味、脂肪味、肉香味和鱼腥味。取10 g样品置于25 mL顶空瓶，60  $^{\circ}$ C水浴30 min后，感官评价成员随机对每个样品风味打分，参考曾欢等<sup>[27]</sup>的感官评定方法，采用5分制进行风味强度评价，“0”表示没有香气，“5”表示香气最强，每个样品重复评价3次。

### 1.3.3 挥发性风味化合物的提取与检测

SAFE提取挥发性风味化合物：称量50 g样品并用液氮冷冻后研磨成粉置于500 mL锥形瓶中，加入150 mL色谱级CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>和内标(50  $\mu$ L 100 mg/L 2,4,6-三甲基吡啶溶液、100  $\mu$ L 100 mg/L 癸酸乙酯溶液)，用磁力搅

拌器以450 r/min浸提5 h，过滤收集有机相。SAFE条件参考An Yueqi等<sup>[28]</sup>的方法进行提取并适当调整。在 $4.6\times 10^{-3}$  Pa的高真空条件下，通过SAFE将浸提液挥发性风味化合物于42  $^{\circ}$ C萃取分离，馏出物用无水Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>于4  $^{\circ}$ C除水12 h后在温和的氮气流下浓缩至1 mL。

GC条件：Rtx-5MS色谱柱(30 m $\times$ 0.32 mm, 0.25  $\mu$ m)，载气为氦气(纯度为99.999%)，不分流进样，柱流量4 mL/min，进样口温度240  $^{\circ}$ C，进样量1.0  $\mu$ L。升温程序：初始温度30  $^{\circ}$ C保持4 min；以4  $^{\circ}$ C/min升至120  $^{\circ}$ C；再以6  $^{\circ}$ C/min升至250  $^{\circ}$ C，保持2 min。MS条件：离子源温度230  $^{\circ}$ C，接口温度250  $^{\circ}$ C，溶剂延迟4 min，采集方式为全扫描模式，扫描范围 $m/z$  35~500。

### 1.3.4 挥发性风味化合物的定性定量分析

采用NIST20s、NIST20-1、NIST20-2质谱数据库分析化合物基峰、特征离子碎片，保留匹配度大于80%物质。按式(1)计算保留指数(retention index, RI)<sup>[29]</sup>：

$$RI_x^a = 100n + 100 \times \frac{RT_x - RT_n}{RT_{n+1} - RT_n} \quad (1)$$

式中：RI<sub>x</sub><sup>a</sup>为待测物的RI； $n$ 和 $n+1$ 分别为待测物出峰前后相邻两个正构烷烃的碳原子数；RT<sub>x</sub>为待测物的保留时间/min；RT<sub>n</sub>和RT<sub>n+1</sub>分别为待测物出峰前后相邻两个正构烷烃的保留时间/min。

配制9种不同质量浓度的混合标准品，选择中间浓度建立选择性离子检测方法，GC-MS条件同1.3.3节。将混标浓度从小到大依次进行选择离子检测模式分析。建立各化合物的标准曲线，分别计算各挥发性化合物含量。无标准品的化合物可采用内标法半定量，以2,4,6-三甲基吡啶为内标，按式(2)计算：

$$\text{待测物含量}(\mu\text{g/kg}) = \frac{\text{待测物峰面积} \times \text{内标物含量}(\mu\text{g/kg})}{\text{内标物峰面积}} \quad (2)$$

### 1.3.5 OAV分析

食品中的挥发性风味化合物在低浓度条件下可被感知，这种感知通常用阈值表示，OAV是评价各挥发性风味化合物对样品总体风味贡献的指标<sup>[30]</sup>。按式(3)计算OAV：

$$OAV = \frac{C_i}{T_i} \quad (3)$$

式中：C<sub>i</sub>为各挥发性化合物的含量/( $\mu$ g/kg)；T<sub>i</sub>为各挥发性化合物在水中的阈值/( $\mu$ g/kg)。

### 1.3.6 挥发性化合物的AEDA

AEDA可鉴定关键气味活性化合物，通过结合GC-O实现对挥发性风味化合物的关键性分级<sup>[31]</sup>。将风味提取物稀释一系列倍数后进行GC-O检测，最大稀释倍数为香气稀释因子(flavor dilution factor, FD)，FD与挥发性风味化合物对整体风味的贡献程度呈正相关<sup>[32]</sup>。



### 1.3.7 游离脂肪酸的提取分析及定量分析

参考Li Wenrong等<sup>[33]</sup>的方法并略作修改。取15 g样品于50 mL离心管中,加入CHCl<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub>OH (2:1, V/V) 溶液12 mL和超纯水5 mL,超声提取30 min (26 °C、60 Hz) 后离心15 min (4 °C、8 000 r/min),收集下层有机相,采用0.22 μm有机滤膜过滤,将提取物在温和的氮气流下吹至质量恒定,得到粗脂质,于冰箱4 °C冷藏备用。

脂肪酸甲酯化:称取粗脂质0.1 g至15 mL离心管中,加入1 mL体积分数为0.1%的内标(十九烷酸-正己烷)、1 mL 0.5 mol/L KOH-CH<sub>3</sub>OH溶液,混匀后置于65 °C水浴皂化10 min至油滴溶解;继续加入1 mL体积分数为10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CH<sub>3</sub>OH溶液,65 °C水浴30 min;水浴结束后,加入1.2 mL正己烷、0.6 mL甲基叔丁基醚、2.0 mL饱和NaCl并混匀;静置分层后,收集上层正己烷相,加入无水Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>过夜除水;采用0.22 μm有机滤膜过滤,稀释后供GC-MS仪测定。

GC条件:柱流量3.83 mL/min,进样口温度250 °C,进样量1.0 μL。升温程序:初始温度100 °C,保持7 min;以10 °C/min升至180 °C,保持6 min;以1 °C/min升至200 °C;以4 °C/min升至230 °C,保持6 min。MS条件:离子源温度230 °C,接口温度250 °C,溶剂延迟时间5.2 min,采集方式为全扫描模式,扫描范围 $m/z$  35~500。游离脂肪酸的定性定量分析采用标准曲线法,标准曲线的建立方法同1.3.4节。

### 1.4 数据处理

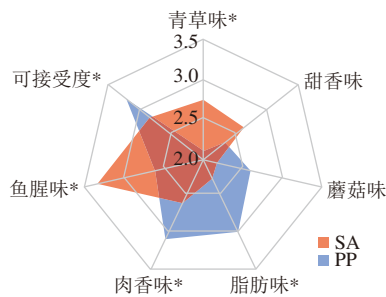
使用Microsoft Office软件处理数据,结果表示为 $\bar{x} \pm s$ ;采用SPSS Statistics 26软件进行显著性分析;采用OriginPro 2024软件进行雷达图、柱状图、哑铃图、Spearman相关性热图等的绘制;采用Chem Draw 20.0软件绘制化学结构式,并结合京都基因与基因组百科全书(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG)推导关键气味活性化合物的潜在代谢途径。

## 2 结果与分析

### 2.1 发酵大黄鱼的感官评价分析

通过评价水产品的风味、可接受度等感官特征可直观反映出评价者的喜好以及不同样品主体间的风味差异<sup>[34]</sup>。如图1所示,SA组的样品主要气味为青草味、甜香味和鱼腥味,PP组相比于SA组青草味、鱼腥味减弱,脂肪味、肉香味增强,总体可接受度提高,这可能由于水产品发酵过程中蛋白质、脂质等大分子降解生成呈油脂味、肉香味的小分子风味化合物,并与鱼腥味相互作用,达到减弱或掩盖鱼腥味的效果,从而提高发酵大黄鱼的风味品质<sup>[35]</sup>。感官评价结果表明,PP比SA组的风味更为丰富浓郁,主要归因于发酵过程中戊糖片球菌参与了大黄鱼中复杂的生化反应,风味前体经微生物作用生

成了丰富的风味化合物<sup>[36]</sup>。为进一步确定戊糖片球菌发酵对大黄鱼风味的影响,需结合GC-MS进行定性分析。



\*.组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图1 低盐发酵大黄鱼感官评价雷达图

Fig. 1 Radar map of the sensory evaluation of low-salt fermented large yellow croaker

### 2.2 戊糖片球菌发酵前后低盐腌制大黄鱼中挥发性风味物质的定性分析

如图2所示,PP与SA组样品的挥发性风味化合物存在区别,相比于SA组,PP组中3-羟基-2-丁酮、甲苯、十六酸等物质峰增高,2,4-二叔丁基酚、姥鲛烷等物质峰降低。定性结果如表1、图3所示,共鉴定出8大类挥发性风味化合物,种类数量由多到少分别为醛类、芳香类、烷烃类、烯烃类、醇类、酸类、酮类和酯类,这与相关研究结果<sup>[37]</sup>相似,其中烯烃类、烷烃类种类较多,可能由于挥发性风味化合物的提取方式和检测手段与其他研究不同<sup>[38]</sup>。有研究表明,混菌发酵酒糟大黄鱼中酯类、醇类及酮类较为丰富,这可能由于混菌发酵剂相比于单一菌种发酵更有利于大黄鱼风味化合物的形成<sup>[39]</sup>。SA组和PP组分别鉴定出42、44种化合物,41种共有化合物。相比于SA组,PP组新生成苯甲醛、(E)-2-壬烯醛和2,3-辛二酮且 $\alpha$ -松油醇消失,这表明戊糖片球菌发酵导致大黄鱼中醛类和酮类化合物种类增加,而醇类化合物种类减少。醛类、芳香类和醇类等挥发性风味化合物是戊糖片球菌发酵大黄鱼中重要化合物,能减少大黄鱼的草腥味、鱼腥味等不良气味,增加脂肪味和肉香味,提高戊糖片球菌发酵大黄鱼的风味品质<sup>[40]</sup>,这与感官评价结果相印证。

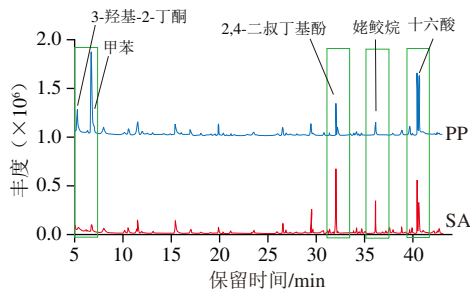


图2 低盐发酵大黄鱼中挥发性风味化合物的总离子流色谱图

Fig. 2 Total ion chromatograms of volatile flavor compounds in low-salt fermented large yellow croaker

表 1 低盐发酵大黄鱼的挥发性风味化合物  
Table 1 Qualitative analyses of volatile flavor compounds in low-salt fermented large yellow croaker

种类	序号	挥发性 风味化合物	RT/min	RI <sup>a</sup>	RI <sup>b</sup>	特征离子 碎片	鉴定依据	SA	PP
醛类	1	2-甲基戊醛	5.973	735	746	41, 43, 58	MS, RI	D	D
	2	己醛	7.678	791	793	41, 43, 44	MS, RI, Std	D	D
	3	庚醛	11.666	894	894	41, 44, 70	MS, RI, Std	D	D
	4	苯甲醛	14.062	953	951	77, 105, 106	MS, RI, Std	ND	D
	5	辛醛	15.810	995	996	41, 43, 44	MS, RI, Std	D	D
	6	(E,E)-2,4-庚二烯醛	16.150	1 004	1 003	41, 81, 110	MS, RI, Std	D	D
	7	壬醛	19.763	1 096	1 098	41, 43, 57	MS, RI, Std	D	D
	8	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	21.551	1 144	1 148	41, 69, 70	MS, RI, Std	D	D
	9	(E)-2-壬烯醛	21.824	1 152	1 155	43, 55, 70	MS, RI, Std	ND	D
	10	癸醛	23.523	1 197	1 195	41, 43, 57	MS, RI, Std	D	D
	11	十一醛	27.026	1 298	1 298	41, 43, 57	MS, RI, Std	D	D
	12	(E,E)-2,4-癸二烯醛	27.382	1 310	1 310	39, 41, 81	MS, RI	D	D
	13	十二醛	29.935	1 400	1 401	41, 55, 57	MS, RI, Std	D	D
	14	十六醛	38.392	1 804	1 811	43, 57, 82	MS, RI, Std	D	D
芳香类	1	甲苯	6.388	749	759	65, 91, 92	MS, RI	D	D
	2	乙苯	9.873	849	848	51, 91, 106	MS, RI	D	D
	3	对二甲苯	10.293	859	862	91, 105, 106	MS, RI, Std	D	D
	4	邻二甲苯	11.145	881	879	91, 105, 106	MS, RI, Std	D	D
	5	4-乙基邻二甲苯	18.930	1 075	1 078	91, 119, 134	MS, RI	D	D
	6	1,2,3,5-四甲基苯	20.274	1 110	1 120	91, 119, 134	MS, RI, Std	D	D
	7	2,4-二叔丁基酚	32.346	1 499	1 502	41, 57, 119	MS, RI, Std	D	D
烷烃类	1	4,6-二甲基十二烷	27.477	1 314	1 325	43, 57, 71	MS, RI	D	D
	2	2,6,10-三甲基十二烷	29.041	1 368	1 365	43, 57, 71	MS, RI	D	D
	3	2,6,10-三甲基十五烷	35.239	1 636	1 641	43, 57, 71	MS, RI	D	D
	4	姥鲛烷	36.344	1 692	1 701	43, 57, 71	MS, RI, Std	D	D
	5	3-甲基十七烷	37.579	1 759	1 770	43, 57, 71	MS, RI	D	D
	6	植烷	38.220	1 794	1 795	43, 57, 71	MS, RI	D	D
烯烃类	1	蒎烯	12.834	923	922	91, 92, 93	MS, RI, Std	D	D
	2	3,5,5-三甲基-2-己烯	14.670	967	968	41, 57, 70	MS, RI	D	D
	3	柠檬烯	16.790	1 020	1 020	67, 68, 93	MS, RI, Std	D	D
	4	1-十三烯	26.549	1 284	1 287	41, 43, 55	MS, RI, Std	D	D
	5	$\alpha$ -柏木烯	30.127	1 408	1 408	93, 105, 119	MS, RI, Std	D	D
醇类	1	1-辛烯-3-醇	14.970	975	975	43, 57, 72	MS, RI, Std	D	D
	2	2-乙基己醇	16.893	1 023	1 024	41, 43, 57	MS, RI, Std	D	D
	3	$\alpha$ -松油醇	23.145	1 187	1 187	59, 93, 121	MS, RI, Std	D	ND
	4	十四醇	35.849	1 667	1 668	41, 43, 55	MS, RI, Std	D	D
	5	1-十六醇	39.471	1 869	1 870	55, 69, 83	MS, RI, Std	D	D
酸类	1	壬酸	25.965	1 268	1 267	57, 60, 73	MS, RI	D	D
	2	十四酸	37.418	1 750	1 748	43, 60, 73	MS, RI	D	D
	3	十六酸	40.907	1 952	1 958	43, 60, 73	MS, RI	D	D
酮类	1	2,3-戊二酮	4.596		680	29, 43, 57	MS, RI	D	D
	2	3-羟基-2-丁酮	4.878		698	27, 43, 45	MS, RI, Std	D	D
	3	2,3-辛二酮	15.133	979	979	30, 41, 43	MS, RI	ND	D
酯类	1	乙酸丁酯	6.309		776	41, 43, 56	MS, RI	D	D
	2	棕榈酸乙酯	41.319	1 977	1 975	43, 88, 101	MS, RI, Std	D	D

注: RI<sup>a</sup>.根据C<sub>8</sub>~C<sub>20</sub>计算所得RI; RI<sup>b</sup>. NIST Chemistry WebBook数据库检索结果; 下同。MS.谱库检索结果定性; RI.保留指数定性; Std.标准品定性。D.可由GC-MS仪检测出; ND.未检出,无法计算。

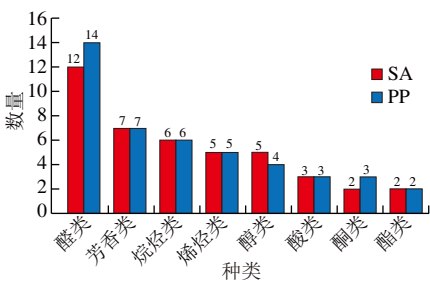


图 3 低盐发酵大黄鱼的挥发性风味化合物类别

Fig. 3 Types of volatile flavor compounds in low-salt fermented large yellow croaker

2.3 低盐腌制大黄鱼和戊糖片球菌发酵大黄鱼中挥发性风味化合物的定量分析

如表2所示, SA、PP组中十六酸、1-十六醇、己醛等含量较高。相比于SA组, PP组的化合物含量大多呈增加趋势, 如十六酸、3-羟基-2-丁酮、己醛等, 相关研究表明挥发性风味化合物含量随着发酵时间的延长而增加<sup>[41]</sup>。本研究中部挥发性化合物含量增长幅度小, 可能是发酵时间较短导致<sup>[42]</sup>。如图4所示, SA和PP组中酸类、醇类、醛类含量较高, 酯类、芳香类等含量较低。相比于SA组, PP组的醛类、酸类含量明显增高, 该变化主要由于己醛、辛醛、(E)-2-壬烯醛、十六酸等含量明显增加(表2); 醇类含量略有增加, 主要由于十六醇含量增多, 结合2.2节醇类化合物种类减少的结果, 可能是由于大黄鱼发酵过程中风味前体发生降解生成十六醇。相关研究表明, 乳酸菌发酵可增加大黄鱼中酯类、酸类的含量, 减少烃类、醛类的含量, 这与本研究结果不同, 可能由于发酵菌种不同引起大黄鱼挥发性风味化合物的种类、含量变化也有所差异<sup>[43]</sup>。戊糖片球菌发酵中活性酶可将大分子蛋白质、脂肪分解成氨基酸、脂肪酸等风味前体, 再由微生物作用发生氧化降解, 酯键断裂释放醛类、酯类、酸类、酮类等<sup>[36]</sup>, 因此发酵大黄鱼的油脂味提升、鱼腥味减弱。为进一步确定关键气味活性化合物, 对挥发性风味化合物的OAV进行分析。

表 2 低盐发酵大黄鱼挥发性风味化合物的定量分析  
Table 2 Quantitative analysis of volatile flavor compounds in low-salt fermented large yellow croaker

种类	序号	挥发性 风味化合物	标准曲线方程	R <sup>2</sup>	线性范围/ (μg/kg)	含量/(μg/kg)	
						SA	PP
醛类	1	2-甲基戊醛**	—	—	—	2.11±0.07	2.42±0.08
	2	己醛**	Y=0.121 7X-0.002 7	0.999 9	3~10 000	44.26±8.04	82.40±3.14
	3	庚醛**	Y=0.087 7X-0.011 2	0.999 4	3~10 000	8.18±0.02	17.82±0.34
	4	苯甲醛**	Y=0.194 8X-0.018 3	0.999 4	3~10 000	—	8.62±0.18
	5	辛醛**	Y=0.042 7X+0.000 1	0.999 3	3~10 000	21.33±0.74	44.31±3.40
	6	(E,E)-2,4-庚二烯醛**	Y=0.269 5X-0.053 2	0.999 7	3~10 000	18.15±0.06	21.30±1.09
	7	壬醛**	Y=0.146 7X+0.004 3	0.999 5	3~10 000	12.25±0.80	26.22±3.79
	8	(E,Z)-2,6-壬二烯醛**	Y=0.288 2X-0.082 4	0.999 9	3~10 000	21.55±0.44	22.25±0.48
	9	(E)-2-壬烯醛**	Y=0.066 2X-0.004 0	0.999 6	3~10 000	—	33.00±1.18
	10	癸醛**	Y=0.067 7X-0.002 2	0.999 6	3~10 000	17.77±0.14	21.44±0.87

续表2

种类	序号	挥发性 风味化合物	标准曲线方程	R <sup>2</sup>	线性范围/ (μg/kg)	含量/(μg/kg)	
						SA	PP
芳香类	11	十一醛**	Y=0.101 3X-0.007 5	0.999 6	3~10 000	14.73±0.44	16.92±1.42
	12	(E,E)-2,4-癸二烯醛**	—	—	—	6.57±0.88	6.26±0.43
	13	十二醛**	Y=0.180 4X-0.023 4	0.999 1	3~10 000	16.19±0.63	18.64±1.57
	14	十六醛**	Y=0.045 6X-0.004 3	0.999 8	3~10 000	22.30±1.41	26.83±0.42
	1	甲苯*	—	—	—	10.95±0.62	14.26±1.44
	2	乙苯**	—	—	—	2.75±0.15	4.77±0.37
	3	对二甲苯**	Y=1.066 1X+0.001 3	0.999 6	3~10 000	3.44±0.10	4.24±0.11
烷烃类	4	邻二甲苯*	Y=0.264 9X-0.013 5	0.999 6	3~10 000	8.48±0.23	10.13±0.72
	5	4-乙基邻二甲苯**	—	—	—	1.15±0.07	2.18±0.19
	6	1,2,3,5-四甲基苯**	Y=0.345 9X-0.002 0	0.999 3	3~10 000	2.85±0.03	3.37±0.14
	7	2,4-二叔丁基酚**	Y=0.606 6X-0.025 8	0.999 6	3~10 000	2.72±0.07	5.74±0.43
	1	4,6-二甲基十二烷	—	—	—	2.48±0.25	3.07±0.29
	2	2,6,10-三甲基十二烷	—	—	—	4.56±0.30	3.89±0.31
	3	2,6,10-三甲基十五烷	—	—	—	9.10±0.40	9.30±0.79
烯炔类	4	姥蚱烷**	Y=0.275 9X-0.017 2	0.999 5	3~10 000	11.17±0.83	16.79±0.55
	5	3-甲基十七烷**	—	—	—	3.16±0.13	4.99±0.22
	6	植烷*	—	—	—	16.67±1.31	20.45±0.93
	1	蒎烯**	Y=0.256 7X+0.001 9	0.999 7	3~10 000	1.67±0.11	2.44±0.11
	2	3,5,5-三甲基-2-己烯	—	—	—	2.58±0.34	3.32±0.49
醇类	3	柠檬烯**	Y=0.125 6X-0.000 1	0.999 4	3~10 000	10.32±0.43	15.25±1.24
	4	1-十三烯**	Y=0.236 0X-0.022 9	0.999 4	3~10 000	39.45±2.99	58.08±5.34
	5	α-柏木烯*	Y=0.471 8X-0.051 6	0.999 0	3~10 000	9.93±0.16	10.89±0.52
	1	1-辛烯-3-醇**	Y=0.573 7X-0.070 1	0.999 8	3~10 000	4.59±0.02	5.07±0.16
	2	2-乙基己醇	Y=0.365 7X-0.040 0	0.999 4	3~10 000	5.08±0.05	5.39±0.20
酯类	3	α-松油醇**	Y=0.149 9X-0.005 0	0.999 1	3~10 000	3.44±0.09	—
	4	十四醇	Y=0.173 9X-0.007 3	1.000 0	3~10 000	13.63±0.84	15.00±0.97
	5	1-十六醇**	Y=0.006 4X+0.000 3	0.999 9	3~10 000	104.61±2.77	168.24±4.84
酸类	1	壬酸**	—	—	—	7.56±0.40	15.99±0.65
	2	十四酸*	—	—	—	8.59±1.12	11.34±0.67
	3	十六酸**	—	—	—	196.16±16.05	371.42±34.92
酮类	1	2,3-戊二酮**	—	—	—	3.41±0.14	6.17±0.02
	2	3-羟基-2-丁酮**	Y=0.443 6X-0.036 3	0.999 7	3~10 000	7.11±0.15	54.98±1.61
	3	2,3-辛二酮**	—	—	—	—	2.39±0.15
脂类	1	乙酸丁酯*	—	—	—	7.04±0.29	7.94±0.33
	2	棕榈酸乙酯	Y=0.313 1X-0.045 2	0.999 7	3~10 000	7.13±0.23	10.24±1.13

注：\*.组间差异显著（ $P<0.05$ ）；\*\*.组间差异极显著（ $P<0.01$ ）。  
—无标准曲线、无法计算含量，下同。

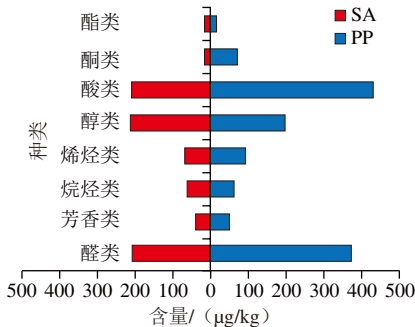


图4 低盐发酵大黄鱼的挥发性风味化合物含量

Fig. 4 Contents of volatile flavor compounds in low-salt fermented large yellow croaker

2.4 低盐腌制大黄鱼和戊糖片球菌发酵大黄鱼的OAV分析

OAV可以评估挥发性风味化合物对鱼肉风味的贡

献， $OAV \geq 1$ 表明该化合物对风味贡献显著，OAV越大则贡献越大<sup>[26]</sup>。如表3所示，SA组中 $OAV \geq 1$ 的化合物有13种，包括醛类11种、醇类1种及烯炔类1种，因此醛类、醇类和烯炔类对大黄鱼风味贡献较大，这些化合物OAV大小排序为(E,E)-2,4-癸二烯醛>癸醛>(E,Z)-2,6-壬二烯醛>辛醛>壬醛>己醛>(E,E)-2,4-庚二烯醛>1-辛烯-3-醇>庚醛>十二醛>2-甲基戊醛>十一醛>柠檬烯。相比于SA组，PP组中 $OAV \geq 1$ 的化合物增加了(E)-2-壬烯醛、3-羟基-2-丁酮和2,3-戊二酮，且大部分 $OAV \geq 1$ 的化合物OAV提高并对风味贡献增强；其中，3-羟基-2-丁酮、己醛及庚醛等的OAV增长幅度较大，是SA、PP组风味差异的关键成分。这些化合物多为醛类，研究表明醛类是不饱和脂肪酸双键氧化生成氢过氧化物和甘油三酯自动氧化降解的产物，其产生与鱼类脂质构成有关，具有气味加合作用，气味阈值低、易被感知<sup>[44]</sup>。醛类在低浓度时呈青草味、水果味，在高浓度时会呈鱼腥味或油脂味，壬醛和庚醛等在较高浓度时可呈现油脂味<sup>[45]</sup>。结合感官评价和定量结果可知，戊糖片球菌可促进己醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛等化合物的生成，使大黄鱼青草味减弱、油脂味增强。

表3 低盐发酵大黄鱼挥发性风味化合物的OAV

Table 3 OAV of volatile flavor compounds in low-salt fermented large yellow croaker

序号	挥发性风味 化合物	RT/min	RI <sup>a</sup>	嗅觉阈值/ (μg/kg)	OAV	
					SA	PP
1	2,3-戊二酮	4.596	—	5.13 <sup>[46]</sup>	0.665 7	1.202 2
2	3-羟基-2-丁酮	4.878	—	14 <sup>[47]</sup>	0.507 7	3.927 3
3	2-甲基戊醛	5.973	—	1.6 <sup>[48]</sup>	1.319 8	1.509 5
4	乙酸丁酯	6.304	—	58 <sup>[49]</sup>	0.121 5	0.136 8
5	甲苯	6.388	—	527 <sup>[48]</sup>	0.020 8	0.027 1
6	己醛	7.678	—	4.5 <sup>[50]</sup>	9.834 9	18.311 6
7	乙苯	9.873	849	2 205.25 <sup>[49]</sup>	0.001 2	0.002 2
8	对二甲苯	10.293	859	68.6 <sup>[49]</sup>	0.050 2	0.061 8
9	邻二甲苯	11.145	881	450.23 <sup>[49]</sup>	0.018 8	0.022 5
10	庚醛	11.666	894	2.8 <sup>[50]</sup>	2.920 6	6.362 9
11	蒎烯	12.834	923	100 <sup>[48]</sup>	0.016 7	0.024 4
12	苯甲醛	14.062	953	750.89 <sup>[48]</sup>	—	0.011 5
13	1-辛烯-3-醇	14.970	975	1 <sup>[51]</sup>	4.588 7	5.073 1
14	2,3-辛二酮	15.133	979	2.52 <sup>[48]</sup>	—	0.949 5
15	辛醛	15.810	995	0.59 <sup>[50]</sup>	36.157 4	75.095 7
16	(E,E)-2,4-庚二烯醛	16.150	1 004	3 <sup>[26]</sup>	6.051 1	7.100 3
17	柠檬烯	16.790	1 020	10 <sup>[26]</sup>	1.032 3	1.525 4
18	2-乙基己醇	16.893	1 023	246 <sup>[26]</sup>	0.020 6	0.021 9
19	壬醛	19.763	1 096	1.1 <sup>[49]</sup>	11.139 1	23.840 0
20	1,2,3,5-四甲基苯	20.274	1 110	61 <sup>[48]</sup>	0.046 8	0.055 2
21	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	21.551	1 144	0.16 <sup>[26]</sup>	134.656 5	139.064 8
22	(E)-2-壬烯醛	21.824	1 152	0.19 <sup>[48]</sup>	—	173.703 7
23	α-松油醇	23.145	1 187	330 <sup>[26]</sup>	0.010 4	—
24	癸醛	23.523	1 197	0.1 <sup>[51]</sup>	177.746 8	214.402 2
25	壬酸	25.965	1 268	4 600 <sup>[48]</sup>	0.001 6	0.003 5
26	1-十三烯	26.549	1 284	2 000 <sup>[48]</sup>	0.019 7	0.029 0
27	十一醛	27.026	1 298	12.5 <sup>[47]</sup>	1.178 4	1.353 8
28	(E,E)-2,4-癸二烯醛	27.382	1 310	0.027 <sup>[52]</sup>	243.269 0	231.947 9
29	4,6-二甲基十二烷	27.477	1 314	10 000 <sup>[48]</sup>	0.000 2	0.000 3
30	十二醛	29.935	1 400	10 <sup>[48]</sup>	1.618 5	1.863 5
31	2,4-二叔丁基酚	32.346	1 499	200 <sup>[14]</sup>	0.013 6	0.028 7
32	十四醇	35.849	1 667	5 000 <sup>[48]</sup>	0.002 7	0.003 0
33	十四酸	37.418	1 750	10 000 <sup>[48]</sup>	0.000 9	0.001 1
34	十六烷酸	40.907	1 952	10 000 <sup>[53]</sup>	0.019 6	0.037 1
35	棕榈酸乙酯	41.319	1 977	1 000 <sup>[54]</sup>	0.007 1	0.010 2



2.5 戊糖片球菌发酵前后低盐腌制大黄鱼的AEDA

AEDA可评估SA、PP组中挥发性风味化合物及对鱼肉整体风味贡献程度,结果如表4所示。SA组鉴定出18种挥发性风味化合物,包含醛类5种、烷烃类4种、烯炔类4种、醇类3种、芳香类2种;PP组鉴定出17种挥发性风味化合物。相比于SA组,PP组中增加了(E)-2-壬烯醛、癸醛,而减少了壬醛、 $\alpha$ -松油醇及1-十三烯,PP组中FD较大的化合物有(E,Z)-2,6-壬二烯醛、2,4-二叔丁基酚、3-甲基十七烷、1-辛烯-3-醇、姥鲛烷等。为直观表示戊糖片球菌对大黄鱼风味化合物的影响,绘制挥发性风味化合物FD变化哑铃图。如图5所示,经戊糖片球菌发酵后,低盐腌制大黄鱼中的壬醛、 $\alpha$ -松油醇、1-十三烯等FD降低甚至未被GC-O感知,而1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛等发酵后FD增高,且被感知为青草味、甜香味等,这可能由于戊糖片球菌发酵引起大黄鱼风味前体氧化、降解导致这些重要风味化合物含量增高<sup>[55]</sup>,这与感官结果相一致。相关研究表明1-辛烯-3-醇、(E)-2-壬烯醛、癸醛等被归类于鱼腥味,但GC-O感知为青草味、苦味,这可能由于PP组中挥发性风味化合物间的协同效应导致风味变化<sup>[52]</sup>。其中2,4-二叔丁基苯酚、姥鲛烷、3-甲基十七烷的FD高达64,但其气味阈值大,对大黄鱼风味品质影响较小<sup>[45]</sup>。

表4 低盐发酵大黄鱼挥发性风味化合物的AEDA						
Table 4 AEDA of volatile flavor compounds in low-salt fermented large yellow croaker						
序号	挥发性风味化合物	RT/min	RI <sup>a</sup>	气味描述	FD	
					SA	PP
1	庚醛	11.67	894	青草味、油脂味	2	8
2	癩烯	12.83	923	米香	8	8
3	3,5,5-三甲基-2-己烯	14.67	967	青草味、米香	2	2
4	1-辛烯-3-醇	14.97	975	蘑菇味、铁锈味	8	16
5	4-乙基邻二甲苯	18.93	1 075	青草味、塑料味	2	4
6	壬醛	19.76	1 096	油脂味	2	—
7	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	21.60	1 144	脂肪味、黄瓜味	8	64
8	(E)-2-壬烯醛	21.80	1 152	脂肪味、苦涩味	—	2
9	$\alpha$ -松油醇	23.14	1 187	青草味	2	—
10	癸醛	23.52	1 197	脂肪味、青草味	—	8
11	1-十三烯	26.55	1 284	甜香	2	—
12	十一醛	27.03	1 298	青草味	2	4
13	(E,E)-2,4-癸二烯醛	27.38	1 310	青草味、霉味	8	4
14	4,6-二甲基十二烷	27.50	1 314	青草味	8	2
15	2,6,10-三甲基十二烷	29.04	1 368	塑料味、甜香	4	4
16	$\alpha$ -柏木烯	30.13	1 408	青草味、甜香	16	8
17	2,4-二叔丁基苯酚	32.35	1 499	塑料味	16	64
18	十四醇	35.80	1 667	青草味、甜香	8	2
19	姥鲛烷	36.34	1 692	青草味	32	16
20	3-甲基十七烷	37.58	1 759	青草味、甜香	16	32

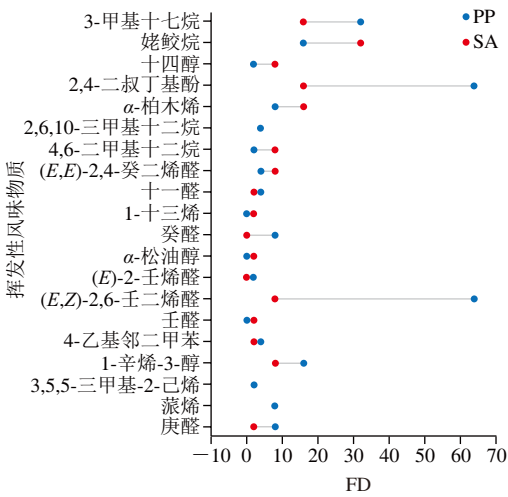


图5 低盐发酵大黄鱼的FD因子哑铃图  
Fig. 5 Bar graph of FD factors in low-salt fermented large yellow croaker

OAV理论数据与AEDA实际感官数据存在差异,如癩烯、 $\alpha$ -松油醇FD较高,但其OAV<1; $\alpha$ -柏木烯、十四醇FD较高,但无气味阈值无法计算OAV。这可能由于GC-O以空气为介质感知,OAV基于香气成分在水中的阈值计算,且计算OAV时难以排除气味成分间的相互作用,导致结果会产生差异<sup>[56]</sup>。OAV与AEDA结合可更全面鉴定样品中关键成分,OAV $\geq 1$ 且FD $\geq 1$ 的8种挥发性风味化合物被确认为戊糖片球菌发酵大黄鱼中关键气味活性化合物,包括庚醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、十一醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛。本研究结果与臧金红<sup>[57]</sup>应用植物乳杆菌发酵酸鱼得到乳酸乙酯、2-辛烯醛及(E,E)-2,4-癸二烯醛等9种差异风味物质的结果相似。

2.6 戊糖片球菌发酵前后低盐腌制大黄鱼的游离脂肪酸分析及相关性途径分析

新鲜大黄鱼富含多不饱和脂肪酸,对其风味形成有重要作用。如表5所示,SA、PP组均检测到19种游离脂肪酸,包含7种饱和脂肪酸、7种单不饱和脂肪酸和5种多不饱和脂肪酸;其中,单不饱和脂肪酸含量最高,分别占SA和PP组总游离脂肪酸含量的57.70%和55.01%,其次是多不饱和脂肪酸(SA组为22.63%,PP组为27.03%) and 饱和脂肪酸(SA组为19.68%,PP组为17.96%)。SA和PP组中含量较高的脂肪酸为(Z)-9-十六烯酸、十六烷酸、(E)-9-十八碳烯酸、4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸。与SA组相比,PP组的游离脂肪酸含量基本上均增加,戊糖片球菌可以提高大黄鱼发酵过程中脂肪酶、脂氧合酶的活性,利于脂肪氧化分解和游离脂肪酸的释放<sup>[58]</sup>。

表 5 低盐发酵大黄鱼的脂肪酸含量

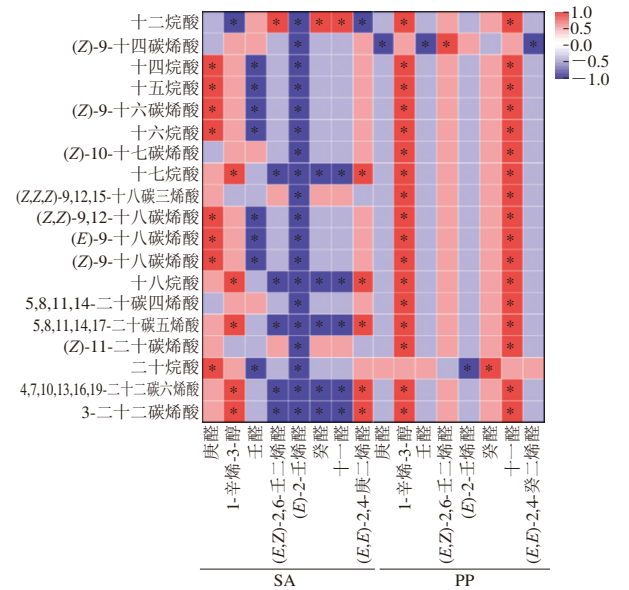
序号	RT/min	脂肪酸	标准曲线方程	R <sup>2</sup>	含量/(μg/g)	
					SA	PP
1	15.496	十二烷酸	Y=261 503.25X-37 220.53	0.999 6	0.02±0.01	0.03±0.01
2	19.003	(Z)-9-十四碳烯酸**	Y=98 248.05X-19 652.51	0.999 2	0.04±0.01	0.06±0.01
3	19.267	十四烷酸**	Y=276 450.5X-54 393.81	0.999 6	0.31±0.02	0.59±0.09
4	22.129	十五烷酸**	Y=282 546.75X-47 267.23	0.999 3	0.05±0.01	0.10±0.02
5	25.027	(Z)-9-十六碳烯酸**	Y=80 412.80X-18 901.99	0.999 1	4.42±0.31	8.46±1.19
6	25.853	十六烷酸**	Y=267 940.00X-98 271.95	0.999 5	3.45±0.20	6.31±0.80
7	29.258	(Z)-10-十七碳烯酸**	Y=85 555.25X-16 655.56	0.999 8	0.16±0.02	0.32±0.05
8	30.400	十七烷酸**	Y=271 653.20X-56 638.15	0.999 2	0.06±0.01	0.11±0.02
9	33.449	(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸*	Y=15 949.90X-23 999.15	0.999 4	0.09±0.03	0.16±0.05
10	33.947	(Z,Z)-9,12-十八碳烯酸**	Y=94 431.00X-23 138.17	0.999 2	0.82±0.14	1.42±0.20
11	34.294	(E)-9-十八碳烯酸**	Y=121 622.83X-66 905.93	0.999 2	6.65±0.43	12.31±1.48
12	34.594	(Z)-9-十八碳烯酸**	Y=77 223.15X-17 597.70	0.999 4	1.44±0.12	2.90±0.40
13	35.755	十八烷酸**	Y=251 107.25X-60 772.68	0.999 6	0.66±0.04	1.30±0.18
14	43.320	5,8,11,14-二十碳四烯酸**	Y=80 684.15X-28 048.43	0.999 9	0.23±0.02	0.58±0.10
15	43.655	5,8,11,14,17-二十碳五烯酸**	Y=88 317.80X-23 431.17	0.999 3	1.05±0.09	2.54±0.40
16	45.335	(Z)-11-二十碳烯酸**	Y=130 307.20X-24 314.66	0.999 4	0.46±0.03	1.10±0.16
17	46.456	二十烷酸**	Y=235 964.55X-40 619.81	0.999 7	0.05±0.01	0.10±0.01
18	50.899	4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸	Y=86 104.55X-25 088.27	0.999 9	2.51±0.25	6.58±1.08
19	52.814	13-二十二碳烯酸	Y=89 341.25X-19 313.20	0.999 4	0.33±0.03	1.01±0.13

注: \*\* 组间差异极显著 ( $P<0.01$ )。

为探究SA、PP组中游离脂肪酸和关键气味活性化合物的关系,采用Spearman相关性分析并结合相关文献、KEGG推测戊糖片球菌发酵大黄鱼中游离脂肪酸生成关键气味活性化合物的代谢途径,结果如图6、7所示。(Z)-9-十八碳烯酸、(Z,Z)-9,12-十八碳烯酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸等不饱和脂肪酸先由脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)催化氧化为氢过氧化物,再经氢过氧化物裂合酶(hydroperoxide lyase, HPL)催化裂解为短链醇和醛类<sup>[59]</sup>。1-辛烯-3-醇在SA组中与十二烷酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸、(Z)-11-二十碳烯酸呈负相关,而在PP组中呈显著正相关,这表明1-辛烯-3-醇(蘑菇味)可能由十二烷酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸、(Z)-11-二十碳烯酸在戊糖片球菌发酵过程中降解生成,进而促进PP组的蘑菇味提升。相关研究表明1-辛烯-3-醇可能由(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸、5,8,11,14-二十碳四烯酸氧化形成<sup>[60]</sup>,但本研究显示PP组的1-辛烯-3-醇还与饱和脂肪酸十二烷酸有关,这种差异可能由不同的加工过程导致<sup>[61]</sup>。(E,Z)-2,6-壬二烯醛在SA组中与(Z)-9-十四碳烯酸呈负相关,在PP组中呈显著正相关,因此戊糖片球菌发酵可能利于(Z)-9-十四碳烯酸降解生成(E,Z)-2,6-壬二烯醛(脂肪味),对PP组的脂肪味提升具有贡献。相关研究表明(E,Z)-2,6-壬二烯醛可能来自(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸的氧化降解<sup>[62]</sup>。(E)-2-壬烯醛为PP组的特有成分,仅与(Z)-9-十四碳烯酸呈正相关,与其他18种脂肪酸均呈负相关,这种负相关可能是部分游离脂肪酸含量相对于正相关游离脂肪酸含量的百分比降低导致<sup>[63]</sup>。(E)-2-壬烯醛(脂肪味)含量的增加与PP组的脂肪味提升

有关,相关研究表明(E)-2-壬烯醛的生成可能来自(Z,Z)-9,12-十八碳烯酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸等多不饱和脂肪酸氧化降解,且(E)-2-壬烯醛可由(E,Z)-2,6-壬二烯醛转化生成<sup>[62]</sup>。癸醛在SA组中与二十烷酸呈负相关,在PP组中呈显著正相关,推测PP组的癸醛含量升高可能与戊糖片球菌发酵引起二十烷酸降解有关。相关研究表明,癸醛为(Z)-9-十八碳烯酸氧化降解的产物,可提供脂肪味<sup>[60]</sup>,这与PP组脂肪味提升有关。(E,E)-2,4-癸二烯醛在SA组中与十七烷酸、十八烷酸、5,8,11,14,17-二十碳五烯酸、4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸、13-二十二碳烯酸呈显著正相关,在PP组中呈负相关,推测PP组中脂肪酸氧化降解生成(E,E)-2,4-癸二烯醛较少,且(E,E)-2,4-癸二烯醛可能转化成其他物质。(E,E)-2,4-癸二烯醛(青草味)含量的降低使PP组的青草味减弱,相关研究表明(E,E)-2,4-癸二烯醛可能来自(Z,Z)-9,12-十八碳烯酸等氧化降解<sup>[64]</sup>,(E,E)-2,4-癸二烯醛的降低可能与反醛醇反应生成己醛有关<sup>[65]</sup>。臧金红<sup>[57]</sup>研究发现,在酸鱼中5,8,11,14-二十碳四烯酸、4,7,10,13,16,19-二十二碳六烯酸是主要脂肪酸风味前体,与本研究结果不同,表明不同发酵剂差异化代谢成不同的风味前体,从而形成不同发酵产品的风味轮廓。

以上研究表明,SA和PP组中(Z)-9-十八碳烯酸、(Z,Z)-9,12-十八碳烯酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸、5,8,11,14-二十碳四烯酸等不饱和脂肪酸主要通过脂质氧化生成氢过氧化物为风味前体,继而发生氧化降解生成1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛及(E,E)-2,4-癸二烯醛等,这些关键气味活性化合物共同形成了戊糖片球菌发酵大黄鱼的典型风味轮廓,在发酵大黄鱼风味形成中起重要作用<sup>[66]</sup>。



红色代表正相关,蓝色代表负相关; \* 显著相关 ( $P<0.05$ )。  
图 6 低盐发酵大黄鱼中关键气味活性化合物与游离脂肪酸的相关性分析  
Fig. 6 Correlation analysis between key odor-active compounds and fatty acids in low-salt fermented large yellow croaker



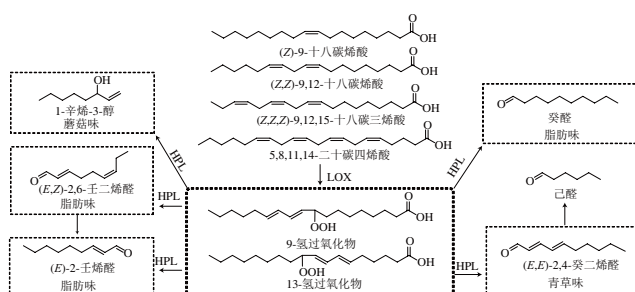


图7 戊糖片球菌发酵大黄鱼挥发性风味化合物的代谢途径

Fig. 7 Metabolic pathways of volatile flavor compounds in fermented large yellow croaker with *P. pentosaceus*

### 3 结论

本实验以低盐腌制并接种戊糖片球菌发酵大黄鱼为研究对象,利用SAFE-GC-MS、GC-O、OAV和AEDA等风味分子感官科学方法,研究了戊糖片球菌发酵对大黄鱼风味的影响。感官评价结果表明,戊糖片球菌可明显降低低盐发酵大黄鱼的青草味和鱼腥味,增强脂肪味和肉香味,提高可接受度。GC-MS结果表明,戊糖片球菌可增加低盐发酵大黄鱼中醛类、酮类的种类及含量,而醇类化合物种类减少,含量增加。OAV和AEDA结果表明,  $OAV \geq 1$  且  $FD \geq 1$  的8种关键气味活性化合物为庚醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛、十一醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛。Spearman相关性分析结合代谢途径表明,呈脂肪味、肉香味的1-辛烯-3-醇、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、(E)-2-壬烯醛、癸醛及(E,E)-2,4-癸二烯醛等关键气味活性化合物可能来自于(Z)-9-十八碳烯酸、(Z,Z)-9,12-十八碳烯酸、(Z,Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯酸等不饱和脂肪酸在戊糖片球菌发酵过程中发生的氧化、降解反应。本研究揭示了戊糖片球菌发酵对大黄鱼风味变化的影响规律,可为今后深入了解发酵鱼风味形成机制提供理论参考。

### 参考文献:

- [1] 王丹, 吴反修. 中国渔业统计年鉴. 2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023: 17.
- [2] 刘夏磊, 刘芯如, 王雨恬, 等. 鲈鱼干加工过程中热处理及内源酶对风味形成的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 220-226. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210513-152.
- [3] 赵茜, 陈剑, 李欢, 等. 预制水产品风味劣变机制及其调控方式研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 162-168. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221013-119.
- [4] 金火喜, 张治国, 郇海燕. 生物技术在水产品养殖、加工和保鲜中的应用[J]. 生物技术进展, 2013, 3(6): 389-392, 398. DOI:10.3969/j.issn.2095-2341.2013.06.02.
- [5] GAO P, WANG W X, JIANG Q X, et al. Effect of autochthonous starter cultures on the volatile flavour compounds of Chinese traditional fermented fish (Suan Yu)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2016, 51(7): 1630-1637. DOI:10.1111/ijfs.13134.
- [6] ZENG X F, XIA W S, JIANG Q X, et al. Effect of autochthonous starter cultures on microbiological and physico-chemical characteristics of Suan Yu, a traditional Chinese low salt fermented fish[J]. Food Control, 2013, 33(2): 344-351. DOI:10.1016/j.foodcont.2013.03.001.
- [7] 杨滔, 张晓东, 刘红梅, 等. 不同发酵剂对发酵猪肉香肠品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 101-109. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021030382.
- [8] 董婧琪, 王圆圆, 闫保国, 等. 水产品腥臭物质形成机理与脱腥技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(5): 189-194. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2022.05.028.
- [9] AASLYNG M D, MEINERT L. Meat flavour in pork and beef-from animal to meal[J]. Meat Science, 2017, 132: 112-117. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.04.012.
- [10] ZANG J H, XU Y S, XIA W S, et al. Correlations between microbiota succession and flavor formation during fermentation of Chinese low-salt fermented common carp (*Cyprinus carpio* L.) inoculated with mixed starter cultures[J]. Food Microbiology, 2020, 90: 103487. DOI:10.1016/j.fm.2020.103487.
- [11] 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.
- [12] GREGER V, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in apricots (*Prunus armeniaca*) by application of the molecular sensory science concept[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(13): 5221-5228. DOI:10.1021/jf0705015.
- [13] 马宁原, 姚凌云, 孙敏, 等. 基于GC-IMS和GC-MS分析不同发酵方式对黄桃酒香气成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 306-314. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220901-019.
- [14] 苏柯冉, 刘野, 何聪聪, 等. 三种萃取方法结合GC-O-MS分析香糟卤中挥发性香气成分[J]. 现代食品科技, 2015, 31(8): 340-347. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.8.053.
- [15] 张权, 李金林, 胡明明, 等. 基于电子鼻和溶剂辅助风味蒸发-气相色谱-质谱联用技术分析调味小龙虾挥发性风味特征差异[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(8): 242-252. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036446.
- [16] 蒋青香. 白芽奇兰茶叶关键香气成分的鉴定及其茶粉香气品质的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2020: 2-3. DOI:10.27720/d.cnki.gjmdx.2020.000284.
- [17] 李楠, 王锡昌, 郑福平. MAE-SAFE-GC×GC/HR-TOFMS法鉴定熟制中华绒螯蟹挥发性风味成分[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(4): 629-639. DOI:10.12024/jsou.20170301978.
- [18] 韩承义, 吴雄飞, 许斌福, 等. 2020年中国大黄鱼产业现状分析及发展建议[J]. 渔业研究, 2022, 44(4): 395-406. DOI:10.14012/j.cnki.fjsc.2022.04.011.
- [19] 张渤函, 李学鹏, 励建荣, 等. 基于特征挥发性气味物质的冷藏大黄鱼新鲜度预测模型构建[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 140-154. DOI:10.13831/j.cnki.issn.1673-0569.2022.02.004.
- [20] 张卿, 程文健, 陈丽娇. 自然发酵与人工接种发酵比较研究及展望[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(5): 46-47.
- [21] XIAO Y Q, LI P J, ZHOU Y, et al. Effect of inoculating *Lactobacillus pentosus* R3 on *N*-nitrosamines and bacterial communities in dry fermented sausages[J]. Food Control, 2018, 87: 126-134. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.12.025.
- [22] 彭健斌, 苏平, 林雨, 等. 应用于羊肉脱膻的三种发酵剂筛选及发酵特性研究[J]. 中国酿造, 2020, 39(12): 130-135. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2020.12.025.
- [23] 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.
- [24] 周长艳, 黄泽元, 田国军. 乳杆菌在腌制腊鱼制品中的应用[J]. 食品科学, 2012, 33(1): 215-218.
- [25] GAO P, JIANG Q, XU Y, et al. Aroma profiles of commercial Chinese traditional fermented fish (Suan yu) in Western Hunan: GC-MS, odor activity value and sensory evaluation by partial least squares regression[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 213-226. DOI:10.1080/10942912.2020.1716790.
- [26] WEI H C, WEI Y K, QIU X J, et al. Comparison of potent odorants in raw and cooked mildly salted large yellow croaker using odor-active value calculation and omission test: understanding the role of cooking method[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134015. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134015.
- [27] 曾欢, 陶宁萍, 张晶晶, 等. 生物发酵对大口黑鲈的脱腥效果[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(6): 1142-1152. DOI:10.12024/j.sou.20200903188.
- [28] AN Y Q, QIAN Y L, ALCÁZAR M A, et al. Comparative characterization of aroma compounds in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), Pacific whiting (*Merluccius productus*), and Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi by aroma extract dilution analysis, odor activity value, and aroma recombination studies[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(38): 10403-10413. DOI:10.1021/acs.jafc.9b07621.
- [29] VAN DEN DOOL H, KRATZ P D. A generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas-liquid partition chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 1963, 11: 463-471. DOI:10.1016/S0021-9673(01)80947-X.
- [30] 宋焕禄. 食品挥发性风味分析技术概论[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(4): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2023.04-001.
- [31] 刘建彬, 刘梦娅, 何聪聪, 等. 应用AEDA结合OAV值计算鉴定可液中关键气味活性化合物[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(9): 180-184. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2013.09.041.
- [32] ZHANG Y Y, TANG L, ZHANG Y, et al. Comparison of different volatile extraction methods for the identification of fishy off-odor in fish by-products[J]. Molecules, 2022, 27(19): 6177. DOI:10.3390/molecules27196177.
- [33] LI W R, WEN L, XIONG S B, et al. Investigation of the effect of chemical composition of surimi and gelling temperature on the odor characteristics of surimi products based on gas chromatography-mass spectrometry/olfactometry[J]. Food Chemistry, 2023, 420: 135977. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.135977.
- [34] 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.
- [35] 王莉娜, 汪薇, 任文彬, 等. 发酵脱腥法对鲮鱼汤脱腥效果的影响[J]. 食品工业, 2016, 37(7): 72-74.
- [36] 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.
- [37] 关君兰, 姚雨萱, 伍菱, 等. 轻度盐腌大黄鱼的气味特征及形成途径[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 235-244. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230220-189.
- [38] 孙丰义, 王丹, 陈海涛, 等. SPME和SAFE对比分析炸花椒油挥发性风味成分[J]. 精细化工, 2016, 33(1): 49-54; 61. DOI:10.13550/j.jxhg.2016.01.009.
- [39] 刘安齐, 郭全友, 杨絮, 等. 香糟大黄鱼混菌发酵工艺及物质成分变化研究[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(4): 46-51; 79. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2022.04.008.
- [40] 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. DOI:10.1016/j.fbio.2021.100971.
- [41] LI C P, WU J J, LI Y, et al. Identification of the aroma compounds in stinky mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) and comparison of volatiles during fermentation and storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(11): 2429-2437. DOI:10.1111/ijfs.12254.
- [42] 赵凤, 许萍, 曾诗雨, 等. 鲟鱼传统发酵过程中挥发性风味物质的分析评价[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 236-242. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180514-199.
- [43] 胡锦鹏. 乳酸菌发酵半干大黄鱼制备及其品质研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022: 30-32. DOI:10.27018/d.cnki.gfjnu.2022.000041.
- [44] 秦晓, 王锡昌, 陶宁萍. 养殖暗纹东方鲀腌制鱼肝中特征气味物质的鉴定[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 57-62; 68. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.14.003.
- [45] 姜璐, 宫璇, 郭梦雪, 等. 不同加工方式对水产品挥发性风味物质影响的研究现状[J]. 广州化工, 2020, 48(5): 37-41. DOI:10.3969/j.issn.1001-9677.2020.05.018.
- [46] 张晶晶, 王锡昌, 施文正. 白姑鱼和小黄鱼肉中挥发性风味物质的鉴定[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 206-213. DOI:10.3969/j.issn.1000-4440.2010.05.030.
- [47] LIU X L, DU X P, YANG Y F, et al. Study on the aroma formation of baked sea bass (*Lateolabrax japonicus*) via solvent-assisted flavor evaporation coupled with gas chromatography-mass spectrometry (SAFE-GC-MS) analysis[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 171: 114152. DOI:10.1016/j.lwt.2022.114152.
- [48] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 刘强, 冒德寿, 汤峨, 译. 北京: 科学出版社, 2015.
- [49] GIRI A, OSAKO K, OKAMOTO A, et al. Olfactometric characterization of aroma active compounds in fermented fish paste in comparison with fish sauce, fermented soy paste and sauce products[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 1027-1040. DOI:10.1016/j.foodres.2010.01.012.
- [50] ZHANG H W, XIONG S B, YU X Y, et al. Fishy odorants in pre-processed fish fillet and surimi products made from freshwater fish: formation mechanism and control methods[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 142: 104212. DOI:10.1016/j.tifs.2023.104212.
- [51] CHEN F X, SHEN L W, SHI X J, et al. Characterization of flavor perception and characteristic aroma of traditional dry-cured fish by flavor omics combined with multivariate statistics[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 173: 114240. DOI:10.1016/j.lwt.2022.114240.
- [52] ZHANG H Y, PU D D, SUN B G, et al. Characterization and comparison of key aroma compounds in raw and dry porcini mushroom (*Boletus edulis*) by aroma extract dilution analysis, quantitation and aroma recombination experiments[J]. Food Chemistry, 2018, 258: 260-268. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.03.056.
- [53] ZHANG X R, GUAN H, ZHAO Q, et al. Effect of thermal treatment on the flavor quality of Chinese spicy cabbage[J]. Food Control, 2023, 144: 109338. DOI:10.1016/j.foodcont.2022.109338.
- [54] 柴瑞雪, 安朝严, 刘涛, 等. 基于SAFE-GC-O-MS的“双红”干红葡萄酒关键香气物质分析[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 175-182. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210306-079.

- [55] 刘英丽, 杨梓妍, 万真, 等. 发酵剂对发酵香肠挥发性风味物质形成的作用及影响机制研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 284-296. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201012-085.
- [56] WANG B, MENG Q, XIAO L, et al. Characterization of aroma compounds of Pu-erh ripen tea using solvent assisted flavor evaporation coupled with gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(3): 618-626. DOI:10.1016/j.fshw.2021.12.018.
- [57] 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: 24-25. DOI:10.27169/d.cnki.gwqgu.2020.000070.
- [58] XU Y S, LI L, MAC REGENSTEIN J, et al. The contribution of autochthonous microflora on free fatty acids release and flavor development in low-salt fermented fish[J]. Food Chemistry, 2018, 256: 259-267. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.02.142.
- [59] SUN L B, XIN G, HOU Z S, et al. Biosynthetic mechanism of key volatile biomarkers of harvested *Lentinula edodes* triggered by spore release[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 9350-9361. DOI:10.1021/acs.jafc.1c02410.
- [60] DING A Z, ZHU M, QIAN X Q, et al. Effect of fatty acids on the flavor formation of fish sauce[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 134: 110259. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110259.
- [61] RASINSKA E, RUTKOWSKA J, CZARNIECKA-SKUBINA E, et al. Effects of cooking methods on changes in fatty acids contents, lipid oxidation and volatile compounds of rabbit meat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 110: 64-70. DOI:10.1016/j.lwt.2019.04.067.
- [62] XU Y X, JIANG Z D, DU X P, et al. The identification of biotransformation pathways for removing fishy malodor from *Bangia fusco-purpurea* using fermentation with *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Chemistry, 2022, 380: 132103. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.132103.
- [63] XIA C L, HE Y X, CHENG S, et al. Free fatty acids responsible for characteristic aroma in various sauced-ducks[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128493. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128493.
- [64] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J N, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: a review[J]. Food Research International, 2022, 157: 111385. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111385.
- [65] WANG T Z, ZHEN D W, TAN J, et al. Characterization of initial reaction intermediates in heated model systems of glucose, glutathione, and aliphatic aldehydes[J]. Food Chemistry, 2020, 305: 125482. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.125482.
- [66] LIU L, ZHAO Y H, LU S X, et al. Metabolomics investigation on the volatile and non-volatile composition in enzymatic hydrolysates of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100569. DOI:10.1016/j.fochx.2023.100569.