

## 水产品腥味来源、检测及去除技术研究进展

魏来<sup>1</sup>, 王芳<sup>1</sup>, 谭嘉慧<sup>1</sup>, 陈熹焱<sup>1</sup>, 张梓言<sup>1</sup>, 张福财<sup>2</sup>, 张玉芳<sup>2</sup>, 孙杰<sup>1\*</sup>

1.青岛大学生命科学学院, 山东 青岛 266071;

2.青岛花帝食品配料有限公司, 山东 青岛 266000;

**摘要:** 水产品含有大量优质蛋白质、不饱和脂肪酸和其他重要的营养物质,是人类健康食品的重要来源之一。然而,水产品的腥味限制了它的生产和消费。了解腥味物质的组成及其产生途径,对抑制腥味、提高水产品竞争力具有重要作用。水产品腥味来源包括吸收环境中挥发性物质、脂类氧化及氧化三甲胺分解等,主要有醇类、醛类、胺类等物质;腥味物质检测技术以色谱技术和色谱质谱联用技术为主;水产品去腥技术主要包括物理去腥、化学去腥和生物去腥三类。通过综述水产品腥味物质产生机制、检测技术和去除技术的最新研究进展,以期为我国水产品品质的提升和脱腥剂的研发提供参考。

**关键词:** 水产品腥味物质;腥味形成机理;腥味检测技术;脱腥技术

DOI:10.19586/j.2095-2341.2024.0049

中图分类号:Q953, S98

文献标志码:A

## Origins, Detection and Removal Technology of Off-flavor Compounds in Aquatic Products

WEI Lai<sup>1</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, TAN Jiahui<sup>1</sup>, CHEN Xiyi<sup>1</sup>, ZHANG Ziyan<sup>1</sup>, ZHANG Fucai<sup>2</sup>, ZHANG Yufang<sup>2</sup>, SUN Jie<sup>1\*</sup>

1.College of Life Science, Qingdao University, Shandong Qingdao 266071, China;

2.Qingdao Huadi Food Ingredients Co., Ltd., Shandong Qingdao 266000, China

**Abstract:** Aquatic products are one of the important sources of healthy food for human beings, which contain a large amount of high-quality protein, unsaturated fat acids and other important nutrients. However, the fishy smell of aquatic products limits their production and consumption. Therefore, understanding the composition and production pathways of fishy substances plays an important role in suppressing fishy odor and improving the competitiveness of aquatic products. The source of fishy smell of aquatic products includes absorption of volatile substances in the environment, lipid oxidation and decomposition of trimethylamine N-oxide, mainly including alcohols, aldehydes, amines, etc. The detection technology of fishy substances includes chromatography and gas chromatography-mass spectrometry. The deodorization technology of aquatic products mainly includes three categories: physical, chemical, and biological deodorization. This article reviewed the latest research progress in the mechanism, detection, and removal techniques of fishy substances in aquatic products, in order to provide reference for improving the quality of aquatic products and developing deodorants in China.

**Key words:** fishy substances in aquatic products; the mechanism of fishy odor formation; odor detection technology; deodorization technology

水产品是人类重要的营养健康食品。2020年, 世界水产养殖总产量达到创纪录的2.14亿t,其中

收稿日期:2024-03-13; 接受日期:2024-05-28

基金项目:青岛市科技惠民示范引导专项(23-2-8-xdny-6-nsh;23-3-8-xdny-1-nsh);青岛市自然科学基金项目(23-2-1-180-zyyd-jch);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2520;2023TSGC0892;)山东省重点研发计划项目(2021TZXD010);2020年烟台市“双百人才”项目。

联系方式:魏来 E-mail: 3234755476@qq.com; \*通信作者 孙杰 E-mail: sjj605@163.com

包括1.78亿t水生动物和3 600万t藻类。水产品年人均消费量(不包括藻类)为20.2 kg,是20世纪60年代人均消费量的2倍多<sup>[1]</sup>。我国水产品加工产业自改革开放以来发展迅速,加工能力、技术装备等快速提升,水产品加工空间分布日益均衡,产品质量逐渐提高。2020年,我国水产品加工总量达到2 100万t,比2010年增加约500万t。据2020年农业农村部发布的《中国农业展望报告(2020—2029)》预计,我国水产品产量总体将持续呈现缓慢增长的趋势,预计2029年产量将升至6 971万t,我国水产品行业存在巨大的上升潜力<sup>[2]</sup>。水产品种类多样,具有较高的营养价值。Golden等<sup>[3]</sup>整合了3 000多种食物原料,发现水生动物源性食物(aquatic animal-source foods, AASFs)通过补充微量营养元素(如维生素A、钙和铁)、 $\omega$ -3长链多不饱和脂肪酸以及替代其他肉类来体现自身营养价值。同时,对动物源性食品按照营养多样性进行排序,发现排名前7的动物源性食品均为水生动物源性食品,排名由高到低依次为小型中上层鱼、贝类(如蛤蜊、牡蛎等)、大型中上层鱼、水栖哺乳动物、鲑鱼、鲤鱼和头足类动物,说明水生动物源性食物营养多样性优于陆生动物源性食品。

风味是食品的主要特征之一,风味的好坏也是评价食品是否优质的重要标准,深刻影响其生产消费。新鲜的水产食品通常具有良好的风味,气味清淡宜人,有新鲜、植物香气和蜜露状香气<sup>[4]</sup>,这些独特的优良风味也得到了消费者的青睐<sup>[5]</sup>。但由于环境、微生物等因素影响,部分水产食品的腥味、异味等难闻气味问题未得到有效解决而成为制约水产品生产的一大障碍,如何去除这种腥味已成为热门的研究课题之一。分析这些腥味物质的组成和形成机制为腥味去除技术提供了理论依据,有助于提高水产品的风味品质,从而更加有效地利用水产品资源。相关研究已经对水产品腥味的检测和去除做了大量的工作,包括对腥味的来源、成因进行分析;对腥味物质组成进行检测,明确水产品腥味物质中主要化学成分;利用不同的物理、化学和生物原理研究去腥方法<sup>[6]</sup>。本文综述了近年来有关水产品腥味的研究进展,旨在总结水产品腥味的产生机理,对比不同的腥味检测及去除技术的特点并分析各自的利弊,为探索去除水产品腥味的有效方法提供理论参考。

## 1 水产品腥味物质种类

有研究表明,水产品腥味一般是由多种挥发性物质共同作用的结果。水产品中的挥发性物质包括醇类、醛类、酮类、烃类、土腥味类物质,以及少量的呋喃、硫醚、萘类、胺类等化合物<sup>[7]</sup>。其中,生物胺产生的异味,是鱼类变质过程中氧化三甲胺分解反应产生的,可以定义为氨味、辛辣或鱼腥味,三甲胺(trimethylamine, TMA)和二甲胺(dimethylamine, DMA)是导致难闻气味的最主要腥味物质<sup>[8]</sup>。

### 1.1 醛类物质

醛类的产生与水产品中脂类过氧化有关,例如,不饱和脂肪酸可分解产生挥发性醛化合物,其中己醛、辛醛、壬醛、(Z)-4-庚烯醛和2-甲基丁醛、3-甲基丁醛几乎存在于所有鱼类中<sup>[9]</sup>。多不饱和脂肪酸的氧化可以产生辛醛和壬二醛等<sup>[10]</sup>,主要表现为鱼腥味、脂肪味或草味。2-烯醛和2,4-烯醛含有 $\alpha$ 、 $\beta$ -不饱和羰基结构,通常具有极低的气味阈值和难闻的气味,因此它们在水产品整体气味分布中起着重要作用。Liang等<sup>[11]</sup>发现太平洋牡蛎中己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛等会产生鱼腥味,而戊醛和庚醛呈现腐臭味。

### 1.2 醇类物质

在酶作用下脂肪酸分解所得的羰基化合物经还原后得到不饱和醇类,如某些含有 $C_4$ - $C_{11}$ 的醇类挥发性物质会形成泥土或金属气味<sup>[12]</sup>。1-辛烯-3-醇阈值低( $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),是增加鱼腥味含量最高的化合物之一<sup>[13]</sup>。1-戊烯-3-醇具有鱼腥味、清香、叶香,它是牡蛎中产生主要气味的挥发性成分<sup>[14]</sup>。另外,蘑菇醇及1,7-辛二烯-3-醇也赋予水产品腥味<sup>[11-12]</sup>。

### 1.3 酮类物质

酮类物质主要是由单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA)、多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)等不饱和脂肪酸化合物分解而得到的产物,有些酮类物质与腥味物质同时存在时具有协同增效作用。例如,在海带样品中主要检测到的反式 $\alpha$ -紫罗兰酮、(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮和1-辛烯-3-酮<sup>[15]</sup>。2,3-戊二酮具有油漆味,苯乙酮、2-庚酮、3-壬酮、3-辛酮具有果香味,2,3-辛二酮具有奶油味,这些酮类物质与醛类反应会对腥

味起协同增效作用<sup>[16]</sup>,例如当己醛与酮类物质发生反应时,腥味会产生增强效应或有所改变<sup>[17]</sup>。

#### 1.4 胺类物质

贝类不良气味中的含氮化合物主要有三甲胺、二甲胺及吡啶等物质,与1-辛烯-3-醇共同作用会产生土腥味、金属味等不良气味<sup>[18]</sup>。海水鱼体内的氧化三甲胺不断地发生氧化还原反应产生三甲胺,具有刺激性、强烈的鱼腥状氨样气味<sup>[19]</sup>。

#### 1.5 含硫化合物

二甲基硫醚是一种微生物分解代谢产生的挥

发性含硫化合物,是海洋产品腥臭味的主要来源之一,主要呈现玉米味、海水味、青草味及蟹香味<sup>[18]</sup>。甲基硫醇和二甲基硫醇类物质存在于鲜鱼中,随储存时间延长,硫化氢、二甲基硫醚和二乙基硫醚等具有腐败味特征的硫化物含量不断增多。另外,不饱和脂肪酸和含硫氨基酸相互作用产生杂环硫化物<sup>[20]</sup>。Chung和Cadwallader在对熟虾、蟹肉风味的研究中发现了具有硫磺味和熟卷心菜味的直链或杂环硫化物<sup>[21]</sup>。

表1 常见腥味物质种类、产生机理及气味贡献

Table 1 Type, mechanism and odor contribution of common fishy substances

类别	腥味物质	气味贡献 <sup>[22]</sup>	嗅觉阈值/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	产生原因 <sup>[23]</sup>
胺类	三甲胺	鱼腥味、腐败味	2.40	氧化三甲胺的降解
醛类	乙醛	鱼腥味、青草味	4.50	n-9 MUFA(亚油酸)氧化
	庚醛	鱼腥味	2.80	n-6、n-9 PUFA 氧化(自动氧化)
	辛醛	青草味、油脂味	0.59	油酸、亚油酸氧化
	壬醛	脂肪香、青草香、油脂味、鱼腥味、柑橘味	1.10	n-9 PUFA 氧化(12-脂氧合酶作用)
	癸醛	脂肪、青味、黄瓜味	0.10	n-9 PUFA 氧化
	4-庚烯醛	鱼腥味、油脂味	4.20	n-3 PUFA 氧化
	(E)-2-辛烯醛	西瓜味、黄瓜味、油脂味	3.00	n-6 PUFA(花生四烯酸)氧化
	(E,E)-2,4-庚二烯醛	脂肪味、坚果味	15.40	n-9 MUFA(亚油酸)氧化
	(E,E)-2,4-壬二烯醛	黄瓜味	0.01	n-9 MUFA(亚油酸)氧化
醇类	2-乙基-1-己醇	温和的油性、甜、略带花香	1.28	n-6 PUFA 氧化
	1-戊烯-3-醇	青草味、蘑菇味	358.10	n-6 PUFA 氧化(15-脂氧合酶)
	2-甲基异莰醇	泥土味、土霉味	0.60	浮游藻类和放线菌产生
	土臭素	土味	0.90	细菌(尤其链霉菌)产生
酮类	2,3-辛二酮	金属味	12.00	脂质氧化或氨基酸降解
咪喃类	2-乙基咪喃	橡胶味、刺激性气味	2.30	亚油酸氧化
吡啶类	吡啶	发霉味、臭味	0.03	氨基酸脱羧,分解

## 2 水产品腥味形成机理

狭义的腥味仅指鱼腥味,而在实际研究中,腥味泛指水产食品中不良风味(如土腥味、霉味)的总和。这些不良气味产生的主要因素包括水、空气、包装或运输材料等污染、加工过程中配料不当、水产品本身的化学反应和微生物的生长繁殖等。这种不良气味大都源于多种化合物的混合,同种化合物除了表现单一气味,有时由于浓度差异等因素可能具有2种或2种以上的气味。

### 2.1 吸收环境中挥发性物质

**2.1.1 吸收水体微生物的代谢产物** 某些藻类<sup>[24]</sup>、粘细菌<sup>[25]</sup>和放线菌(如链霉菌)等会代谢产生二甲基异冰片(2-methylisoborneol, 2-MIB)、土臭素(geosmin, GSM)、 $\beta$ -环柠檬醛<sup>[26]</sup>等挥发性化学物质(图1)。蓝藻,特别是呈丝状的蓝藻,它产生的异味化合物种类占所有已知异味化合物种类的25%,其中异味物质的主要成分土臭素和2-甲基异冰片。蓝藻还通过发酵途径形成羟基酮等挥发性物质。除此之外,蓝藻如微囊藻参与类胡萝卜素降解产生了去甲基胡萝卜素(如 $\beta$ -环柠

檬醛)等物质形成腥味<sup>[24]</sup>。上述代谢产生的挥发性化学物质排泄到环境中,水生动物将这些次生代谢物或者含有次生代谢物的微生物细胞吸附入体内,在体内富集,从而让自身带有浓厚的腥

味。有研究显示,鳃吸收了最多的 GSM 和 2-MIB,且由于其具有亲脂性,GSM 和 2-MIB 浓缩和储存在富含脂质的组织(如皮下或内脏脂肪)中<sup>[25]</sup>。

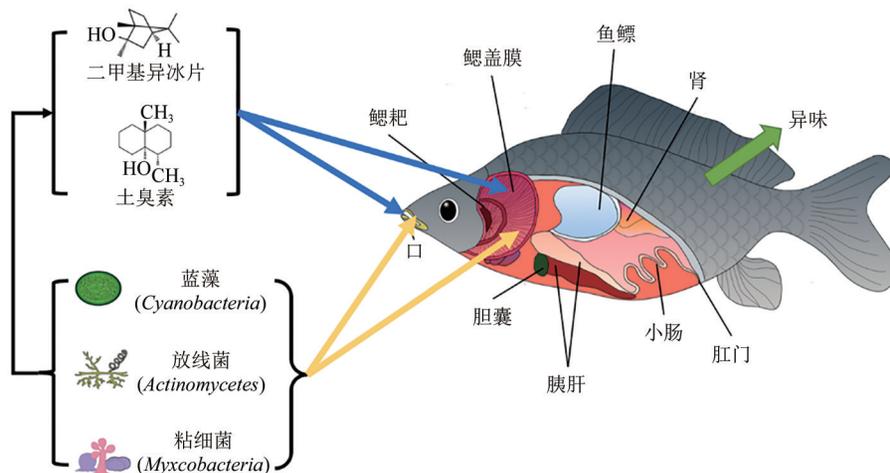


图1 土臭素和2-甲基异冰片进入鱼类体内的途径<sup>[25]</sup>

Fig. 1 The pathway by which geosmin and 2-methylisobornyl enter fish<sup>[25]</sup>

在在某些情况下,藻类等生物由于水体富营养化而大量生长,高浓度的代谢产物在鱼类体内(如肌肉组织)过多地积累,从而加重其腥味<sup>[27]</sup>。有研究发现,在净化环境中的鱼类和非净化环境中的鱼类腥味(如泥味、咸味等)有显著差异,在非净化环境的鱼类中可以检测到明显的“泥泞”味道和气味<sup>[28]</sup>。

**2.1.2 吸收污染物** 工厂排放的工业废水也是产生不良风味的关键因素。某些化学污染物,如萘及其衍生物、石油等,同样是腥味产生的原因。工厂废液中通过微生物降解的萘化合物,如2,6-二甲基萘和2-甲基萘,作为环境污染物在鱼类中积累。泄漏到水体中的石油烃类等挥发性有机成分可通过鱼体部位,如鱼皮、鱼鳃等吸收后在体内富含脂质的组织中积累<sup>[23]</sup>。贝类中常见的检出物如二甲苯、萘等物质也可能来自生存环境中污染物的转移<sup>[29]</sup>。生活污水也含

有引起异味的物质,如氯酚类化合物、硫醇、吡嗪等<sup>[30]</sup>。

## 2.2 脂类过氧化反应

脂类过氧化是使鲜鱼具有轻微的甜味、青草味、金属味和鱼腥味等风味的原因之一<sup>[30]</sup>。脂类过氧化产生的鱼腥味物质与脂肪含量有关。有研究发现,脂肪含量高的鱼比脂肪含量低的鱼含有更多的鱼腥味物质<sup>[28]</sup>。

脂类过氧化产生腥味物质的过程涉及一系列化学反应。水产品中的多不饱和脂肪经过自动氧化或酶促反应得到没有刺激性气味但不稳定的氢过氧化物,氢过氧化物进一步分解,产生小分子化合物,如醛、酮和羧酸等挥发性物质,从而引起水产品的腥味。以多不饱和脂肪酸二十碳五烯酸的生物化学反应为例(图2),该反应产生的不饱和羰基和醇具有独特风味(如2-己烯醛、3,6-壬二烯醛<sup>[31]</sup>具有草味)。

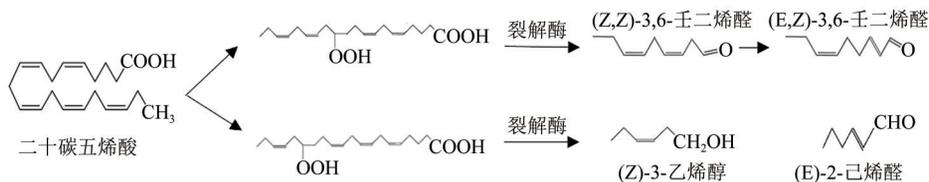


图2 二十碳五烯酸氧化为小分子化合物过程<sup>[23]</sup>

Fig. 2 Oxidation process of eicosapentaenoic acid to small molecule compounds<sup>[23]</sup>

### 2.3 氧化三甲胺的分解

氧化三甲胺(trimethylamine oxide, TMAO,  $(\text{CH}_3)_3\text{NO}$ )可由海水鱼内源性合成。TMAO本身不具有异味,但在特定条件(如微生物、酶、加热、高压等<sup>[32]</sup>)下分解产生的三甲胺、二甲胺和甲醛(formaldehyde, FA)等物质具有强烈的腥味(图3),这一过程对于保持海水鱼体内pH和渗透压调节稳定方面起着重要作用<sup>[23]</sup>。与其他大

多数甲胺一样,TMAO来源于胆碱的三甲基胺基团。海洋动物肠道中的细菌可降解胆碱<sup>[33]</sup>产生TMAO,且由于其将乳酸作为碳源的偏好,还可将乳酸作为电子供体将氧化三甲胺还原为三甲胺<sup>[34]</sup>。这些过程也是产生鱼腥味的原因,它们与水产动物体内的 $\delta$ -氨基戊酸、六氢吡啶等物质共存时,会使水产品的腥臭味大大增强<sup>[7]</sup>。

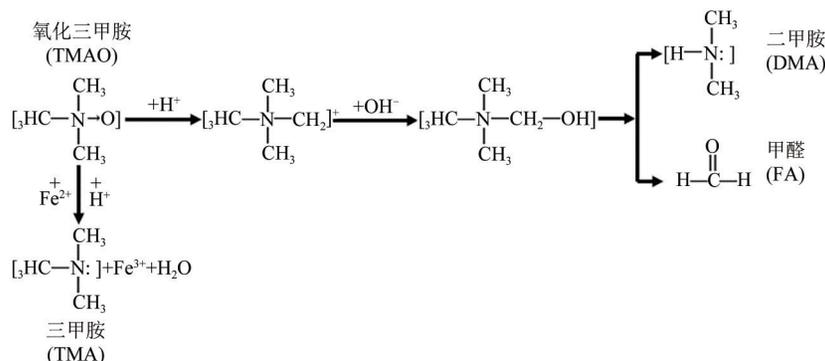


图3 氧化三甲胺的分解途径<sup>[32]</sup>

Fig. 3 The decomposition pathway of trimethylamine N-oxide<sup>[32]</sup>

### 2.4 蛋白质及游离氨基酸的降解

在加工和储存过程中,水产品中的蛋白质被降解为小分子多肽和氨基酸等中间产物,它们在内源蛋白酶和微生物代谢产生的酶的作用下发生脱氨和脱羧反应,生成具有腥臭味的醛、醇、酸及酯、氨及胺类、吡啶、硫醇及硫化物等挥发性产物。例如,有研究表明亮氨酸和异亮氨酸可降解生成3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、苯甲醛、苯乙醛等物质,进一步导致腥臭味产生<sup>[35]</sup>。

### 2.5 其他酶反应

除了脂类过氧化反应,其他酶促反应也参与催化水产品中腥味物质的产生。例如,水产动物体内的类胡萝卜素中硫和含氮的前体等物质被酶催化分解为肽和氨基酸后,脱羧和脱氨基形成腥味物质,如存在于鱼皮黏液及血液内的 $\delta$ -氨基戊酸、 $\delta$ -氨基戊醛和六氢吡啶类等腥味前体物质,会在酶的催化下生成鱼腥味物质<sup>[6]</sup>。此外,鱼皮和内脏由于含有更多的酶,通常比鱼片含有更多的鱼类腥味物质<sup>[28]</sup>。

## 3 水产品腥味检测技术研究进展

由于水产品中腥味物质都是痕量存在的,并

且腥味物质是挥发性成分(和半挥发性成分)的混合物,所以腥味物质检测中提取、富集和净化等一系列前处理显得尤为重要。本节对腥味物质前处理方法和检测技术进行了介绍,并进行了优缺点的对比(表2),以便于在生产和实验中选择更加适合的方法。

### 3.1 前处理方法

**3.1.1 吹扫捕集技术** 吹扫捕集技术(purge and capture technique, PT)集收缩、收集于一体,其理论上是动态的顶空技术,使用流动的氦气、氮气或者其他惰性气体将样品中的腥味物质“吹扫”并用捕集器将有机物进行“捕集”<sup>[36]</sup>。吹扫捕集技术具有腥味物质取样量少、操作自动化程度高、提取收集效率高等优点<sup>[37]</sup>,能够保证样品不被污染。Arnaud Hallier通过在200℃下加热捕集器来热解吸鱼片中的挥发性化合物,在250℃进行气相色谱仪检测,得到65种挥发性化合物<sup>[38]</sup>。

**3.1.2 同步蒸馏萃取法** 同步蒸馏萃取法(simultaneous distillation extraction, SDE)由Likens等<sup>[39]</sup>提出。该方法同时进行水蒸气蒸馏和溶剂萃取,少量溶剂就可以萃取大量的样品,然后利用溶剂和水的比重差异分离后浓缩<sup>[39-41]</sup>,适用于半挥发性与挥发性腥味物质的分离。Serkan等<sup>[42]</sup>采用二氯

表2 水产品腥味检测技术

Table 2 Detection techniques for odor from aquatic products

分析技术	名称	优点	缺点
前处理技术	吹扫捕集技术	前处理无需使用有机溶剂,取样量少,富集率高,干扰小	容易形成泡沫,给仪器带来负担,易交叉污染
	同时蒸馏提取法	重复性、萃取量、定性定量效果优越,操作与设备简单	高沸点组分萃取效果较差
	顶空分析法	适用范围较广,操作简单	单一使用该方法无法收集完全
	固相微萃取法	收集速度快,结果可靠	单一使用该方法不能真实地反映挥发性成分的比例
	微波蒸馏和真空蒸馏技术	操作性好,可以提取更多的物质	试验器材和试验条件要求高
检测技术	气相色谱技术	提纯效率较快,操作简单	定性分析水平较差,存在一定的局限性
	气相色谱-质谱联用技术	可以快速分离待测组分,能定性、定量分析	无法确定单个水产品的风味物质对整个鱼腥味的的作用
	气相色谱-嗅觉-质谱法	对可测组分进行高效定量、定性分析,可以确定某个水产品的风味物质对整个鱼腥味的的作用	成本较高
	感官评价法	实用性强,灵敏度高,结果可靠	受外界的环境、人为因素影响较大
	气相色谱-嗅觉测量法	灵敏性强,检测更全面	操作要求高,需要专业的评价员
	电子鼻技术	结果全面细致,可包含味觉分析	单一使用该方法不能真实地反映挥发性成分的比例

甲烷同步蒸馏萃取法提取了野生金头鲷的挥发性成分,通过感官分析证明SDE提取的芳香提取物具有典型的鲷鱼气味。这些提取物中共鉴定和定量了46种化合物,主要为醛类和醇类物质。其中,癸醛和(E)-2-壬烯醛是产生鲷鱼香气的主要物质。

**3.1.3 顶空分析法** 顶空技术(dynamic headspace extraction, DHE)是一种简便有效地腥味物质的提取分析方法,依据腥味物质的不同特性,顶空分析法包括静态分析法和动态分析法。静态分析法适合分析挥发性较强的原料,挥发性较低的原料分析则适用于动态分析法。Anupam等<sup>[43]</sup>采用动态顶空萃取及嗅觉法(dynamic headspace extraction-gas chromatography-olfactometry, DHE-GC-O)法比较了大豆味噌(发酵大豆酱产品)、鱼味噌(鱼肉酱产品)、大豆酱油和鱼酱油中挥发性成分的差异,结果表明味噌类产品具有水果香和焦糖香,鱼酱油具有鱼腥味、奶酪香味、坚果香味和氨味。

**3.1.4 固相微萃取法** 固相微萃取法(solid-phase microextraction, SPME)是一种快速、无溶剂、兼容的样品制备技术,原理是利用微纤维使分析物通过外层材料(吸附剂)从样品中被吸附和提取。SPME主要分为膜保护萃取、顶空萃取和直接萃

取。SPME相较其他方法具备的优势主要体现在更快的收集速度和更准确的结果。Geng等<sup>[44]</sup>对鲢鱼鱼糜采用固相微萃取及气相色谱-质谱技术对其腥味成分进行检测分析,确定鲢鱼鱼糜腥味物质的主要成分为醇类、酮类、烯类等。

**3.1.5 微波蒸馏技术和真空蒸馏技术<sup>[45]</sup>** 与其他前处理方法相比,微波蒸馏(microwave distillation)和真空蒸馏技术(vacuum distillation)对试验器材和试验条件有更严格的要求,但是这2种方法能够提取到一些用常规前处理方法难以获得的物质,如淡水鱼中的土腥味物质GSM和2-MIB。Selli等<sup>[43]</sup>利用真空蒸馏技术对虹鳟鱼肉的腥味物质进行提取,分析后发现虹鳟鱼肉的腥味物质主要是GSM和2-MIB。Zhu等<sup>[44]</sup>和Elhindi等<sup>[43]</sup>利用微波蒸馏-固相微萃取-气相色谱-质谱方法(microwave distillation-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, MD-SPME-GC-MS)检测出鲶鱼中腥味物质GSM和2-MIB的含量分别为0.043和0.008  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

### 3.2 检测方法

**3.2.1 气相色谱技术** James和Martin在1952年提出了气相色谱法(gas chromatography, GC)。气

体(氢、氮、氢等)作为流动相,通过试样中各组分在色谱柱中的流动相和固定相间具有不同的分配系数,从而实现组分的分离。流动相将气化的试样带入色谱柱中,柱中固定相与试样各组分作用力存在差异,使各组分流出时间不同,从而实现了组分分离。组分先后离开色谱柱进入检测器,其产生的离子流信号经放大后,在记录器上描绘出各组分的色谱峰。

气相色谱技术是一种分析非极性和极性、非挥发和挥发腥味物质并且不需要考虑化学物质类型的一种方法<sup>[46]</sup>。在腥味挥发物质的定量和定性分析中,气相色谱法应用十分广泛,已经成为一种极为重要的水产品痕量特征和风味物质的测量方法。例如Lundstrom<sup>[46]</sup>利用气相色谱技术对水产品中二甲胺和三甲胺进行了定量测定。Odukoya等<sup>[47]</sup>采用GC研究了煮制、晒制和烟干3种加工方式对水花鱼挥发性成分的影响,结果揭示了在3个过程中烯烃、炔烃、醇、酮、酸、酯、胺、含硫及杂挥发性化合物的生成,发现沸腾和烟雾干燥可以有效地去除鱼样中检测到的3种胺类物质,包括致癌的N-亚硝基二甲胺。

**3.2.2 气相色谱-质谱联用技术** 气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectroscopy, GC-MS)是GC-MS的核心部分,分析仪器是由气相色谱仪经接口与质谱计连接构成。随着色谱、质谱技术的不断成熟和完善,在食品挥发性物质的检测分析中发挥着重要作用。气相色谱法分离效率高,并且可以定量分析待测样品;质谱法具有灵敏度高、定性分析的优势。因此,气相色谱-质谱联用技术可以实现对待测混合样品的定性、定量分析。

研究人员通过固相微萃取技术与GC-MS联用,测定了烟熏鳕鱼和剑鱼中的挥发性成分,分别检测出79种和71种挥发性成分<sup>[36]</sup>。Poddaturi等<sup>[48]</sup>使用气相色谱-质谱仪测定了用动态顶空法收集到的挥发性成分样品,通过数据处理以及质谱匹配得到了鱼类中10种化合物、浮游植物中7种化合物和鱼饲料中4种化合物,其余化合物使用Wiley的MS库建议进行了初步鉴定,并使用文献中的RI值进行了确认。

**3.2.3 气相色谱-嗅觉-质谱联用技术** 气相色谱-嗅觉-质谱法(gas chromatography-olfactometry-mass spectroscopy, GC-O-MS)将3种分析仪器联用,嗅觉辨析仪和质谱检测器平行连接于气相检测器。

腥味挥发性化合物组分经气相分析仪中的毛细管柱被分离成两路,一路进入嗅辨仪完成呈味特征的分析;另一路进入质谱检测器进行定性定量分析。该方法灵敏性强,对腥味物质的检测更全面。Selli等<sup>[49]</sup>提取出虹鳟鱼肉中的腥味物质成分,然后利用GC-O-MS对腥味物质进行分析。感官分析表明,通过真空蒸气蒸馏获得的芳烃提取物代表虹鳟鱼的气味。通过嗅觉评估分析,虹鳟鱼肉中异味化合物为(E)-2-壬醛、2-乙基-1-己醇、2-甲基异冰片酚、土臭素、2-甲基萘和8-十七烯。Mahmoud&Buettner<sup>[50]</sup>使用溶剂辅助香味蒸气法提取香味物质,并使用GC-O-MS成功鉴定了德国虹鳟鱼肉和鱼皮中的75种挥发性化合物。

**3.2.4 感官评价法** 相较其他检测方法,感官评价法(sensory evaluation)最为便捷,可以直观地评定各成分的腥味表现,并以分值形式给出与腥味可接受度相关的建议,但缺点是无法对腥味成分进行定性分析。感官评价需要一组受过专业训练的感官评价人员对鱼腥味、草味、泥土味等常见腥味以相应权重进行评价并评分,腥味的总分为各项分数乘以相应权重的和,分值高低与腥味程度呈正相关。

Bremne等<sup>[51]</sup>通过选取长期从事品尝工作的人员对水产品进行评价,当对其进行加热或是冷冻处理之后进行品尝,从鱼香味、异味、韧性、水分等方面评估,得出质地、异味、风味是可接受性评估的重要因素<sup>[53]</sup>。Zimba等<sup>[52]</sup>组建了6名专业评估员的感官评价小组,将每个样品切碎并混合,然后再将其放入覆盖有瓷盖的单独瓷碗中,使用没有任何感官可检测MIB和GSM的样品作为参考,结果发现在大多数样本中,MIB和土臭素的异味强度明显高于其他气味。

**3.2.5 气相色谱-嗅觉测量法** 气相色谱-嗅觉测量法(gas chromatography olfactory, GC-O)是近年来新兴的一种感官分析技术,该方法将气相色谱的强分离能力和动物嗅觉的灵敏性相结合,从样品分离后的腥味物质通过嗅觉进行定量、定性分析。GC-O是分析主要挥发性物质及其对整体风味贡献的强大工具,该方法目前已经广泛应用于检测鱼中的异味化合物。Wang等<sup>[22]</sup>在GC-MS、电子鼻技术和GC-O-MS等方法中比较说明了GC-O所使用的方法,说明了该法在分析河豚鱼时所确定的6种特征气味物质。王锡昌等<sup>[53]</sup>采用固相微

萃取技术提取阳澄湖大闸蟹的挥发性物质,采用GC-O并运用直接强度法对挥发物进行分析,共嗅到17种气味特征。

**3.2.6 电子鼻技术** 电子鼻是通过模拟人类嗅觉分析挥发性成分的仪器,主要由气味提取器、气体传感器以及信号处理系统组成,具有识别单一和复合的气味的功能,在现代食品分析工具中具有重要地位。

由于电子鼻只能判断样品之间挥发性化合物是否相同,它经常与GC-MS联用,用于全面研究水产品加工储藏过程中挥发性化合物的变化。Wang等<sup>[23]</sup>利用电子鼻对草鱼背肉、腹肉、红肉、鱼肠、鱼皮中的鱼腥味化合物进行区分和比较,并利用了气相色谱-质谱联用技术进行辅助鉴定,以检测所含的营养物质和香味物质。

## 4 水产品腥味去除技术

水产品的去腥方法主要可分为物理去腥法、化学去腥法、生物去腥法和复合去腥法等,不同去腥方法的效果有所不同。物理法主要是通过一些物理方法来去除腥味;而化学法则是通过分解破坏腥味物质结构实现脱腥,去腥效果明显直接;生物去腥则是利用自然界的微生物来吸附或破坏腥味物质,利用价值大;复合去腥则是通过几种方法的结合去腥,能对特定的水产品进行去腥,专一性很强。本节就各种去腥方法进行分析和讨论,比较各种方法的具体效果和应用范围,以期水产品去腥提供参考。

### 4.1 物理去腥法

**4.1.1 掩盖法** 掩盖法是最传统的去除水产品腥味的方法,在烹饪(即煎、炸、煮等方面)和即食食品中应用广泛。生产中通常使用香辛料中某些芳香物质的独特味道来掩盖水产品中的特殊气味,比如葱中挥发油及葱蒜辣素,花椒和胡椒中川椒素,八角中茴香醚和茴香醇,桂皮中的挥发油、有机酸等<sup>[54]</sup>。这些挥发性成分可以减弱异味,增加香气。雷跃磊等<sup>[55]</sup>研究表明紫苏提取汁能较好地降低鳊鱼肉的腥味,紫苏汁添加浓度3%,脱腥20 min可以达到良好的脱腥效果。Meenatchisundaram等<sup>[56]</sup>将丁香和肉桂等香料融合在同化淀粉食用膜中,应用于白虾样品后减少了细菌计数及脂质氧化和氮基化合物的释放,使腥味挥发物质

减少,提高了消费者在感官评估中的接受度。 $\beta$ -环糊精是葡萄糖基转移酶作用下产生的直链淀粉环状低聚物,由7个吡喃葡萄糖单元通过 $\alpha$ -1,4糖苷键连接而成,具有一定的脱腥效果。环糊精分子具有内疏水、外亲水的环状结构,可以包裹鱼腥味物质,从而起到掩盖去腥的作用,且环糊精和乳酸菌粉的复合处理具有更好的除腥效果<sup>[57]</sup>。掩盖法操作方便简单,是最常使用的去除腥味的方法之一,但是有些情况下腥味去除并不彻底,因此有待进一步研究优化。

**4.1.2 水浴及水蒸气脱腥法** 水浴及水蒸气脱腥是将水产品置于70~100℃热水浴之中,利用较高温度以及水蒸气的作用将腥味物质溶入水中抑或是随水蒸气被带出。水蒸气脱腥除臭能够很大程度上减少腥味物质的主要成分,该方法的一个重要的优点是能够较大程度地保留多不饱和脂肪酸,去腥程度也较为明显。Wang等<sup>[58]</sup>通过采用真空同时水蒸气蒸馏的方法对水产品中的物质进行提取,并研究其对实验模型的汤鲜味的影响,从而起到去除腥味并发挥鲜味的作用。

**4.1.3 真空脱腥法** 真空脱腥通过营造真空环境,使产品中的腥味物质或前体物质蒸发,从而实现水产品脱腥,该方法主要用于固体水产品的脱腥除臭。这种方法的去腥效果一般,腥味去除不彻底,并且成本较高、操作复杂。

康孟利等<sup>[59]</sup>优化了龙头鱼真空油炸时的参数,从而改善了油炸后的龙头鱼的品质。新鲜的孟买鸭鱼可以在0.5% NaCl+0.1% HCl中浸泡1 h,流式洗涤45 min,预烤2 h,然后在105℃和0.92 MPa的真空下油炸40 min,得到清脆可口的鱼制品。

**4.1.4 吸附脱腥法** 吸附脱腥的原理是利用活性炭或沸石等物质通过吸附作用去除水产品中的腥味化合物。这种方法的优点是接触面积大,用于液体水产品脱腥时效果更好。Li等<sup>[60]</sup>使用粉末活性炭吸附反式2,4-庚二烯醛和反式2,4-癸二烯醛两种腥味物质,吸附模式和曲线与拟一阶和拟二阶动力学模型一致。同时,比较得出反式2,4-癸二烯醛更容易被吸附。Chung等<sup>[61]</sup>研究了各种微孔沸石对三甲胺的吸附,在低温条件下对生鱼油进行除臭,结果表明八方沸石(Si/Al=3)的比表面积的大小和微孔体积的不同是其对三甲胺强吸附能力的重要因素。氢丝光沸石(Si/Al=10)则是因其酸中的阳离子与三甲胺反应而对三甲胺具有

强吸附力。因此,吸附和除臭有时不仅需要物理作用,还需要一定的化学过程。Phattara等<sup>[19]</sup>选用13种植物叶片作为生物材料,探讨了其吸收三甲胺等恶臭气体成分的方法,研究结果表明这些植物叶片作为生物材料的吸附剂,对TMA表现出良好的吸附性能,效果显著,24 h内吸附量可达到100%(TMA浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。其中,以虎尾兰为最佳,吸附性能优于活性炭。植物叶片的蜡可吸附TMA约69%,剩下的可由纤维素和木质素吸附。

**4.1.5 微胶囊脱腥法** 微胶囊脱腥法是利用不同的壁材将腥味物质密封起来,成为固态微粒制品的一种技术。目前已有胶囊化胶原蛋白等健康产品面市。微胶囊去腥的方法不仅能掩盖腥味,还能减少环境对产品的影响,使产品的营养品质得到提升。Na等<sup>[62]</sup>用 $\gamma$ -CD:乳清蛋白:黄原胶的配比为0.8:0.2:0.5制备胶囊壁材,使腥味值降低到原来的30%,储存2~3周后氧化程度仍比原来低。此外有研究发现,若在壁材中加入环糊精、香精等遮嗅剂,可增强去腥作用<sup>[63]</sup>。

**4.1.6 辐照脱腥法** 辐照具有脱腥作用,其作用机理研究还不完全,可能跟高能电磁波有关<sup>[7]</sup>。高能量的电磁波能通过高能粒子的撞击直接破坏腥味蛋白质的结构组成,起到脱腥的作用,但是也会导致鱼等水产品本身营养蛋白被破坏。通常情况下,高能电磁波(60 Co- $\gamma$ 辐射,60 Co-伽马辐射)会刺激被辐射物质的分子,引起电离并改变其自身的物质结构。Kim等<sup>[64]</sup>使用不同剂量的60 Co-伽马辐射(0~10 kGy)应用于鱼汁,发现被辐射的鱼汁的颜色和味道都得到了改善,同时极大地减少了鱼腥味。

## 4.2 化学法

**4.2.1 酸碱(盐)处理法** 经过酸碱处理,可以有效去除水产原料中的腥味物质。在酸/碱处理过程中,蛋白质被降解,使腥味物质与蛋白质分离。另外,酸碱处理可以帮助脂质和色素的溶解,抑制脂肪氧化和腥味的产生。有机酸具有抗菌、去组胺以及金属离子螯合作用,从而减少了腥味物质的产生。常用来脱腥处理的酸类包括柠檬酸、醋酸、苹果酸等。用于水产品脱腥的碱通常是氢氧化钠,同时添加盐和乙醇等添加剂有助于增强脱腥效果。付湘晋等<sup>[65]</sup>报道了酸碱法对鲢鱼肌肉中土壤气味的去除效果,发现酸碱脱腥后MIB和Geos-

min的残留量非常低,尤其是碱性法,残留量均在 $0.50 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。Suthasinee等<sup>[66]</sup>通过实验证明,用蒸馏水、 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钙溶液和 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸冲洗印度鲭鱼肉,可以达到显著的除臭效果。另外,小苏打等碱性盐水也具有一定的脱腥效果,其脱腥原理是碱盐水能够中和氨类物质去腥。酸碱处理水产品对腥味的去除有着极为明显的效果,但是其在去腥的同时会导致部分营养物质的溶解和破坏。目前,酸碱盐处理法在水产品工业化生产去腥过程中应用较少,但其仍是一种可深入研究的方法。

**4.2.2 臭氧去腥法** 臭氧是一种强氧化剂,稳定性较差,在水中易降解,产生单原子氧和羟基自由基,具有较高的反应性和氧化性。它能氧化水中的还原性物质,并与某些有机化合物发生化学反应,从而导致有机化合物不同程度的降解。因此,当臭氧与醛类、醇类、胺类、吡啶类等多种气味成分相互作用时,这些气味成分通过自身性质被氧化分解为无腥味或是腥味阈值较高的物质,其气味也随之消失。有研究发现,臭氧水对鱼籽的除臭效果随着pH的增加而变得更加明显,但当pH超过8.0时,除臭效果开始减弱<sup>[67]</sup>。杜国伟等<sup>[68]</sup>发现臭氧可以完全或部分脱除鲢鱼糜中35种以上腥味成分。Zhang<sup>[69]</sup>使用臭氧对鲢鱼进行去腥,发现去腥效果好,而且具有无毒等优点。臭氧因其极强的氧化性将腥味物质氧化成无腥味物质,但是也因其极强的氧化性,水产品中的一些营养物质也会被臭氧氧化。因此,需要不断探索并寻找合适的技术参数,才可以达到脱除腥味和保持水产品营养品质的效果。

**4.2.3 植物提取物去腥法** 含抗氧化物的植物提取液以及植物中的天然活性物质用于水产制品的脱腥具有良好的效果。这些植物中含有多酚类、黄酮类、萜萜类以及儿茶素类等物质,具有降低酶活性和杀菌的作用,能够降低脂肪氧化对风味的影响,还能对鱼腥味进行吸附(图4)<sup>[70-71]</sup>。段振华等<sup>[72]</sup>以红茶和盐为除臭剂,通过将1.5%的红茶和0.75%的盐溶液结合形成除臭剂来优化除臭工艺,鱼与除臭剂的比例为1 g:5 mL,浸泡时间为3 h,此时得到的鲢鱼切片的腥味最低。陈漪等<sup>[73]</sup>发现,当除臭剂是浓度为2.5%或固液比为1:10的绿茶溶液时,除臭3 h可以有效去除金枪鱼肉的腥味,同时植物中所含有的酶类具有非常显著的脱

腥效果。Ephraim等<sup>[61]</sup>研究发现,山葵根中含有大量的过氧化物酶,在过氧化物存在的情况下可以去除酚类气味,在鱼类去腥过程中能够针对酚类物质进行专一的脱腥。初步测试表明,辣根可以回收5次,同时保持显著的去除酚类气味的能力。

植物中含有的黄酮类、醌类、苯丙类、萜类、生物碱等活性物质,具有类似除臭剂的作用(表3)。例如,茶多酚的除臭原理是消除甲硫醇化合物并与氨基酸结合,显示出杀菌和酶促作用。天然鱼腥味消除剂(花椒、八角、丁香等)的原理是通过独特的分子结构、基团与鱼腥味化合物的包合、配位等作用来消除鱼腥味(图4)。陈奇等<sup>[74]</sup>比较了酵母发酵、红茶提取物腌制、石蒜混合溶液腌制和烟

熏溶液腌制4种方法对淡水鲢鱼的除臭效果,结果表明,在10~18℃下,加入4.5%的石蒜溶液、0.5%的食用醋、1%的料酒、70 mg·kg<sup>-1</sup>的乙基麦芽酚(增味剂)和混合盐对新鲜鲢鱼进行48 h的除臭后,鱼块的腥味可完全消除。花椒能够去除腥味与其抗氧化能力相关,其主要原理是原料中的黄酮、酚、醛、皂甙、鞣质、生物碱和多糖等物质在适当条件下释放出自身的氢,让其与腥味物质中较活泼的成分反应,从而抑制活泼的腥味物质的产生<sup>[59]</sup>。植物的取用成本低,操作方法多,但是这些有效脱腥成分的高效提取和纯化技术仍需进一步发掘。因此,可食植物资源在去腥剂制作中有较大潜力。

表3 水产品脱腥作用的化合物

Table 3 Combination of deodorization effects of aquatic products

化合物名称	来源	脱腥浓度	参考文献
姜酚、姜醇	姜	按食盐:味精:姜汁:大料:水(质量比)=1:0.6:3:8:100煮沸后配制成浸味液,熬煮5 min后,不仅去腥明显,而且丰富了底味	[75]
川辣素	花椒	—	[76]
儿茶素	茶叶	当脱腥剂为绿茶溶液,茶水浓度为1.5时,脱腥3 h,能够有效脱除鱼腥味	[77]
紫苏醛、柠檬烯、 β-丁香烯、α-香柑油烯	紫苏	在温度为10~18℃条件下,添加4.5%的紫苏液、0.5%食用醋、1%料酒和70 mg·kg <sup>-1</sup> 乙基麦芽酚(香味增效剂)与混合盐对鱼块进行脱腥腌制48 h,去腥效果优越	[78-79]
醋酸	醋	—	[80]
乙醚、乙醇	—	—	[81]
乳酸菌粉、酵母菌粉	乳酸菌、酵母菌	在水产品中添加2%的酵母粉在35℃条件下发酵1 h,腥味而可全部脱除	[82]
迷迭香	迷迭香提取物	—	[83-84]
酚类、醛类	胡椒、木槿、肉豆蔻	—	[85]
肉桂醛、丁香酚	肉桂、丁香	—	[56]
丁香酚、草药提取物	丁香、草药	—	[87]

**4.2.4 加工工艺脱腥** 加工工艺中的脱腥是一个重要的环节,尤其在食品加工领域。煎炸煮的工艺以及微波、漂烫处理等加工方式在脱腥方面都有应用。煎炸煮的工艺是常见的脱腥方法。煎炸和煮的过程中,食材受到高温加热,使得腥味物质挥发或被分解。高温煎炸,可以使鱼肉的腥味物质能够得到有效去除;煮的过程中,部分腥味物质会溶解在水中,从而达到脱腥的效果。王辅霞等<sup>[88]</sup>通过响应面法优化即食鲟鱼加工工艺,结果表明最佳加工工艺为以100 g鲟鱼肉计,脱腥29 min,炸至两面金黄,加入基础调味料和5.0%的白砂糖,

煮制15 min后获得的即食鲟鱼香味浓郁,口感细腻,肉质紧实有弹性。微波处理技术在食品加工中能够快速、高效地去除腥味,其原理是通过微波与食材中的水分子相互作用,产生热量,使食材受热均匀,在微波加热的过程中,腥味物质也会因受热而挥发或分解。漂烫处理也是一种有效的脱腥方法,通过将食材短时间浸入沸水中,可以去除部分腥味物质,同时保持食材的原有口感和营养价值。李龙飞等<sup>[89]</sup>采用热烫及真空处理对香港牡蛎肉进行脱腥,发现该方法能够降低牡蛎肉中2-辛烯醛、2-壬烯醛、2-辛烯-1-醇和1,5-辛二烯-3-醇等腥

味成分的含量,且在热烫的作用下,牡蛎肉中的呋喃类物质略有增加,使得牡蛎肉的肉香味得到增强。

### 4.3 生物去腥法

生物除臭法是一种利用多种微生物发酵技术去除恶臭成分和气味的绿色除臭方法。常用的发酵微生物包括酵母、乳酸菌、乙酸菌等。已报道的微生物除臭及其机理可能有以下几个方面,但目前的研究还不彻底。

**4.3.1 吸附作用** 微生物的松散结构可以吸附恶臭物质,例如酵母菌的菌落大而厚,且表面光滑、湿润、质地黏稠均匀,所以有利于腥臭物质的吸附。

**4.3.2 生物利用** 微生物利用醛类和酮类等腥臭物质合成大分子物质,这些物质由细胞积累以去除腥臭。

**4.3.3 酶促反应** 微生物中含有的各种酶,这些酶利用腥臭物质(如醛、酮、醇类物质)作为底物,将其分解进而转化为没有腥味的物质。付湘晋等<sup>[66]</sup>指出酵母发酵可以把醛类、醇类转化为相应的酸,使醛类中腥味成分的相对含量从0.691%下降至0.040%。虾渣酶解液中三甲胺的含量与酵母

添加量呈负相关,而其氨基酸的损失率与添加量呈正相关<sup>[90]</sup>。王旭兵对养殖美国红鱼的发酵除臭技术进行了研究,发现微生物的去腥效果从大到小排列是植物乳杆菌>酪乳杆菌>红茶菌>乳酸杆菌>纳豆菌<sup>[70-71]</sup>。影响脱腥效果的因素与微生物种类有关,时间和温度对乳酸菌脱腥有显著影响,温度及酵母添加量是酵母菌脱腥的主要影响因素。对比这几种微生物的去腥结果,乳酸菌脱腥效果更好。乳酸菌主要利用发酵产生的乳酸和风味物质(乙醛、丙酮、二乙酰基、乙酸乙酯和异戊醇),有效去除水产品中的腥味。通过将这4种细菌置于鱼肉中发酵,鱼肉中的醛、酮和烷烃相对减少,产生了许多新的醇、醛和烷烃,这些物质具有显著的香气和挥发性除臭效果。再如,曲霉(*Aspergillus oryzae*)分解利用了海带中所含的腥味物质,从而去除腥味。生物去腥法具有效果优异、蛋白质损失少的优势,但也存在缺点如脱色效果不明显、微生物使用量大时会产生新的异味,如何将这几点进行最大程度上的改进是生物去腥法需要重视的研究方向。

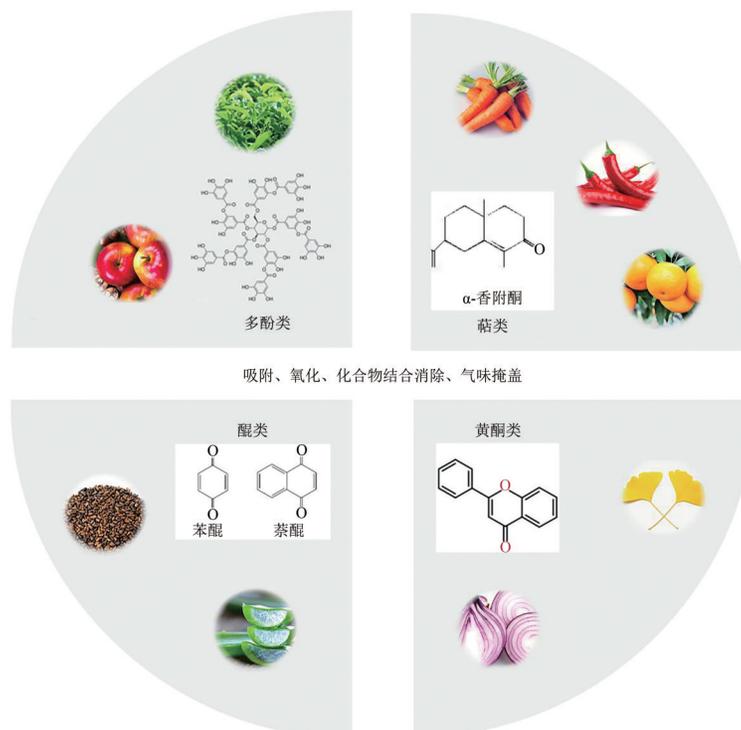


图4 植物去腥

Fig. 4 Biological method for removing fishy with plant

### 4.4 复合脱腥法

现有的除臭技术研究应用范围相对有限,通

过单一技术除臭的效果并不显著。它们通常作用于某些或几种类型的气味化合物,不具有普遍

性。因此,研究人员在研究水产品的除臭效果时,往往需要将多种方法结合比较,才能达到最佳的除臭效果。段振华等<sup>[91]</sup>对罗非鱼加工生产的鱼糜酶解物进行除臭研究,发现用2.5%酵母在35℃下发酵30 min,再加入2.5%环状糊精,在65℃下反应30 min,除臭效果最佳。郑元平等<sup>[92]</sup>用酵母、红茶、绿茶、菊花茶、紫苏、白酒、醋和活性炭去除罗非鱼片的腥味,发现尽管各种除臭方法都能不同程度地消除鱼腥味,但在这些方案中混合1%白酒、3%紫苏和1%白醋可以在2 h内完全去除腥味,且除臭效果最好。复合去腥能很大程度上将水产品的腥味进行掩盖或去除,因此寻找一种合理、高效的配比将各类物质进行混合能给去腥效果带来很大的提升。

水产品中的产腥物质复杂,外界环境的代谢物质富集、水体环境的污染、水产品本身微生物和各种酶的影响等都是水产品腥味产生的来源。物理去腥方法简单但效果不佳,化学方法可能存在不同程度的对水产品本身或是环境的污染等,就目前看来对微生物以及酶去腥方法进行深入研究十分必要。

## 5 展望

本文系统地阐述了水产品腥味的来源、种类、产生原因、检测及去腥方法及其效果评价。水产品腥味来源与其周围环境水质以及水产品自身物质发生的反应有关。腥味物质检测技术以气相色谱技术或气相色谱-质谱联用技术为主,其他的方法还有感官评价法、电子鼻法等。水产品去腥主要以物理去腥、化学去腥、生物去腥三类为主。去腥的原理包括化学物质使酶失活、杀灭微生物;溶解腥味物质并使其挥发或与腥味物质反应使其丧失腥味;破坏腥味物质结构,使其腥味减少;化学物质本身气味直接掩蔽腥味。

随着社会的进步和生活水平的不断提升,消费者对水产品的品质、风味及口感等方面要求越来越高。水产品去腥技术必须要满足高效实用、方便快捷、绿色健康和环境友好的要求。目前,已有的去腥技术方法复杂多样,从蒸气、吸附等传统物理化学方法发展到天然产物去腥法、微生物发酵法脱腥等新型化学、生物脱腥法。由于这些方法存在不足,仍需深入探索适用范围广且绿色、高

效的去腥方法,例如开发新的绿色安全脱腥剂或者建立基于多种脱腥手段的复合脱腥技术,希望达到取长补短、协同互补、去腥效果最大化的预期,从而实现水产品快速高效脱腥,同时保证其风味和营养不受损失。

## 参 考 文 献

- [1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022[M/OL]. FarmBiz, 2022.
- [2] 李承晓. 新发展背景下中国水产品加工业发展对策研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [3] GOLDEN C D, KOEHN J Z, SHEPON A, et al. Aquatic foods to nourish nations[J]. Nature, 2021, 598(7880): 315-320.
- [4] DUAN Z, DONG S, SUN Y, et al. Response of Atlantic salmon (*Salmo salar*) flavor to environmental salinity while culturing between freshwater and seawater[J/OL]. Aquaculture, 2021, 530: 735953[2024-06-12]. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735953>.
- [5] LI C, LI W, LI L, et al. Microbial community changes induced by a newly isolated salt-tolerant *Tetragenococcus muriaticus* improve the volatile flavor formation in low-salt fish sauce[J/OL]. Food Res. Int., 2022, 156: 111153[2024-06-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111153>.
- [6] 周蓓蓓, 胡王, 陈小雷, 等. 鱼制品腥味物质检测分析及去除技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(14): 185-192. ZHOU B B, HU W, CHEN X L, et al. Research progress on determination, analysis and removal of fishy odours coming from fish products[J]. Food Res. Dev., 2016, 37(14): 185-192.
- [7] 许秀娟, 钟红茂, 蒋仙玮. 水产制品除腥技术研究进展[J]. 中国食物与营养, 2009, 15(2): 32-35. XU X J, ZHONG H M, JIANG X W. Advancement of deodorization of fish odor for marine product[J]. Food Nutr. China, 2009, 15(2): 32-35.
- [8] GRAM L, HUSS H H. Microbiological spoilage of fish and fish products[J]. Int. J. Food Microbiol., 1996, 33(1): 121-137.
- [9] TODESCHINI S, PERREAULT V, GOULET C, et al. Impacts of pH and base substitution during deaerator treatments of herring milt hydrolysate on the odorous content and the antioxidant activity[J/OL]. Foods, 2022, 11(13): 1829[2024-06-25]. <https://doi.org/10.3390/foods11131829>.
- [10] CHUNG H Y. Volatile components in crabmeats of *Charybdis feriatus*[J]. J. Agric. Food Chem., 1999, 47(6): 2280-2287.
- [11] LIANG S, ZHANG T, FU X, et al. Partially degraded chitosan-based flocculation to achieve effective deodorization of oyster (*Crassostrea gigas*) hydrolysates[J/OL]. Carbohydr. Polym., 2020, 234: 115948[2024-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115948>.
- [12] 谷怡静. 海带生物脱腥及多糖提取、抗氧化应用[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [13] ZHANG 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/OL]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6177[2024-06-25]. <https://doi.org/10.3390/molecules27196177>.
- [14] 杨昭,梁瑞进,何春兰,等.牡蛎挥发性风味成分研究进展[J]. *食品研究与开发*,2021,42(11):196-203.  
YANG Z, LIANG R J, HE C L, *et al.*. Progress in characterizing the volatile flavor components of oyster products[J]. *Food Res. Dev.*, 2021, 42(11): 196-203.
- [15] ZHU W, JIANG B, ZHONG F, *et al.*. Effect of microbial fermentation on the fishy-odor compounds in kelp (*Laminaria Japonica*)[J/OL]. *Foods*, 2021, 10(11): 2532[2024-06-25]. <https://doi.org/10.3390/foods10112532>.
- [16] 雷乙,陈竟豪,涂学金,等.鱼肉加工过程特征气味物质变化研究进展[J]. *食品研究与开发*,2020,41(15):201-210.  
LEI Y, CHEN J H, TU J J, *et al.*. Research progress on changes of characteristic odor substances in fish processing[J]. *Food Res. Dev.*, 2020, 41(15): 201-210.
- [17] 张慧芳,李婷婷,晋高伟,等.HS-SPME-GC-MS技术对冷藏鲢鱼片挥发性成分变化的分析[J]. *食品科学*,2014,35(24): 130-135.  
ZHANG H F, LI T T, JIN G W, *et al.*. Volatile component change in silver carp slices during cold storage analyzed by headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Sci.*, 2014, 35(24): 130-135.
- [18] 石林凡,李周茹,任中阳,等.贝类腥味物质及形成机理研究进展[J]. *中国食品学报*,2023,23(3):406-415.  
SHI L F, LI Z R, REN Z Y, *et al.*. Recent progress in fishy odor compounds from shellfish and formation mechanism[J]. *J. Chin. Inst. Food Sci. Technol.*, 2023, 23(3): 406-415.
- [19] BORAPHECH P, THIRAVETYAN P. Trimethylamine (fishy odor) adsorption by biomaterials: effect of fatty acids, alkanes, and aromatic compounds in waxes[J]. *J. Hazard. Mater.*, 2015, 284: 269-277.
- [20] PONS-SÁNCHEZ-CASCADO S, VIDAL-CAROU M C, MARINÉ-FONT A, *et al.*. Influence of the freshness grade of raw fish on the formation of volatile and biogenic amines during the manufacture and storage of vinegar-marinated anchovies[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2005, 53(22): 8586-8592.
- [21] CHUNG H Y, CADWALLADER K R. Aroma extract dilution analysis of blue crab claw meat volatiles[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 1994, 42(12): 2867-2870.
- [22] WANG X, LE B, ZHANG N, *et al.*. Off-flavour compounds in collagen peptides from fish: Formation, detection and removal[J/OL]. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 2023, 58(3): 1543-1563.
- [23] WU T, WANG M, WANG P, *et al.*. Advances in the formation and control methods of undesirable flavors in fish[J/OL]. *Foods*, 2022, 11(16): 2504[2024-06-25]. <https://doi.org/10.3390/foods11162504>.
- [24] SMITH J L, BOYER G L, ZIMBA P V. A review of cyanobacterial odorous and bioactive metabolites: impacts and management alternatives in aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2008, 280(1-4): 5-20.
- [25] ABD EL-HACK M E, EL-SAADONY M T, ELBESTAWY A R, *et al.*. Undesirable odour substances (geosmin and 2-methylisoborneol) in water environment: sources, impacts and removal strategies[J/OL]. *Mar. Pollut. Bull.*, 2022, 178: 113579[2024-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113579>.
- [26] LIU S, LIAO T, MCCRUMMEN S T, *et al.*. Exploration of volatile compounds causing off-flavor in farm-raised channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fillet[J]. *Aquac. Int.*, 2017, 25(1): 413-422.
- [27] ZHONG F, GAO Y, YU T, *et al.*. The management of undesirable cyanobacteria blooms in channel catfish ponds using a constructed wetland: contribution to the control of off-flavor occurrences[J]. *Water Res.*, 2011, 45(19): 6479-6488.
- [28] LIU Y, HUANG Y, WANG Z, *et al.*. Recent advances in fishy odour in aquatic fish products, from formation to control[J/OL]. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 2021, 56(10): 4959-4969.
- [29] 李周茹.淀粉基纳米纤维膜对牡蛎肽腥味物质固相消减的作用机制研究[D].福建厦门:集美大学,2023.  
LI Z R. Study on the mechanism of starch based nanofiber membrane on solid phase reduction of oyster peptide[D]. Fujian Xiamen: Jimei University, 2023
- [30] MORITA K, KUBOTA K, AISHIMA T. Comparison of aroma characteristics of 16 fish species by sensory evaluation and gas chromatographic analysis[J]. *J. Sci. Food Agric.*, 2003, 83(4): 289-297.
- [31] 郭淑.鲫鱼和黄翅鱼腥味关联成分分析及热处理对其影响研究[D/OL].福建厦门:集美大学, 2021.  
GUO S. Analysis of components related to the fishy smell of crucian carp and yellow winged fish and study on the effect of heat treatment on them [D]. Fujian Xiamen: Jimei University, 2021.
- [32] 尹一鸣,徐永霞,张朝敏,等.水产品贮藏期间风味劣变机理的研究进展[J]. *食品与发酵工业*,2020,46(14):269-274.  
YIN Y M, XU Y X, ZHANG Z M. Research progress on flavor deterioration mechanism of aquatic products during storage[J]. *Food Ferment. Indust.*,2020,46(14):269-274.
- [33] SEIBEL B A, WALSH P J. Trimethylamine oxide accumulation in marine animals: relationship to acylglycerol storage[J]. *J. Exp. Biol.*, 2002, 205(Pt 3): 297-306.
- [34] SERIO A, FUSELLA G C, CHAVES LÓPEZ C, *et al.*. A survey on bacteria isolated as hydrogen sulfide-producers from marine fish[J]. *Food Contr.*, 2014, 39: 111-118.
- [35] 辛茜.大鲢肉、油腥味物质分析及脱除技术研究[D].陕西汉中:陕西理工大学,2019.  
XIN Qian. Study on the analysis and removal technology of the meat and oil odor of *Andrias davidianus*[D]. Shaanxi Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2019.
- [36] GUILLÉN M D, ERRECALDE M C, SALMERÓN J, *et al.*. Headspace volatile components of smoked swordfish (*Xiphias gladius*) and cod (*Gadus morhua*) detected by means of solid phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Chem.*, 2006, 94(1): 151-156.
- [37] SALEMI A, LACORTE S, BAGHERI H, *et al.*. Automated trace determination of earthy-musty odorous compounds in water samples by on-line purge-and-trap-gas chromatography-mass

- spectrometry[J]. J. Chromatogr. A, 2006, 1136(2): 170-175.
- [38] HALLIER A, COURCOUX P, SÉROT T, *et al.*. New gas chromatography-olfactometric investigative method, and its application to cooked *Silurus glanis* (European catfish) odor characterization[J]. J. Chromatogr. A, 2004, 1056(1-2): 201-208.
- [39] LIKENS S T, NICKERSON G B. Detection of certain hop oil constituents in brewing products[J]. Proc. Annu. Meet. Am. Soc. Brew. Chem., 1964, 22(1): 5-13.
- [40] SELLI S, PROST C, SEROT T. Odour-active and off-odour components in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) extracts obtained by microwave assisted distillation-solvent extraction[J]. Food Chem., 2009, 114(1): 317-322.
- [41] CONTE E D, SHEN C Y, MILLER D W, *et al.*. Microwave distillation-solid phase adsorbent trapping device for the determination of off-flavors, geosmin and methylisoborneol, in catfish tissue below their rejection levels[J]. Anal. Chem., 1996, 68(15): 2713-2716.
- [42] SELLI S, CAYHAN G G. Analysis of volatile compounds of wild gilthead sea bream (*Sparus aurata*) by simultaneous distillation-extraction (SDE) and GC-MS[J]. Microchem. J., 2009, 93(2): 232-235.
- [43] 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 Res. Int., 2010, 43(4): 1027-1040.
- [44] GENG H, CHEN L, WANG S, *et al.*. Analysis of volatile compounds contributing to distinctive odour of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi[J/OL]. Int. J. Food Sci. Technol., 2022, 57(12): 7774-7786.
- [45] 张浩,杨艺,孙纪录,等.水产品腥味物质提取分析技术研究进展[J].食品研究与开发,2023,44(7):212-217.
- ZHANG H, YANG Y, SUN J L, *et al.*. Techniques for extraction and analysis of fishy odor substances in aquatic products: a review[J]. Food Res. Dev., 2023, 44(7): 212-217.
- [46] LUNDSTROM R C, RACICOT L D. Gas chromatographic determination of dimethylamine and trimethylamine in seafoods[J]. J. Assoc. Off. Anal. Chem., 1983, 66(5): 1158-1163.
- [47] ODUKOYA J O, KAYITESI E, MPHAHLELE M P, *et al.*. Effect of processing methods on the volatile components of *Ethmalosa fimbriata* using a two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GC × GC-TOF-MS) technique[J/OL]. J. Food Proc. Preserv., 2021, 45(2): e15110 [2024-02-23]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15110>.
- [48] PODDUTURI R, PETERSEN M A, MAHMUD S, *et al.*. Potential contribution of fish feed and phytoplankton to the content of volatile terpenes in cultured *Pangasius (Pangasianodon hypophthalmus)* and *Tilapia (Oreochromis niloticus)*[J]. J. Agric. Food Chem., 2017, 65(18): 3730-3736.
- [49] SELLI S, RANNOU C, PROST C, *et al.*. Characterization of aroma-active compounds in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) eliciting an off-odor[J]. J. Agric. Food Chem., 2006, 54(25): 9496-9502.
- [50] MAHMOUD M A A, BUETTNER A. Characterisation of aroma-active and off-odour compounds in German rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). part II : case of fish meat and skin from earthen-ponds farming[J]. Food Chem., 2017, 232: 841-849.
- [51] LASLETT G M, BREMNER H A. Evaluating acceptability of fish minces and fish fingers from sensory variables[J/OL]. Int. J. Food Sci. Technol., 1979, 14(4): 389-404.
- [52] ZIMBA P V, SCHRADER K K, HYLDIG G, *et al.*. Evaluation of geosmin and 2-methylisoborneol off-flavour in smoked rainbow trout fillets using instrumental and sensory analyses[J/OL]. Aquac. Res., 2012, 43(1): 149-153.
- [53] 王锡昌,吴娜,顾赛麒,等.MMSE-GC-MS/GC-O法鉴定熟制阳澄湖大闸蟹关键嗅感物质[J].现代食品科技,2014,30(4): 245-254.
- WANG X C, WU N, GU S Q, *et al.*. Identification of odor-active compounds in Chinese mitten crab from Yangcheng Lake by MMSE-GC-MS/GC-O[J]. Mod. Food Sci. Technol., 2014, 30(4): 245-254.
- [54] 洪伟,周春霞,洪鹏志,等.水产品腥味物质的形成及脱腥技术的研究进展[J].食品工业科技,2013,34(8):386-389+399.
- HONG W, ZHOU C X, HONG P Z, *et al.*. Research progress in the formation and deodorization technology of fishy odor for aquatic product[J]. Sci. Technol. Food Ind., 2013, 34(8): 386-389+399.
- [55] 雷跃磊,郑小宁,卢素芳,等.养殖鳊鱼肉紫苏汁脱腥工艺的优化研究[J].食品工业科技,2015,36(7):228-231.
- LEI Y L, ZHENG X N, LU S F, *et al.*. Optimization of deodorization process on mandarin fish meat with *Perilla* juice[J]. Sci. Technol. Food Ind., 2015, 36(7): 228-231.
- [56] 何小龙,单康,戴阳军,等.响应曲面法优化花椒去腥工艺研究[J].中国调味品,2015,40(3):60-63.
- HE X L, SHAN K, DAI Y J, *et al.*. Study on deodorization Technology of pepper by response surface method[J]. China Condiment, 2015, 40(3): 60-63.
- [57] FURUNE T, TERAOKA K. Complexation of ingredients in foods by alpha-cyclodextrin to improve their functions[M]//HOTM, YOSHII H, TERAOKA K, *et al.*. Functionality of Cyclodextrins in Encapsulation for Food Applications. Springer, 2021, 277-297.
- [58] WAN P, LIU J, CHEN D W. Analysis of aroma-active compounds in bighead carp head soup and their influence on umami of a model soup[J/OL]. Microchem. J., 2021, 168: 106436 [2024-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106436>.
- [59] 康孟利,高伟群,凌建刚,等.龙头鱼真空油炸参数优化[J].农产品加工·学刊(下),2014(3):12-14.
- KANG M L, GAO W Q, LING J G, *et al.*. Optimization of vacuum frying parameters of dragon head fish[J]. Acad. Period. Farm Prod. Process., 2014(3): 12-14.
- [60] LI X, WANG J, ZHANG X, *et al.*. Powdered activated carbon adsorption of two fishy odorants in water: trans, trans-2, 4-heptadienal and trans, trans-2, 4-decadienal[J]. J. Environ. Sci. (China), 2015, 32: 15-25.
- [61] GOVERE E M, TONEGAWA M, BRUNS M A, *et al.*. Using minced horseradish roots and peroxides for the deodorization of swine manure: a pilot scale study[J]. Bioresour. Technol.,

- 2007, 98(6): 1191-1198.
- [62] NA H-S, KIM J-N, KIM J-M, *et al.* Encapsulation of fish oil using cyclodextrin and whey protein concentrate[J]. *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, 2011, 16(6): 1077-1082.
- [63] SERFERT Y, DRUSCH S, SCHWARZ K. Sensory odour profiling and lipid oxidation status of fish oil and microencapsulated fish oil[J]. *Food Chem.*, 2010, 123(4): 968-975.
- [64] KIM J H, AHN H J, YOON H S, *et al.* Color, flavor, and sensory characteristics of gamma-irradiated salted and fermented anchovy sauce[J/OL]. *Rad. Physics Chem.*, 2004, 69(2): 179-187.
- [65] 付湘晋,许时婴,王璋,等. 酸碱处理对鲢鱼肌原纤维蛋白热变性、聚集、胶凝性质的影响[J]. *食品科学*, 2008, 29(6): 100-103.  
FU X J, XU S Y, WANG Z, *et al.* Effect of extreme pH treatment on heat-induced denaturation, aggregation, and gelling properties of myofibril from silver carp[J]. *Food Sci.*, 2008, 29(6): 100-103.
- [66] YARNPAKDEE S, BENJAKUL S, KRISTINSSON H G, *et al.* Effect of pretreatment on lipid oxidation and fishy odour development in protein hydrolysates from the muscle of Indian mackerel[J]. *Food Chem.*, 2012, 135(4): 2474-2482.
- [67] 何贵山,方旭波,陈小娥,等. 鱼籽调理食品的脱腥和加工工艺[J]. *中国食物与营养*, 2011, 17(10): 48-52.  
HE G S, FANG X B, CHEN X E, *et al.* Technology of deodorization and processing of fish roe prepared food[J]. *Food Nutr. China*, 2011, 17(10): 48-52.
- [68] 杜国伟. 鲢鱼糜的脱腥技术研究[D]. 江苏无锡: 江南大学, 2006.
- [69] ZHANG T, XUE Y, LI Z, *et al.* Effects of ozone on the removal of geosmin and the physicochemical properties of fish meat from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) [J]. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 2016, 34: 16-23.
- [70] 王旭冰. 养殖美国红鱼微生物去腥技术研究[D]. 浙江宁波: 宁波大学, 2010.
- [71] 何佳易, 徐鑫, 刘国艳, 等. 小黄鱼酶解液生物脱腥效果比较[J]. *扬州大学烹饪学报*, 2011, 28(4): 49-52.  
He Jiayi, Xu Xin, Liu Guoyan, *et al.* Comparison of biological deodorization effects of enzymatic hydrolysates of small yellow croaker[J]. *J. Cuisine Yangzhou Univ.*, 2011, 28(4): 49-52.
- [72] 段振华, 张懋, 郝建, 等. 香脆鳊鱼片的制备工艺[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(2): 44-47.  
DUAN Z H, ZHANG M, HAO J, *et al.* Processing of fragrant crisp fish slice[J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2003, 24(2): 44-47.
- [73] 陈漪, 庄晶晶, 尚艳丽, 等. 金枪鱼肉茶水脱腥条件的比较研究[J]. *粮油食品科技*, 2012, 20(6): 76-79.  
CHEN Y, ZHUANG J J, SHANG Y L, *et al.* Comparison of deodorization conditions of tuna tea[J]. *Sci. Technol. Cereals Oils Foods*, 2012, 20(6): 76-79.
- [74] 陈奇, 张安, 何新益. 淡水鲢鱼脱腥效果的比较研究[J]. *食品工业科技*, 2007, 28(2): 146-148.  
CHEN Q, ZHANG A, HE X Y. Studies on comparison of deodorization of water silver carp fish[J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2007, 28(2): 146-148.
- [75] ALI B H, BLUNDEN G, TANIRA M O, *et al.* Some phytochemical, pharmacological and toxicological properties of ginger (*Zingiber officinale roscoe*): a review of recent research[J]. *Food Chem. Toxicol.*, 2008, 46(2): 409-420.
- [76] FU C, WU D, JIN Z, *et al.* Development of a novel cooking wine with high-efficiency deodorizing capability *via* a rapid fermentation strategy[J/OL]. *LWT*, 2022, 153: 112431[2024-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112431>.
- [77] 王文勇, 张英慧, 赖长生. 水产品腥味物质去除及提取分析的研究进展[J]. *肉类工业*, 2017(3): 50-53.  
WANG W Y, ZHANG Y H, LAI C S. Research progress on removal and extraction analysis of fishy substances in aquatic products[J]. *Meat Industry*, 2017(3): 50-53.
- [78] KASAHARA K, OSAWA C. Combination effects of spices on masking of odor in boiled sardine[J/OL]. *Fish. Sci.*, 1998, 64(3): 415-418.
- [79] ZHAO Y, KONG H, ZHANG X, *et al.* The effect of *Perilla* (*Perilla frutescens*) leaf extracts on the quality of surimi fish balls[J]. *Food Sci. Nutr.*, 2019, 7(6): 2083-2090.
- [80] XUE C, YOU J, ZHANG H, *et al.* Capacity of myofibrillar protein to adsorb characteristic fishy-odor compounds: effects of concentration, temperature, ionic strength, pH and yeast glucan addition[J/OL]. *Food Chem.*, 2021, 363: 130304[2024-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130304>.
- [81] PENG L, YANG C, WANG C, *et al.* Effects of deodorization on the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), 3-monochloropropane-1, 2-epoxide (3-MCPDE) and glycidyl esters (GE) in rapeseed oil using ethanol steam distillation at low temperature[J/OL]. *Food Chem.*, 2023, 413: 135616[2024-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135616>.
- [82] LIANG Z, YANG C, HE Z, *et al.* Changes in characteristic volatile aroma substances during fermentation and deodorization of *Gracilaria lemaneiformis* by lactic acid bacteria and yeast[J/OL]. *Food Chem.*, 2023, 405(Pt B): 134971[2024-06-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134971>.
- [83] HUANG P, WANG Z, SHI Y, *et al.* Deodorizing effects of rosemary extract on silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and determination of its deodorizing components[J]. *J. Food Sci.*, 2022, 87(2): 636-650.
- [84] ZHANG X, LAN W, XIE J. Combined citric acid and rosemary extract to maintain the quality of chilled Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J/OL]. *J. Food Proc. Preserv.*, 2021, 45(7): e15614.
- [85] SOKAMTÉ T A, MBOUGUENG P D, MOUAFU T H, *et al.* Application of the spice *Afrotyrax lepidophyllus* Mildbr as a biopreservative and seasoning agent for hot smoked fillets of *Pangasius hypophthalmus* [J]. *J. Agric. Food Res.*, 2022, 10: 100449.
- [86] MEENATCHISUNDARAM S, CHANDRASEKAR C M, UDAYASOORIAN L P, *et al.* Effect of spice-incorporated starch edible film wrapping on shelf life of white shrimps stored at different temperatures[J]. *J. Sci. Food Agric.*, 2016, 96(12): 4268-4275.
- [87] SLAVIN M, DONG M, GEWA C. Effect of clove extract pretreat-

- ment and drying conditions on lipid oxidation and sensory discrimination of dried omena (*Rastrineobola argentea*) fish[J/OL]. Int. J. Food Sci. Technol., 2016, 51(11): 2376-2385.
- [88] 王辅霞,毕保良,李秀芬,等. 响应面优化即食风味鲟鱼加工工艺及其贮藏品质分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(03): 8-14. WANG F X, BI B L, LI X F, *et al.*. Response surface optimization of instant flavor sturgeon processing technology and storage quality analysis [J]. Chinese Season., 2024, 49 (03): 8-14.
- [89] 李龙飞,秦小明,周翠平,等. 真空烫漂处理对牡蛎肉腥味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 103-107+112. LI L F, QIN X M, ZHOU C P, *et al.*. Effect of vacuum blanching on volatile compounds oyster meat[J]. Sci. Technol. Food Ind., 2015, 36(13): 103-107+112.
- [90] 武利刚,谢广深,段杉. 活性炭和酵母粉对虾头虾壳蛋白水解液脱腥脱苦的比较研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(12): 1243-1246. WU L G, XIE G S, DUAN S. Debittering and deodourization effects of active carbon and yeast on the hydrolyzate of prawn waste[J]. Mod. Food Sci. Technol., 2008, 24(12): 1243-1246.
- [91] 段振华,易美华,汪菊兰,等. 罗非鱼碎鱼肉酶解液的脱腥技术及其机理探讨[J]. 食品工业科技, 2007, 28(2): 65-67. DUAN Z H, YI M H, WANG J L, *et al.*. Study on technology and its mechanism of deodorization of *Tilapia* sliced meat hydrolyzate[J]. Sci. Technol. Food Ind., 2007, 28(2): 65-67.
- [92] 郑元平,廖飞宝. 罗非鱼片脱腥技术比较研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 217-219+222. ZHENG Y P, LIAO F B. Comparative study on deodorization of *Tilapia* meat[J]. Sci. Technol. Food Ind., 2011, 32(2): 217-219+222.