

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.06.004

# 直投式酵母菌发酵对江蓠腥味 及膳食纤维性质的影响

木尼热·卡地尔<sup>1,2</sup>, 姚沅俊<sup>1,2</sup>, 蔡真珍<sup>3</sup>, 蔡宁<sup>3</sup>, 姜泽东<sup>1,2,4</sup>, 郑明静<sup>1,2,4</sup>, 杜希萍<sup>1,2,4</sup>, 倪辉<sup>1,2,3,4\*</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 361102; 4. 厦门市食品生物工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 海藻是重要的海洋生物资源, 富含多种生物学功能的膳食纤维。传统工艺制备的海藻膳食纤维具有较强的腥味, 影响其在食品中的应用。以江蓠为原料, 研究直投式酵母菌发酵对江蓠腥味及其膳食纤维性质的影响。研究表明, 优化得到酵母菌直投式发酵剂发酵脱腥的温度为 25 °C、活化菌液稀释倍数为 4、江蓠与稀释菌液比例为 1:20(g/mL)、发酵时间为 4 h。发酵后, 江蓠样品的腥味强度评分由 2.28 上升至 9.67, 腥味成分中的正己醛、1-辛烯-3-醇、(Z)-4-癸烯醛、(Z)、(Z)-2,4-癸二烯醛含量明显下降。发酵前后, 江蓠膳食纤维的持水性分别为 29.20、30.50 g/g、持油性分别为 5.73、6.09 g/g、白度分别为 1.86% 和 1.77%、凝胶强度分别为 355、463 N·mm。综上, 江蓠进行直投酵母菌发酵后, 能较好地降低其腥味, 且对江蓠膳食纤维的性质影响较小。

**关键词:** 江蓠; 直投式酵母菌剂; 发酵; 腥味; 膳食纤维

## Effect of Directed Vat Set Yeast Fermentation on the Fishy Odor and Properties of Dietary Fiber of *Gracilaria*

Munire KADIER<sup>1,2</sup>, YAO Yuanjun<sup>1,2</sup>, CAI Zhenzhen<sup>3</sup>, CAI Ning<sup>3</sup>, JIANG Zedong<sup>1,2,4</sup>, ZHENG Mingjing<sup>1,2,4</sup>, DU Xiping<sup>1,2,4</sup>, NI Hui<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. College of Marine Food and Bioengineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Food Microbiology and Enzyme Engineering, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361102, Fujian, China; 4. Food Bioengineering Technology Research Center, Xiamen 361021, Fujian, China)

**Abstract:** Seaweed is an important marine biological resource rich in dietary fiber with various biological functions. The seaweed dietary fiber prepared by traditional technology has strong fishy odor, which affects its application in food. The effects of directed vat set (DVS) yeast fermentation on the fishy odor and dietary fiber properties of *Gracilaria* were studied. The results showed that the optimized fermentation temperature for reducing the fishy odor was 25 °C, the dilution ratio of activated yeast liquid was 4, the ratio of *Gracilaria* to diluted yeast liquid was 1:20(g/mL), and the fermentation time was 4 h. After fermentation, the intensity of the fishy odor of *Gracilaria* sample was increased from 2.28 to 9.67, and the contents of hexanal, 1-octene-3-ol, (Z)-4-decenal and (Z), (Z)-2,4-decadienal among the odor components decreased significantly. Before and after fermentation, the water-holding capacity of *Gracilaria* dietary fiber was 29.20 g/g and 30.50 g/g, oil-holding capacity was 5.73 g/g and 6.09 g/g, whiteness was 1.86% and 1.77%, gel strength was 355 N·mm and 463 N·mm, respectively. In conclusion, the fishy odor of *Gracilaria* can be reduced by DVS yeast fermentation, and the properties of *Gracilaria* dietary fiber are less affected.

**Key words:** *Gracilaria*; directed vat set (DVS) yeast agent; fermentation; fishy odor; dietary fiber

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD2100603)

作者简介: 木尼热·卡地尔(1997—), 女(维吾尔), 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工。

\*通信作者: 倪辉(1973—), 男, 教授, 博士, 研究方向: 食品生物技术与食品风味。

引文格式:

木尼热·卡地尔,姚沅俊,蔡真珍,等.直投式酵母菌发酵对江蓠腥味及膳食纤维性质的影响[J].食品研究与开发,2024,45(6):23-30.

Munire KADIER, YAO Yuanjun, CAI Zhenzhen, et al. Effect of Directed Vat Set Yeast Fermentation on the Fishy Odor and Properties of Dietary Fiber of *Gracilaria*[J]. Food Research and Development, 2024, 45(6): 23-30.

海藻是海带、紫菜、江蓠等海洋藻类的总称,其养殖地主要分布在我国福建、山东、广东、海南等东南沿海地区。其中,福建省是我国海藻大省,由《2020中国渔业统计年鉴》可知,2020年福建省海藻产量高达12万t,约占全国海藻产量的48%<sup>[1]</sup>。海藻中富含藻胶、纤维素和半纤维素等,是制备膳食纤维的优质原料<sup>[2]</sup>。海藻膳食纤维作为从海洋藻类中提取的一种天然膳食纤维,具有一定的持水性、持油性及凝胶强度等特性<sup>[3]</sup>,主要作为增稠、稳定用途的食品配料。但是,碳氢化合物、酮、醛、醇、羧酸、酯等挥发性化合物构成了海藻中广泛的挥发性代谢物<sup>[4]</sup>,直接采用海藻制备膳食纤维具有较浓烈的腥味,影响其在下游加工产品中的应用。因此,对海藻进行脱腥处理是提高其膳食纤维品质的重要研究内容。

脱除腥味的方法主要有物理法、化学法及生物法<sup>[5]</sup>。张丽君等<sup>[6]</sup>研究发现,活性炭及 $\beta$ -环状糊精对螺旋藻吸附脱腥效果不明显;加热法则会引起严重变色及沉淀产生。潘江球等<sup>[7]</sup>研究发现,用碱法进行脱腥会导致江蓠营养成分严重损失。杨超<sup>[8]</sup>研究发现,利用微生物发酵不仅可以有效脱除龙须菜腥味,而且还可以改善其风味。与物理和化学脱腥法相比,生物法脱腥不需要长时间的热处理,且不引入外源化学物质,是一种绿色的脱腥方法。传统食品发酵方法是采用微生物扩大培养的方式,近年来,直投式微生物发酵剂越来越广泛地用于增强食品风味<sup>[9]</sup>,为简化发酵脱腥工艺提供了方便的途径。

酵母菌是常用的发酵脱腥微生物。相关研究表明,酵母菌体内的醇脱氢酶、醛脱氢酶能将醛类以及烯醛类等腥味物质氧化或还原成风味较柔和的醇和酸,使用酵母菌发酵能有效地降低水产品的腥味<sup>[10]</sup>。刘豪等<sup>[11]</sup>用安琪高活性干酵母对小麦麸皮进行发酵,发酵后麸皮的蛋白质及灰分含量、持水性、溶胀性均增强。研究表明,酵母菌的代谢反应不仅可将腥味成分转化成无腥味的成分,也可能对脂肪、蛋白质和多糖等成分具有转化作用。因此,在研究酵母菌发酵去除海藻腥味的同时,也要关注其发酵脱腥对海藻膳食纤维相关性质的影响。

目前,已有关于腥味及海藻膳食纤维相关性质的研究。例如,腥味不仅可借助人嗅觉器官感知腥味的

强度,还可以通过气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)及电子鼻(electronic nose, E-Nose)等方法进行测定<sup>[12-13]</sup>。膳食纤维的持水性、持油性等理化性质通常采用离心前后的质量比来评价,凝胶强度则用质构仪进行测定<sup>[14]</sup>。这些有关海藻腥味分析检测及海藻膳食纤维应用性质分析检测方法为深入研究发酵对海藻腥味及其膳食纤维性质的影响提供参考。

江蓠(*Gracilaria*)是我国一种重要的经济类海藻,其膳食纤维含量高达80%~90%<sup>[7]</sup>。研究显示,江蓠藻膳食纤维能显著降低高脂模型小鼠血清中总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇(low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)含量及肝脏脂质水平,还能降低高脂膳食导致的氧化损伤<sup>[15]</sup>。用传统方法制备的江蓠膳食纤维具有较强烈的腥味,目前尚未开展膳食纤维脱腥的研究。因此,本研究以江蓠为原料,运用感官检验和固相微萃取-气相色谱-质谱联用(solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometer, SPME-GC-MS)技术,研究直投式酵母菌发酵对江蓠腥味的影响,同时,基于仪器分析评价酵母菌发酵对江蓠腥味及其膳食纤维持水性、持油性、凝胶强度等应用性质的影响。本研究可为江蓠膳食纤维的生产奠定技术基础,同时还为其他海藻脱腥及其膳食纤维加工提供参考,对提高江蓠及其他海藻的价值具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

江蓠:绿新(福建)食品有限公司;直投式安琪耐高温酿酒高活性干酵母:河南洲洋生物科技有限公司;白砂糖:市售;乙醇、3-己酮、C<sub>8</sub>-C<sub>20</sub>、柠檬烯、4-萜品醇、2-辛烯-1-醇、香茅醛、肉豆蔻酸异丙酯、异植物醇、橙花醇、顺,顺-2,4-壬二烯醛、苯甲醇、2,4-二甲基苯甲醛、柠檬醛、2,4-二叔丁基苯酚、芳樟醇、1-辛烯-3-醇、邻苯二甲酸二丁酯、十一醛、柏木脑、邻苯二甲酸二异丁酯、棕榈酸甲酯、反-2-癸烯醛、反-2-壬醛、邻苯二甲醚、2-乙基己醇、反-2-辛烯醛、苯乙酮、2,4,6-三甲基吡啶、茴香脑、癸醛、顺-香叶基丙酮、壬醛(均为色谱纯):美国Sigma-Aldrich公司。

## 1.2 仪器设备

ZSBB-712 电热恒温水浴箱、ZXRD-B5110 恒温鼓风干燥箱:上海智城分析仪器制造有限公司;FW100 高速粉碎机:天津市泰斯特仪器有限公司;GL1241-1SCN 电子分析天平:赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;TA-TOUCH 质构仪:上海保圣实业发展有限公司;SX2-12-10 箱式电阻炉:济南精密科学仪器仪表有限公司;MB25 水分测定仪:奥豪斯仪器(苏州)有限公司;DL-1 电子调温电炉:江阴保利科研器械有限公司;H2050R 台式高速大容量冷冻离心机:湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;WSB-2 数显白度仪:河北慧采科技有限公司;QP-2010Plus 气相色谱质谱串联仪:日本岛津公司;Rtx-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm)色谱柱:美国色谱科公司。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 酵母菌的活化

取 1 g 直投式安琪耐高温酿酒高活性干酵母,加至 1 000 mL 灭菌的 3% 白糖溶液中,混合均匀,密封后置于室温活化 10 h,分别用无菌水稀释至一定的比例备用。

### 1.3.2 发酵江蓠样品的制备

采用一定条件进行发酵后,滤除酵母菌液,藻体用 40 倍的自来水清洗 3 次,滤干后在 60 °C 干燥 12 h,粉碎过 40 目筛,制备江蓠粉备用。以未发酵样品作为空白对照。

### 1.3.3 酵母发酵工艺参数对江蓠腥味的的影响

#### 1.3.3.1 发酵温度对脱腥效果的影响

准确称取 20 g 江蓠藻(用 15~20 倍藻体积清水清洗,除去掺杂在江蓠藻中的泥沙、碎壳等杂质)于 500 mL 锥形瓶中,按料液比 1:15(g/mL)、菌液稀释 4 倍的条件进行混合,密封后分别置于 15、20、25、30、35 °C 电热恒温水浴箱中,发酵 4 h 后进行感官评价(腥味强度)。

#### 1.3.3.2 菌液稀释倍数对脱腥效果的影响

准确称取 20 g 江蓠藻(用 15~20 倍藻体积清水清洗,除去掺杂在江蓠藻中的泥沙、碎壳等杂质)于 500 mL 锥形瓶中,按料液比为 1:15(g/mL)、菌液稀释 1、2、4、8、16 倍的条件进行混合,密封后置于 25 °C 电热恒温水浴箱中,发酵 4 h 后进行感官评价(腥味强度)。

#### 1.3.3.3 料液比对脱腥效果的影响

准确称取 20 g 江蓠藻(用 15~20 倍藻体积清水清洗,除去掺杂在江蓠藻中的泥沙、碎壳等杂质)于 500 mL 锥形瓶中,按菌液稀释 4 倍、料液比 1:5、1:10、1:15、1:20、1:25(g/mL)的条件进行混合,密封后置于 25 °C 电热恒温水浴箱中,发酵 4 h 后进行感官评价(腥味强度)。

#### 1.3.3.4 发酵时间对脱腥效果的影响

准确称取 20 g 江蓠藻(用 15~20 倍藻体积清水清洗,除去掺杂在江蓠藻中的泥沙、碎壳等杂质)于 500 mL 锥形瓶中,按料液比 1:15(g/mL)、菌液稀释 4 倍的条件进行混合,密封后置于 25 °C 电热恒温水浴箱中,分别发酵 0、2、4、6、8 h,待发酵完成后进行感官评价(腥味强度)。

### 1.3.4 发酵对江蓠腥味成分的影响

取 20 mL 超纯水于 45 mL 萃取瓶中,加入 5 g 发酵处理后的江蓠,再加入 10 μL 1 mg/mL 的 3-己酮作为内标物,拧紧瓶盖,摇匀,置于 60 °C 电热恒温水浴箱中平衡 30 min。采用老化后的 65 μm DVB/CAR/PDMS 的萃取头吸附 30 min,进行 GC-MS 分析。每组样品处理设 5 次平行。未经发酵处理的江蓠作为空白对照。

### 1.3.5 发酵对江蓠膳食纤维应用性质的影响

#### 1.3.5.1 白度的测定

利用白度仪测定江蓠粉的白度。仪器调好后,将待测的江蓠粉放在试样座上进行测定,待显示值稳定后便可记下其白度值。每组样品做 3 次平行,结果取平均值。

#### 1.3.5.2 持水性的测定

参考吴兴雨等<sup>[16]</sup>的方法,略微修改,取 0.5 g 江蓠粉,加入 10 mL 蒸馏水,充分振荡,4 000 r/min 离心 30 min,弃去上清液,称量离心后沉淀的质量,按公式(1)计算持水性。

$$h_1 = (m_1 - m_0) / m_0 \quad (1)$$

式中: $h_1$ 为江蓠粉持水性,g/g; $m_0$ 为江蓠粉初始质量,g; $m_1$ 为离心后沉淀的质量,g。

#### 1.3.5.3 持油性的测定

参考吴兴雨等<sup>[16]</sup>的方法,略微修改,取 0.5 g 江蓠粉,加入 10 mL 玉米油,充分振荡,4 000 r/min 离心 30 min,弃去上清液,称量离心后沉淀的质量,按公式(2)计算持油性。

$$h_2 = (m_2 - m_0) / m_0 \quad (2)$$

式中: $h_2$ 为江蓠粉持油性,g/g; $m_0$ 为江蓠粉初始质量,g; $m_2$ 为离心后沉淀的质量,g。

#### 1.3.5.4 凝胶强度的测定

参照 GB 1886.239—2016《食品安全国家标准 食品添加剂 琼脂》<sup>[17]</sup>中 1.5% 琼脂(干基计)凝胶试样制备的方法,根据上述测得的江蓠粉的水分含量,按公式(3)计算出称取样品量。

$$X = \frac{1.5}{1 - D} \quad (3)$$

式中: $X$ 为称取试样质量,g; $D$ 为试样水分的质量分数,%。

准确称取由公式(3)计算所得到的样品 0.001 g,置于 500 mL 锥形瓶中,加入 100 mL 水,静置浸泡 1 h



后,微沸加热直至试样出现胶着状态,将胶着液平均倒入 100 mL 烧杯中,冷却至胶体形成,用保鲜膜密封,室温放置 15 h 备用。利用质构仪测定其凝胶强度。参考王鑫等<sup>[18]</sup>的研究方法,采用 P/0.5 探头,测试前、中、后速度分别为 1、1、1 mm/s,触发力 5 g,压入凝胶中心位置 4 mm。

### 1.3.6 腥味的感官评价

采用感官评分法,对发酵后的江蕨整体气味可接受程度进行评分。通过阅读大量文献及预试验选择了腥味参照物质,选择 10 名(男 5 名,女 5 名)食品专业学生作为评审人员,对不同浓度梯度的腥味标准溶液进行培训,使评审人员熟悉腥味强度的定量感官评价方法,再按照表 1 所示的评分描述进行感官评价。

表 1 发酵脱腥效果评分标准

Table 1 Scoring criteria for the effect of fermentation on reducing fishy odor

感官标准	评分
基本无腥味	9~10
腥味较弱	6~<9
有腥味	4~<6
腥味一般	2~<4
腥味较重	0~<2

### 1.3.7 腥味成分的 GC-MS 挥发性成分测定

色谱条件:Rtx-5MS 石英毛细柱(60 m×0.32 mm×0.25 μm);进样口温度为 230 °C;最初温度为 40 °C 并保持 0 min,以 1 °C/min 升温至 57 °C,在 57 °C 保持 0 min,再以 5 °C/min 升温至 230 °C,在 230 °C 保持 5 min。用高纯氦气(纯度 99.999%)作为载气,柱流量为 3.16 mL/min,不分流进样。

质谱条件:电子轰击(electron impact, EI)离子源;电子能量为 70 eV;离子源温度为 220 °C;接口温度为 250 °C;通过选择扫描模式进行定性分析,质量扫描范围 m/z 35~500。溶剂延迟时间为 3 min。

定性定量分析:运用质谱数据库(NIST11、NIST11s、FFNSC1.3)进行相似度检索,根据不同物质的基峰、质荷比和相对峰度做串连检索与人工解析,质谱匹配度大于 80% 作为物质鉴定标准;按公式(4)计算待测组分的保留指数(retention index, RI<sub>x</sub>),与文献报道的保留指数进行对比定性。

$$R = 100n + 100(t_i - t_n) / (t_{n+1} - t_n) \quad (4)$$

式中: $R$  为待测定成分的保留指数; $t_i$  为待测成分  $i$  的调整保留时间, min; $t_n$  为具有  $n$  个碳原子数的正构烷烃的调整保留时间, min; $t_{n+1}$  为具有  $n+1$  个碳原子数的正构烷烃的调整保留时间, min。

此外,采用面积归一法进行定量,按公式(5)计算各组分百分含量。

$$X_i = (A_i f_i / \sum A_i f_i) \times 100 \quad (5)$$

式中: $X_i$  为组分  $i$  的百分含量, %; $A_1, A_2 \dots A_i$  为组分 1、2... $i$  的峰面积; $f_1, f_2 \dots f_i$  为组分 1、2... $i$  的相对校正因子。

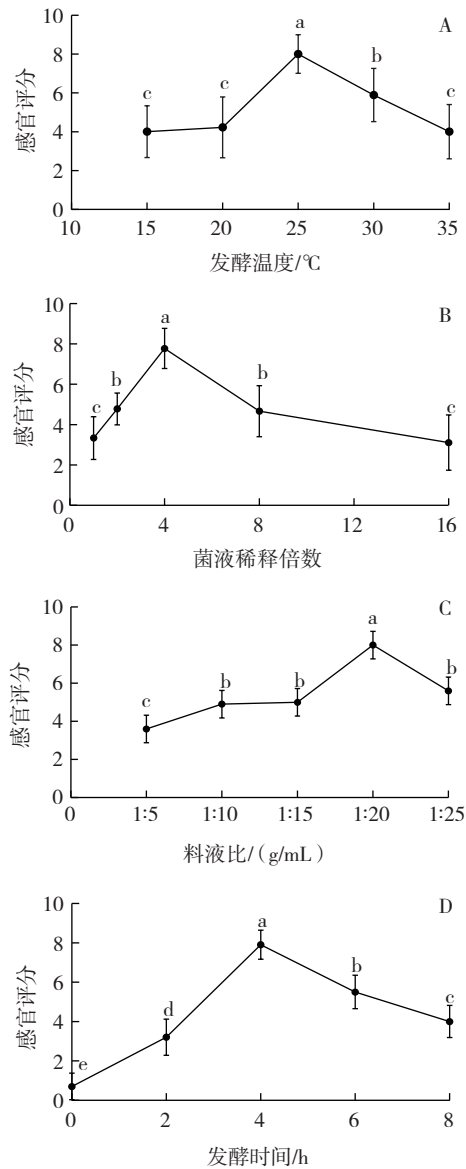
### 1.4 数据处理

采用 Excel 2017 对江蕨脱腥工艺及其挥发性成分进行定性、定量等统计分析,并绘制相关图表;利用 IBM SPSS 26.0 对试验数据进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 直投式酵母菌发酵工艺对江蕨腥味的影

直投式酵母菌发酵工艺参数对江蕨腥味的影响如图 1 所示。



A、B、C、D 分别为发酵温度、菌液稀释倍数、料液比及发酵时间对发酵脱腥感官评分的影响。不同小写字母代表差异显著,  $p < 0.05$ 。

图 1 直投式酵母菌发酵工艺参数对江蕨腥味的影  
Fig.1 The effects of directed vat set yeast fermentation parameters on fishy odor of *Gracilaria*

由图 1A 可知,腥味强度随发酵温度的升高先降低后升高,当发酵温度为 25 °C 时,腥味强度最低。由图 1B 可知,腥味强度随菌液稀释倍数增加呈先下降后上升的趋势,当活化菌液稀释倍数为 4 时,腥味最淡。由图 1C 可知,腥味强度随溶剂添加量的增加先降低后升高,当料液比为 1:20 (g/mL) 时腥味强度最低。由图 1D 可知,随着发酵时间的延长,腥味强度呈先下降后上升的趋势,当发酵至 4 h 时,腥味强度最低。相关研究表明,发酵时间、菌液稀释倍数、料液比

以及发酵温度是影响酵母菌发酵的主要因素,发酵温度过高或者过低都会对酵母菌活性造成一定的影响,从而影响其最终的脱腥效果<sup>[19]</sup>。顾赛麒等<sup>[5]</sup>研究表明脱除海带腥味时酵母菌发酵温度在 25 °C 左右较适宜。本研究的发酵温度条件与文献<sup>[5]</sup>的研究结果相似,但活化菌液稀释倍数、料液比及发酵时间存在差异,其主要原因是发酵的藻类原料不同。

## 2.2 发酵对江蓠挥发性成分的影响

GC-MS 分析结果如表 2 所示。

表 2 发酵前后江蓠挥发性化合物定性定量结果

Table 2 Qualitative and quantitative results of volatile compounds before and after fermentation

RT/min	挥发性化合物名称	RIa	RIb	特征离子碎片	鉴定依据	相对占比/%	
						未脱腥	脱腥
醇类							
20.49	1-辛烯-3-醇	983	981	57 72 85	MS, RI, Std	10.83±1.20	5.35±0.52
23.45	2-乙基己醇	1 032	1 030	57 70 83	MS, RI, Std	25.78±2.73	25.71±2.30
23.70	苯甲醇	1 037	1 037	51 79 91	MS, RI	6.61±6.85	5.83±5.65
25.44	2-辛烯-1-醇	1 067	1 069	57 68 95	MS, RI, Std	3.48±3.20	4.46±0.29
26.85	芳樟醇	1 100	1 101	41 71 93	MS, RI, Std	7.28±0.32	9.43±0.82
29.84	L-薄荷醇	1 176	1 172	41 71 95	MS, RI	-	6.95±2.10
29.85	α,α-4-三甲基环己基甲醇	1 176	1 178	41 71 95	MS, RI	4.59±0.66	-
30.04	4-萜品醇	1 181	1 182	43 71 93	MS, RI	2.06±1.17	3.05±0.41
31.83	橙花醇	1 231	1 232	41 69 93	MS, RI, Std	-	3.37±0.32
38.83	(E)-5-十二烯-1-醇	1 462	1 464	41 67 82	-	-	7.39±1.00
50.29	异植物醇	1 949	1 949	43 71 82	MS, RI, Std	-	1.48±1.70
52.64	油醇	-	2 060	55 67 82	MS, RI	-	2.87±2.91
53.87	叶绿醇	-	2 089	43 71 95	MS, RI	13.00±17.25	50.25±24.29
醛类							
7.95	正己醛	801	780	44 72 83	MS, RI	21.83±20.22	-
18.73	(Z)-2-庚烯醛	960	964	41 70 83	MS, RI	2.11±2.11	-
21.91	正辛醛	1 002	1 001	41 69 84	MS, RI	17.04±4.42	20.58±2.65
24.88	(Z)-2-辛烯醛	1 061	1 062	41 70 83	MS, RI, Std	56.86±7.35	49.43±1.00
27.05	壬醛	1 105	1 104	41 70 82	MS, RI, Std	93.52±15.98	180.02±19.12
29.06	香茅醛	1 156	1 157	41 69 95	MS, RI, Std	-	2.42±0.89
29.30	(Z)-2-壬醛	1 162	1 162	41 70 83	MS, RI, Std	-	13.62±0.79
30.31	2,4-二甲基苯甲醛	1 187	1 190	39 77 105	MS, RI, Std	-	3.75±2.11
30.32	4-乙基苯甲醛	1 188	1 181	39 77 105	MS, RI	4.60±0.70	-
30.62	(Z)-4-癸烯醛	1 195	1 193	41 67 84	MS, RI	10.57±3.94	3.92±0.29
31.02	癸醛	1 207	1 207	43 70 82	MS, RI, Std	75.30±18.00	127.54±71.90
31.33	(E,E)-2,4-壬二烯醛	1 216	1 216	41 82 82	MS, RI, Std	5.17±0.73	-
32.95	(Z)-2-癸烯醛	1 264	1 264	43 70 83	MS, RI, Std	30.65±11.67	15.54±1.16
33.28	柠檬醛	1 274	1 276	41 69 84	MS, RI, Std	6.91±0.97	-
34.40	十一醛	1 309	1 308	43 68 82	MS, RI, Std	8.67±1.079	12.46±2.63
34.72	(Z),(Z)-2,4-癸二烯醛	1 319	1 319	41 81 83	MS, RI	46.97±7.02	12.13±1.30
37.41	十二醛	1 410	1 409	43 68 82	MS, RI	9.16±2.02	16.12±3.54
47.52	十六醛	1 818	1 817	43 68 82	MS, RI	9.78±1.59	4.50±4.55
酮类							
20.95	甲基庚烯酮	989	986	43 69 94	MS, RI	-	2.13±0.13
25.53	苯乙酮	1 068	1 068	-	MS, RI, Std	32.24±8.60	21.16±2.57
38.67	(E)-香叶基丙酮	1 456	1 457	43 69 93	MS, RI, Std	50.42±2.55	60.94±1.99
48.14	植酮	1 847	1 845	43 58 85	MS, RI	101.12±23.87	74.57±42.03

续表 2 发酵前后江蕨挥发性化合物定性定量结果

Continue table 2 Qualitative and quantitative results of volatile compounds before and after fermentation

RT/min	挥发性化合物名称	RIa	RIb	特征离子碎片	鉴定依据	相对占比/%	
						未脱腥	脱腥
烯烃类							
23.25	(D)-柠檬烯	1 028	1 028	41 68 93	MS, RI, Std	2.36±1.52	-
酯类							
25.58	三氟乙酸辛酯	1 074	1 057	41 70 84	MS, RI	9.05±0.90	9.14±0.57
36.47	异丁酸 2-乙基-3-羟基己基酯	1 378	1 375	43 71 89	MS, RI	-	1.78±1.65
47.66	肉豆蔻酸异丙酯	1 825	1 824	43 60 102	MS, RI, Std	2.45±2.36	-
48.81	邻苯二甲酸二异丁酯	1 878	1 876	57 76 104	MS, RI, Std	18.73±13.07	12.75±5.87
49.83	棕榈酸甲酯	1 926	1 926	43 74 87	MS, RI, Std	16.96±5.20	-
50.81	邻苯二甲酸二丁酯	1 974	1 973	41 76 104	MS, RI, Std	7.07±3.35	6.03±3.71
醚类							
28.88	邻苯二甲醚	1 151	1 150	41 77 95	MS, RI, Std	21.37±5.46	15.16±1.47
其他类							
21.03	2,4,6-三甲基吡啶	990	987	39 79 106	MS, RI	-	26.03±9.00
30.24	萘	1 186	1 185	51 64 102	MS, RI	-	1.58±0.89
32.25	2,3-二甲氧基甲苯	1 243	1 183	39 77 91	MS, RI	3.49±1.15	-
33.81	茴香脑	1 290	1 290	39 77 105	MS, RI, Std	-	44.98±5.78
40.31	2,4-二叔丁基苯酚	1 517	1 518	57 74 107	MS, RI, Std	5.87±1.30	7.37±2.06
41.00	双(2-甲基-3-咪唑基)二硫	1 540	1 544	43 69 85	MS, RI, Std	13.49±4.17	25.71±2.61
43.01	柏木脑	1 624	1 619	43 81 95	MS, RI, Std	3.32±2.04	7.26±1.64

注: RT(retention time)为挥发性化合物在 Rtx-5MS 色谱柱上的保留时间; RIa 为本研究根据 C8-C20 的保留时间计算得到的保留指数; RIb 为参考网站(<https://webbook.nist.gov/chemistry/>)相同型号柱子的保留指数; 鉴定依据中 MS 为质谱库(NIST11、NIST11s、FFNSC1.3)搜索结果; Std 为标准品对比结果; RI 为保留指数对比结果; -表示未检出。

由表 2 可知, 未经脱腥的江蕨样品中共鉴定出 7 大类 37 种挥发性成分, 其中醇类 8 种、烯烃 1 种、醛类 15 种、酮类 3 种、酯类 5 种、醚类 1 种、其他类 4 种; 发酵脱腥的江蕨样品中共鉴定出 6 大类 40 种挥发性成分, 其中醇类 12 种、醛类 13 种、酮类 4 种、酯类 4 种、醚类 1 种、其他类 6 种。江蕨空白对照样品的挥发性成分中, 醇类主要有 1-辛烯-3-醇(10.83%)、2-乙基己醇(25.78%), 导致腥味的醛类主要有正己醛(21.83%)、(Z)-2-辛烯醛(56.86%)、(Z)-4-癸烯醛(10.57%)、(Z),(Z)-2,4-癸二烯醛(46.97%), 酮类主要有植酮(101.12%)。江蕨经过发酵后, 醇类、醛类和酮类物质明显减少, 烯烃类和其他类物质明显增多。相关研究表明, 醛类、醇类化合物气味阈值一般较低, 通常会产生一些令人不愉快、辛辣的刺激性气味, 其中正己醛、2-辛烯醛、(Z)-4-癸烯醛、2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇等是腥味的主要贡献者<sup>[20-22]</sup>。未发酵的江蕨含有一定量的 1-辛烯-3-醇、正己醛、(Z)-2-癸烯醛、(Z),(Z)-2,4-癸二烯醛和 (Z)-4-癸烯醛, 这些成分主要呈现腥味, 可能是构成江蕨腥味的主要物质。酵母菌发酵后, 正己醛未检出, 1-辛烯-3-醇由 10.83% 降至 5.35%、(Z)-4-癸烯醛由 10.57% 降至 3.92%、(Z),(Z)-2,4-癸二烯醛由 46.97% 降至 12.13%。通过对比发现, 经过发酵处理后, 江蕨中的腥味成分大幅度降低, 其中正己醛脱

除率为 100%, 1-辛烯-3-醇降低率达 51%, (Z)-4-癸烯醛降低率为 63%, (Z),(Z)-2,4-癸二烯醛降低率为 74%, (Z)-2-辛烯醛降低率为 13%, 该结果与顾赛麒等<sup>[15]</sup>研究结果相似。此外, L-薄荷醇由 0% 增至 6.95%, (E)-5-十二烯-1-醇由 0% 增至 7.39%, (E)-香叶基丙酮由 50.42% 增至 60.94%。相关文献报道, L-薄荷醇和 (E)-5-十二烯-1-醇主要呈柑橘香和薄荷香, (E)-香叶基丙酮主要呈玫瑰花香<sup>[23]</sup>。根据 Xu 等<sup>[24]</sup>研究结果, 酿酒酵母发酵脱腥是在还原型辅酶 I (nicotinamide adenine dinucleotide, NADH)/还原型辅酶 II (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADPH)、烟酰胺腺嘌呤二核苷磷酸 (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADP+)/烟酰胺腺嘌呤二核苷酸 (nicotinamide adenine dinucleotide, NAD+) 的前提下, 烯酮还原酶、醛酮还原酶、醇脱氢酶、醛脱氢酶、环氧化物水解酶等催化发生醛、醇类的氧化还原反应、醚的分解以及酯化合成反应, 将腥味成分转化成无腥味的成分。以上研究结果说明, 发酵后江蕨腥味的降低可能与其腥味成分大幅度降低有关, 但也可能与其花香成分增加有关, 其生化反应过程可能与酶催化的醛醇氧化还原反应、醚分解以及酯化合成反应相关。

### 2.3 发酵脱腥对江蕨粉应用性质的影响

发酵脱腥对江蕨粉应用性质的影响见表 3。

表3 发酵脱腥前后江蕨粉理化性质对比

Table 3 Comparison of physicochemical properties before and after fermentation

项目	腥味强度 评分	持水性/ (g/g)	持油性/ (g/g)	白度/%	凝胶强度/ (N·mm)
未脱腥	2.28±0.10	29.20±0.13	5.73±0.22	1.86±0.18	355±101
脱腥	9.67±0.08	30.50±0.19	6.09±0.29	1.77±0.22	463±350

由表3可以看出,经过发酵脱腥处理的江蕨样品,腥味强度明显降低,持水性、持油性、白度和凝胶强度有轻微变化。研究表明,膳食纤维多糖链能够形成多孔结构,其大量亲水基团可通过氢键作用来吸收和保持水分<sup>[25]</sup>。同时,膳食纤维结构上含有大量的疏水亲油基团,使其具有良好的持油能力。此外,白度和凝胶强度对膳食纤维的应用也具有重要影响<sup>[26-27]</sup>。研究显示,持水能力高的膳食纤维可以锁定食品中更多水分,稳定食品的形态,减少焙烤类制品因脱水而引起的皱缩<sup>[28-29]</sup>。在酵母菌发酵过程中,江蕨粉的比表面积和亲水基团增加,从而使其持水性提高。研究表明,高持油性的膳食纤维可以防止烹饪过程中脂肪流失,显著改善食品的风味和口感,并使高脂食品更稳定,有助于延长保质期<sup>[30]</sup>。

### 3 结论

以江蕨为原料,研究直投式酵母菌发酵对海藻腥味强度、腥味成分、膳食纤维持水性、持油性、凝胶强度等应用性质的影响。结果表明,直投式酵母菌在发酵温度25℃、菌液稀释4倍、江蕨与稀释菌液比例1:20(g/mL)、发酵时间4h条件下具有良好的发酵脱腥效果。酵母菌发酵后,江蕨样品的腥味强度评分由2.28上升至9.67,腥味成分正己醛、1-辛烯-3-醇、(Z)-4-癸烯醛、(Z)、(Z)-2,4-癸二烯醛明显下降,持水性、持油性、白度及凝胶强度变化很小。本研究可为江蕨的脱腥及其膳食纤维的生产奠定技术基础,还为其其他海藻脱腥及其膳食纤维加工提供参考,对提高江蕨的加工利用价值具有重要参考意义。

### 参考文献:

- [1] 罗茵.《2020中国渔业统计年鉴》出版 广东水产品总产量首次全国第一[J]. 海洋与渔业, 2020(6): 12-13.  
LUO Yin. 2020 China fishery statistical yearbook, the total output of aquatic products in Guangdong ranks first in China for the first time [J]. Ocean and Fishery, 2020(6): 12-13.
- [2] 曲茂华, 张凤英, 何名芳, 等. 海藻糖生物合成及应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 358-362.  
QU Maohua, ZHANG Fengying, HE Mingfang, et al. Research progress in trehalose biosynthesis and applications[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16): 358-362.
- [3] 吴九夷, 姚文晶, 曹传爱, 等. 海藻膳食纤维对低脂低盐鸡肉法兰克福香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 87-93.

- WU Jiuyi, YAO Wenjing, CAO Chuan'ai, et al. Effect of seaweed dietary fiber on wieners quality of low-fat and low-salt chicken frankfurters [J]. Food Science, 2023, 44(2): 87-93.
- [4] GRESSLER V, STEIN É M, DÖRR F, et al. Sesquiterpenes from the essential oil of *Laurencia dendroidea* (Ceramiales, Rhodophyta): Isolation, biological activities and distribution among seaweeds[J]. Revista Brasileira De Farmacognosia, 2011, 21(2): 248-254.
- [5] 顾赛麒, 唐文燕, 周洪鑫, 等. 响应面法优化海带脱腥工艺及其色泽品质评价[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 217-226.  
GU Saiqi, TANG Wenyan, ZHOU Hongxin, et al. Optimization of deodorization process for *Laminaria japonica* by response surface methodology and evaluation of its color quality[J]. Food Science, 2018, 39(18): 217-226.
- [6] 张丽君, 刘冬, 李世敏. 螺旋藻脱腥工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(6): 95-97.  
ZHANG Lijun, LIU Dong, LI Shimin. Study on deodorization process of *Spirulina*[J]. Food and Fermentation Industries, 2008, 34(6): 95-97.
- [7] 潘江球, 辛世雄, 谢主兰, 等. 江蕨即食风味食品碱法脱腥工艺条件研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(9): 225-227.  
PAN Jiangqiu, XIN Shixiong, XIE Zhulan, et al. Study on deodorization process of *Gracilaria* instant food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(9): 225-227.
- [8] 杨超. 微生物发酵龙须菜对脱腥及活性物质的影响[D]. 临汾: 山西师范大学, 2021.  
YANG Chao. Effect of microbial fermentation of *Gracilaria lemaneiformis* on deodorization and active substances[D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2021.
- [9] 王琴, 李洪军, 杨莉, 等. 直投式商业发酵剂对发酵香肠品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 103-111.  
WANG Qin, LI Hongjun, YANG Li, et al. Effect of commercial direct vat set cultures on the quality of fermented sausages[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(16): 103-111.
- [10] 于学萍, 童群义. 发酵法脱腥对豪猪肝挥发性风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(2): 41-47.  
YU Xueping, TONG Qunyi. Effect of fermentation deodorization on volatile compounds of Porcupine liver[J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(2): 41-47.
- [11] 刘豪, 王岸娜, 吴立根. 发酵改性对麸皮中可溶性膳食纤维含量的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 21-27.  
LIU Hao, WANG Anna, WU Ligen. Effect of fermentation modification on dietary fiber content in bran[J]. Food Research and Development, 2019, 40(23): 21-27.
- [12] YANG Z Y, BALDERMANN S, WATANABE N. Recent studies of the volatile compounds in tea[J]. Food Research International, 2013, 53(2): 585-599.
- [13] KAZAZI H, REZAEI K, GHOTB-SHARIF S J, et al. Supercritical fluid extraction of flavors and fragrances from *Hyssopus officinalis* L. cultivated in Iran[J]. Food Chemistry, 2007, 105(2): 805-811.
- [14] ZHANG F X, ZHAO H L, CAO C A, et al. Application of temperature-controlled ultrasound treatment and its potential to reduce phosphate content in frankfurter-type sausages by 50%[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 71: 105379.
- [15] 肖红波, 卢向阳, 孙志良, 等. 可溶性裙带菜膳食纤维对小鼠糖代谢的影响[J]. 中国临床营养杂志, 2006, 14(3): 179-182.  
XIAO Hongbo, LU Xiangyang, SUN Zhiliang, et al. Effects of soluble *Undaria pinnatifida* dietary fiber on sugar metabolism in mice[J]. Chinese Journal of Clinical Nutrition, 2006, 14(3): 179-182.
- [16] 吴兴雨, 孙凯杨, 姚玥, 等. 两种方法提取的亚麻籽蛋白持水



- 性、持油性、溶解性和氨基酸组成比较[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 43-46, 51.
- WU Xingyu, SUN Kaiyang, YAO Yue, et al. Comparison of water holding capacity, oil holding capacity, solubility and amino acid composition of flaxseed protein extracted by two methods[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(4): 43-46, 51.
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂 琼脂: GB 1886.239—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- The National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National Food Safety Standard Food Additives Agar: GB 1886.239—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [18] 王鑫, 吴瑛婕, 卢方云, 等. 瓜尔豆魔芋胶的复配胶结合超声处理对鸡血豆腐凝胶特性及其作用力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 187-193.
- WANG Xin, WU Yujie, LU Fangyun, et al. Effect of gel properties and molecular interactions of complex gum made by guar gum and konjac gum combined with ultrasound on chicken blood tofu[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 187-193.
- [19] 刘秀娟, 李庆鹏, 崔龙, 等. 混菌发酵苹果酵素工艺研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 190-198.
- LIU Xiujuan, LI Qingpeng, CUI Long, et al. Study on the process of mixed fermented apple Jiaosu[J]. Food Safety & Quality, 2022, 13(1): 190-198.
- [20] LIU T T, YU J W, SU M, et al. Production and fate of fishy odorants produced by two freshwater chrysophyte species under different temperature and light conditions[J]. Water Research, 2019, 157: 529-534.
- [21] GUO Q Y, YU J W, ZHAO Y Y, et al. Identification of fishy odor causing compounds produced by *Ochromonas* sp. and *Cryptomonas* ovate with gas chromatography - olfactometry and comprehensive two dimensional gas chromatography[J]. Science of the Total Environment, 2019, 671: 149-156.
- [22] CHEN D K, CHEN X, CHEN H, et al. Identification of odor volatile compounds and deodorization of *Paphia undulata* enzymatic hydrolysate[J]. Journal of Ocean University of China, 2016, 15(6): 1101-1110.
- [23] 安皓南, 张凤梅, 李振杰, 等. 玫瑰提取物特征香气成分分析及其在卷烟中的应用[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2023, 32(5): 563-568.
- AN Haonan, ZHANG Fengmei, LI Zhenjie, et al. Analysis of characteristic aroma components of extracts from *Rosa centifolia* and its application in cigarette[J]. Journal of Yunnan Nationalities University (Natural Sciences Edition), 2023, 32(5): 563-568.
- [24] 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.
- [25] 陈思妤, 焦叶, 崔波, 等. 膳食纤维理化特性及其改性方法研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(5): 234-240.
- CHEN Siyu, JIAO Ye, CUI Bo, et al. Research progress in physico-chemical properties and modification methods of dietary fiber[J]. Food & Machinery, 2022, 38(5): 234-240.
- [26] 齐玉林, 高旭东. PVC 树脂白度测定过程中的影响因素[J]. 聚氯乙烯, 2021, 49(7): 30-33.
- QI Yulin, GAO Xudong. Factors of influencing the determination of whiteness of PVC resins[J]. Polyvinyl Chloride, 2021, 49(7): 30-33.
- [27] 陶阳, 陈洪生, 王长远, 等. 改性绿豆蛋白与小麦蛋白相互作用对其凝胶特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 60-69.
- TAO Yang, CHEN Hongsheng, WANG Changyuan, et al. Effect of interaction between modified mung bean protein and wheat protein on their gel properties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(6): 60-69.
- [28] MA Q Y, MA Z Y, WANG W X, et al. The effects of enzymatic modification on the functional ingredient - Dietary fiber extracted from potato residue[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 153: 112511.
- [29] GAN J P, HUANG Z Y, YU Q, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105549.
- [30] 蔡沙, 蔡芳, 施建斌, 等. 甘薯生全粉对面团特性及馒头品质的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 219-225.
- CAI Sha, CAI Fang, SHI Jianbin, et al. Effects of raw whole sweet potato flour on dough characteristics and steamed bread quality[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 219-225.

加工编辑: 孟璇星  
收稿日期: 2023-02-09