

# 大孔树脂脱除海带浆腥味工艺优化

方榕辉<sup>1</sup> 王芊惠<sup>2</sup> 庞 杰<sup>2</sup> 严志明<sup>2</sup>

(1. 福州大学至诚学院,福建 福州 350002; 2. 福建农林大学食品科学学院,福建 福州 350000)

**摘要:** [目的]采用大孔树脂脱除海带浆中的腥味挥发性物质。[方法]以顶空固相微萃取/气相色谱—质谱(HS-SPME/GC-MS)分析结果作为指标,探讨大孔树脂种类、脱腥温度和脱腥时间对海带浆脱腥效果的影响;通过电子鼻分析海带浆经大孔树脂脱腥前后的气味差异性。[结果]采用AB-大孔树脂对海带浆进行脱腥,大孔树脂添加量为7.3%、脱腥时间为2 h、脱腥温度为51 °C时,大孔树脂对海带浆的脱腥效果最佳,海带浆中醇类、醛类和酮类挥发性物质的脱除率分别为44.98%、47.10%、30.31%,其中腥味物质的去除率为51.6%。电子鼻检测结果显示海带浆进行大孔树脂脱腥前后的风味有明显差异。[结论]AB-8大孔树脂能有效脱除海带浆中的腥味物质并改善海带浆的风味。

**关键词:** 大孔树脂;海带浆;脱腥;顶空相微萃取/气相色谱—质谱;电子鼻

## Process optimization for deodorization of kelp pulp by macroporous resin

FANG Ronghui<sup>1</sup> WANG Qianhui<sup>2</sup> PANG Jie<sup>2</sup> YAN Zhiming<sup>2</sup>

(1. Zhicheng College, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350000, China)

**Abstract:** [Objective] To employ macroporous resin for deodorization of kelp pulp. [Methods] The effects of macroporous resin type, deodorization temperature, and deodorization time on the deodorization of kelp pulp are explored through single-factor experiments, with the results of headspace-solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS) as an indicator. An electronic nose is used to analyze the differences in flavor of kelp pulp before and after the deodorization with macroporous resin. [Results] The optimal deodorization process for kelp pulp is deodorization with 7.3% AB-macroporous resin at 51 °C for 2 h. At these conditions, the removal rates of alcohols, aldehydes, and ketones in kelp pulp reach 44.98%, 47.1%, and 30.31%, respectively, and that of fishy substances reaches 51.6%. The electronic nose detection results show a significant difference in flavor of kelp pulp before and after the deodorization with macroporous resin. [Conclusion] AB-8 macroporous resin could effectively remove fishy substances and significantly improve the flavor of kelp pulp.

**Keywords:** macroporous resin; kelp pulp; deodorization; headspace-solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS); electronic nose

海带,又名昆布、纶布等,属海藻类植物<sup>[1]</sup>。海带中含有大量的蛋白质、氨基酸、多糖、膳食纤维、维生素、矿物质以及微量元素等<sup>[2]</sup>。其价格相对低廉,因而海带在食品、医药、化妆品等诸多领域中得到了广泛的应用与认可。但是海带中部分挥发性成分的腥味会影响消费者的接受度,限制了海带行业的发展<sup>[3-4]</sup>。在食品加工

领域,海带浆作为原料被广泛应用于焙烤制品、饮品、调味酱、面食制品等开发<sup>[5-10]</sup>。打浆过程中,海带的细胞结构被破坏,其腥味物质被释放出来,使得海带浆的腥味更为明显。因此,需在打浆之前或之后对其进行脱腥处理。

海带的腥味物质主要包括醇类、醛类、酮类、烷烃、卤

**基金项目:**福建省自然科学基金面上项目(编号:2023J01465)

**通信作者:**严志明(1983—),男,福建农林大学副教授,博士。E-mail:45765545@qq.com

**收稿日期:**2025-07-11 **改回日期:**2025-09-23

**引用格式:**方榕辉,王芊惠,庞杰,等.大孔树脂脱除海带浆腥味工艺优化[J].食品与机械,2025,41(11):160-167.

**Citation:**FANG Ronghui, WANG Qianhui, PANG Jie, et al. Process optimization for deodorization of kelp pulp by macroporous resin[J]. Food & Machinery, 2025, 41(11): 160-167.

烷烃、烯烃等挥发性化合物<sup>[11]</sup>。目前,海带脱腥方法主要包括生物脱腥法、化学脱腥法和物理脱腥法<sup>[12]</sup>。生物脱腥法是依靠酵母、乳酸菌和醋酸杆菌等微生物的代谢活动达到减少或去除腥味物质的目的<sup>[13~15]</sup>。生物脱腥法的优点在于其安全、高效以及能够在一定程度上提高生物活性<sup>[4]</sup>。但生物脱腥法对菌种的选用和发酵条件的控制有严格的要求,一定程度上增加了脱腥的难度和复杂性。化学脱腥法主要是利用酸性物质与海带中的腥味物质反应,从而达到去除腥味物质的效果<sup>[16~17]</sup>。化学脱腥法的优点在于其操作简单,但存在酸性脱腥剂的残留问题。物理脱腥方法主要通过吸附、包埋和掩蔽等手段去除或减少腥味物质<sup>[18]</sup>。其中,吸附脱腥法具有脱腥成本低、操作简单和安全无害等优点。茶叶和活性炭对海带有一定的吸附脱腥效果,但海带经茶叶脱腥后会残留茶苦味,活性炭则是吸附选择性差导致海带脱腥后缺乏风味<sup>[17]</sup>。大孔树脂是一种具有大孔网状结构和高比表面积的高分子聚合物,其通过静电作用、氢键相互作用和尺寸筛分作用等吸附有机物<sup>[19]</sup>。近年来,大孔树脂已被广泛应用于水产品酶解液的脱腥、脱苦和脱色<sup>[20~22]</sup>。

研究拟使用大孔树脂为吸附剂对海带浆进行脱腥处理,以顶空固相微萃取/气相色谱—质谱(HS-SPME/GC-MS)分析结果作为指标,探究大孔树脂种类、大孔树脂添加量、吸附时间和吸附温度对海带浆脱腥效果的影响;并通过电子鼻检测大孔树脂脱腥前后的海带浆气味,采用主成分和雷达图分析法比较大孔树脂脱腥前后海带浆气味的差异性,旨在为海带深加工中腥味控制及品质提升提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

盐渍海带:新鲜莆田南日岛海带,通过食用盐腌制24 h,−20 ℃冷冻保存,福建红太阳精品有限公司;

AB-8、D101、CAD40大孔吸附树脂:国药集团化学试剂有限公司;

乙醇、氢氧化钠、盐酸:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

pH计:FE28型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

双功能水浴恒温振荡器:SHA-B型,常州金坛良友仪器有限公司;

粉碎机:Model MULTIDRIVE C S025型,德国IKA公司;

胶体磨:JMS-500型,廊坊市廊通机械有限公司;

高压均质机:SRH型,上海申鹿均质机有限公司;真空抽滤装置:R300A型,上海领德仪器有限公司;干燥箱:PH-070A型,上海一恒科学仪器有限公司;便携式电子鼻:PEN3.5型,德国AIRSENSE公司;气相色谱—质谱联用仪:QP-2010型,日本岛津公司;固相微萃取纤维:65 μm PDMS/DVB,德国Supelco公司。

### 1.2 方法

1.2.1 海带浆的制备 挑选完整无褐斑的盐渍海带,洗去表面淤泥和盐粒,用清水浸泡2 h,沥干。将干净的海带与去离子水按 $m_{\text{海带}}:V_{\text{水}}=1:10$ (g/mL)混匀,打浆,用胶体磨研磨6次,30 MPa均质3次,得海带浆。

1.2.2 大孔树脂预处理 将AB-8、D101、CAD403种大孔树脂放入乙醇中混匀浸泡24 h,用蒸馏水反复抽滤洗涤,直到滤液无白色浮沫。加入1 mmol/L氢氧化钠,搅匀浸泡5 h,用蒸馏水抽滤洗净,取最后一次滤液用pH计测定,直至pH值为中性。加入1 mmol/L盐酸,搅匀浸泡5 h,用蒸馏水抽滤洗净,用pH计测定,直到最后一次滤液为中性。得到的大孔吸附树脂于真空干燥箱中干燥24 h,冷却后放入干燥器保存备用。

1.2.3 HS-SPME 固相微萃取纤维使用前需在气相色谱—质谱进样口老化30 min;取8 mL海带浆于20 mL顶空进样瓶中,60 ℃水浴搅拌,将固相微萃取纤维插入顶空进样瓶内萃取50 min,取出固相微萃取纤维并在250 ℃的气相进样口解吸5 min。

#### 1.2.4 GC-MS分析

(1) 气相色谱条件:DB-5MS色谱柱(30 m×0.25 mm,0.25 μm);色谱柱初始温度50 ℃,以8 ℃/min升至100 ℃,以12 ℃/min升至230 ℃,保持10 min。载气选用He,流量1 mL/min。

(2) 质谱条件:离子源温度210 ℃,电子能量70 eV,全扫描模式,质量扫描范围33~400 amu。

1.2.5 单因素试验 取一定量预处理后的大孔树脂于海带浆中,放入恒温摇床中,一定温度下振摇吸附一定时间后取出,用滤网过滤大孔树脂。以GC-MS测得的挥发性物质峰面积为指标,探究大孔树脂种类、大孔树脂添加量、吸附温度和吸附时间对海带浆脱腥效果的影响。

1.2.6 响应面试验 在单因素试验基础上,以AB-8大孔树脂添加量、脱腥时间和脱腥温度为自变量,海带浆挥发性化合物峰面积为响应值,通过响应面Box-Behnken试验优化海带浆大孔树脂吸附脱腥工艺条件。

1.2.7 电子鼻分析 参照谷怡静<sup>[23]</sup>的方法。取8 mL海带浆于20 mL顶空进样瓶中,设置3个平行样品。

### 1.3 数据处理

采用Design-Expert.V8.0.6.1软件进行响应面试验设

计及结果分析。采用 Origin 8.0 软件绘图,数据表示为平均值±标准偏差。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验

大孔树脂的内部网状结构和本身所带有的基团决定其对有机物的吸附性和筛选性<sup>[24]</sup>。由图 1(a)可知,AB-8 大孔树脂脱腥后的挥发性有机物峰面积最少;CAD40 大孔树脂脱腥后的挥发性有机物峰面积最大。海带的腥味物质多为弱极性小分子化合物。CAD40 大孔树脂为中极性,对海带中的弱极性腥味物质的吸附分离效果较差;D101 大孔树脂为非极性,平均孔径为 9~11 nm,因此对小分子的海带腥味物质吸附分离效果较差;AB-8 大孔树脂为非极性,平均孔径为 13~14 nm,其对海带腥味物质的吸

附分离效果最佳。因此,选用 AB-8 大孔树脂进行海带浆脱腥工艺研究。

由图 1(b)可知,当脱腥温度为 30~50 °C 时,挥发性物质的分子运动加强,更易被大孔树脂吸附,因此峰面积逐渐减小。当脱腥温度为 60 °C 时,挥发性化合物在大孔树脂中的吸附和脱附已达到平衡,峰面积未发生显著变化。

由图 1(c)可知,当脱腥时间为 0.5~1.5 h 时,挥发性物质的量逐渐增加,因此峰面积显著减少。当脱腥时间为 1.5~2.5 h 时,挥发性物质已达饱和,因此峰面积未发生显著变化。

由图 1(d)可知,当 AB-8 大孔树脂添加量为 1%~7% 时,挥发性物质的峰面积不断减小,当 AB-8 大孔树脂添加量为 7%~9% 时,挥发性物质的峰面积未有明显改变。

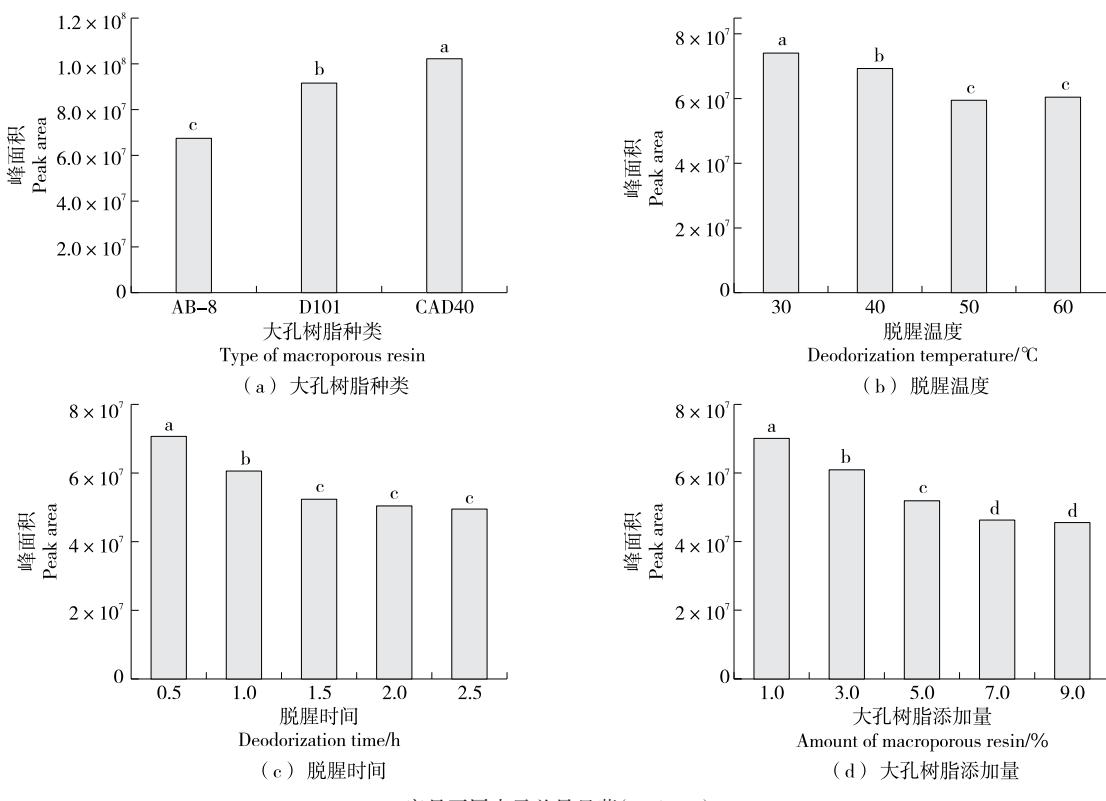


图 1 大孔树脂脱腥海带浆单因素试验结果

Figure 1 Results of single-factor experiments on the deodorization of kelp pulp via macroporous resin

### 2.2 响应面试验

基于单因素试验结果,以海带浆中挥发性化合物峰面积为指标,通过 Box-Behnken 试验优化 AB-8 大孔树脂脱腥工艺,试验因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

对试验数据进行回归方程拟合,得到拟合回归方程:

$$Y = 4.292 \times 10^7 - 4.6875 \times 10^6 A - 4.35 \times 10^6 B - 2.9375 \times 10^6 C + 2.8 \times 10^6 AB - 1.25 \times 10^5 AC - 9 \times 10^5 BC + 3.2775 \times 10^6 A^2 + 4.7025 \times 10^6 B^2 + 4.4775 \times 10^6 C^2 \quad (1)$$

由表 3 可知,模型  $P$  值  $< 0.05$ ,具有显著性,失拟项  $P$  值  $> 0.05$ ,不显著,说明该模型与实际拟合较好,能够拟合出 AB-8 大孔树脂吸附脱腥处理的最优工艺条件。A、B、C 的  $P$  值均  $< 0.01$ ,说明大孔树脂添加量、脱腥时间和脱腥

表1 响应面因素水平表

Table 1 Factors and levels of response surface design

水平	A 大孔树脂添加量/%	B 脱腥时间/h	C 脱腥温度/℃
-1	5	1.5	40
0	7	2.0	50
1	9	2.5	60

表2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface design and experimental results

试验号	A	B	C	峰面积( $\times 10^7$ )
1	0	0	0	4.29
2	-1	1	0	4.87
3	0	-1	-1	5.85
4	0	0	0	4.25
5	-1	0	1	5.22
6	0	0	0	4.26
7	-1	0	-1	5.76
8	1	0	-1	4.93
9	1	0	1	4.34
10	1	-1	0	4.74
11	0	-1	1	5.42
12	-1	-1	0	6.32
13	1	1	0	4.41
14	0	0	0	4.36
15	0	1	-1	5.18
16	0	0	0	4.30
17	0	1	1	4.39

温度均为影响海带脱腥极为显著的参数。AB 的  $P$  值  $< 0.01$ , 说明大孔树脂添加量和脱腥时间的交互作用对海带脱腥的影响极显著;BC 的  $P$  值  $< 0.05$ , 说明脱腥时间和脱腥温度的交互作用对海带脱腥的影响显著。 $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  的  $P$  值  $< 0.01$ , 说明三者的二次项作用对海带脱腥的影响极显著。各因素对峰面积的影响顺序为大孔树脂添加量  $>$  脱腥时间  $>$  脱腥温度。

由图 2(a)和图 2(b)可知,当脱腥时间一定时,峰面积随着大孔树脂添加量的增加先快速下降后变得平缓;当大孔树脂添加量一定时,峰面积随着脱腥时间的增加先快速下降后变得平缓;大孔树脂添加量和脱腥时间交互作用的等高线图呈现明显椭圆状,说明大孔树脂添加量与脱腥时间存在交互作用。由图 2(c)和图 2(d)可知,当脱腥温度一定时,峰面积随着大孔树脂添加量的增加先快速下降后平缓;当大孔树脂添加量一定时,峰面积随着脱腥温度的增减先下降后缓慢增加;大孔树脂添加量和脱腥温度交互作用的等高线图接近正圆,说明大孔树脂

表3 响应面模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of response surface model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	$6.774 \times 10^{14}$	9	$7.527 \times 10^{13}$	230.02	$< 0.0001$
A	$1.758 \times 10^{14}$	1	$1.758 \times 10^{14}$	537.21	$< 0.0001$
B	$1.514 \times 10^{14}$	1	$1.514 \times 10^{14}$	462.63	$< 0.0001$
C	$6.903 \times 10^{13}$	1	$6.903 \times 10^{13}$	210.97	$< 0.0001$
AB	$3.136 \times 10^{13}$	1	$3.136 \times 10^{13}$	95.84	$< 0.0001$
AC	$6.250 \times 10^{10}$	1	$6.250 \times 10^{10}$	0.19	0.6752
BC	$3.240 \times 10^{12}$	1	$3.240 \times 10^{12}$	9.90	0.0162
$A^2$	$4.386 \times 10^{13}$	1	$4.386 \times 10^{13}$	134.04	$< 0.0001$
$B^2$	$9.311 \times 10^{13}$	1	$9.311 \times 10^{13}$	284.55	$< 0.0001$
$C^2$	$8.411 \times 10^{13}$	1	$8.411 \times 10^{13}$	257.97	$< 0.0001$
残差	$2.290 \times 10^{12}$	7	$3.272 \times 10^{11}$		
失拟误差	$1.542 \times 10^{12}$	3	$5.142 \times 10^{11}$	2.75	0.1766
纯误差	$7.480 \times 10^{11}$	4	$1.870 \times 10^{11}$		
总和	$6.797 \times 10^{14}$	16			

†  $R^2 = 0.9966$ ,  $R_{\text{Adj}}^2 = 0.9923$ ;  $P < 0.05$  为显著,  $P < 0.01$  为极显著。

添加量与脱腥温度不存在交互作用。由图 2(e)和图 2(f)可知,当脱腥温度一定时,峰面积随着脱腥时间的增加先下降后平缓;当脱腥时间一定时,峰面积随着脱腥温度的增加先下降后缓慢增加;脱腥温度和脱腥时间交互作用的等高线图呈椭圆,说明脱腥温度和脱腥时间之间存在一定的交互作用。

经 Design-Expert 10.0.7 软件预测,AB-8 大孔树脂吸附脱腥最佳条件为 AB-8 大孔树脂添加量 7.266%、脱腥时间 2.0665 h、脱腥温度 51.33 ℃,此条件下海带吸附脱腥后挥发性物质峰面积为  $4.2 \times 10^7$ 。为便于实际操作,选取 AB-8 大孔树脂添加量 7.3%、脱腥时间 2 h、脱腥温度 51 ℃ 进行验证实验,测得脱腥海带挥发性物质峰面积为  $4.18 \times 10^7$  ( $n=3$ ),与预测值接近,表明该回归模型可用作 AB-8 大孔树脂对海带浆吸附脱腥的工艺优化。

### 2.3 GC-MS 分析

由表 4 可知,海带原浆中共检出 39 种主要的挥发性物质,包括 10 种醇类物质、8 种醛类物质、5 种酮类物质、3 种酸类物质、6 种酯类物质和 7 种烃类物质。经 AB-8 大孔树脂处理后海带浆中共检出 37 种挥发性物质,包括 9 种醇类物质、7 种醛类物质、5 种酮类物质、3 种酸类物质、6 种酯类物质和 7 种烃类物质。

醇类化合物是海带浆中重要的挥发性物质,其相对含量占海带浆总挥发性物质的 22.28%。其中 3-羟基-1-辛烯醇具有鱼腥味和青草味,被认为对海带腥味有重要贡献<sup>[4,25]</sup>,其相对含量占海带浆醇类挥发性物质的 26.69%。

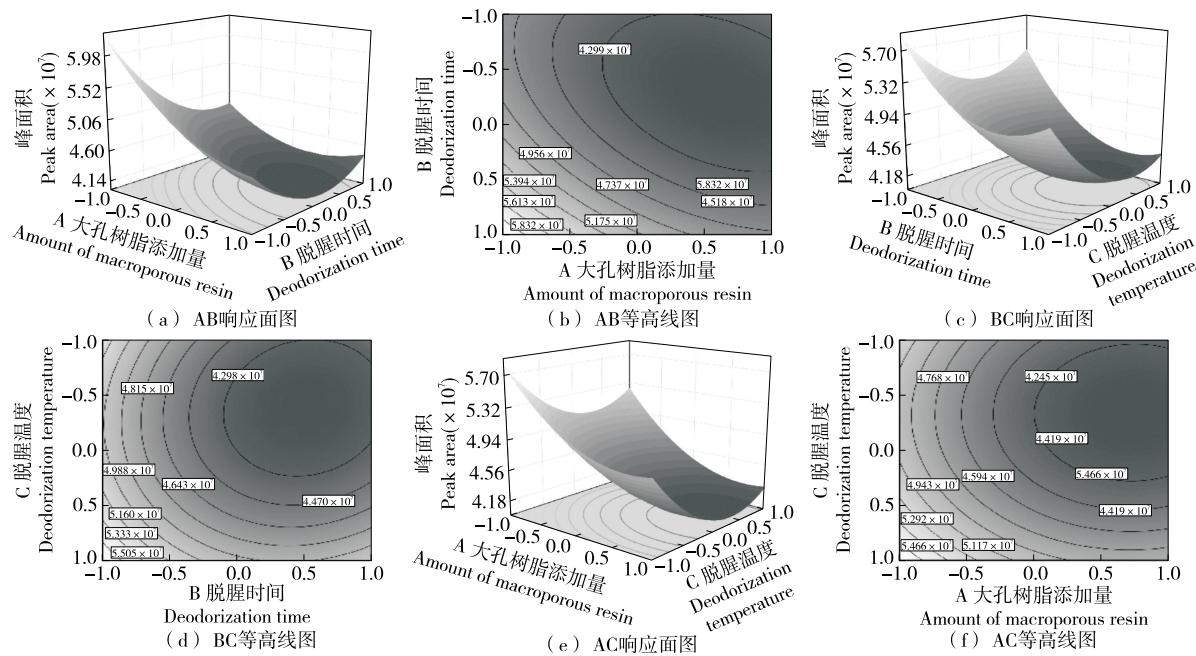


图 2 因素交互作用的响应面图和等高线图

Figure 2 Response surface plots and contour plots of interactions between factors

1-壬醇具有泥土味和脂肪味<sup>[15]</sup>，其相对含量占海带浆醇类挥发性物质相对含量的 16.81%。经过 AB-8 大孔树脂脱腥处理后，海带浆中醇类化合物数量减少了 1 种，含量降低了 44.98%，对海带腥味贡献较大的 3-羟基-1-辛烯醇的去除率为 49.39%，1-壬醇的去除率为 18.3%。

醛类化合物具有产生原生且浓郁气味的特性<sup>[26]</sup>，其相对含量占海带浆总挥发性物质的 28.58%。己醛、E-2-庚烯醛、E-2-辛烯醛、庚醛和辛醛为与腥味有关的化合物<sup>[27]</sup>，其相对含量分别占海带浆醛类挥发性物质的 19.39%，19.56%，15.02%，7.20%，3.95%。经过 AB-8 大孔树脂脱腥处理后，海带浆中醛类化合物含量降低了 47.1%，尤其是与腥味有关的醛类化合物含量明显降低，己醛、E-2-庚烯醛、E-2-辛烯醛和庚醛的去除率分别为 45.02%，51.53%，53.26%，38.97%，辛醛则未检出。

酮类化合物通常具有特殊的嗅感，其相对含量占海带浆总挥发性物质的 11.34%。1-辛烯-3-酮为典型的腥味物质<sup>[26]</sup>，对海带腥味有较大贡献。 $\beta$ -紫罗兰酮具有果香和木质味，2-辛酮具有青草和果香味，其对海带浆形成良好的风味有积极作用。经过大孔树脂脱腥处理后，海带浆中酮类物质含量降低了 30.31%，尤其是 1-辛烯-3-酮的去除率高达 57.91%，而  $\beta$ -紫罗兰酮和 2-辛酮的去除率分别为 14.49%，24.67%。

海带浆中共检出 3 种挥发性酸性化合物，其相对含量仅占海带浆总挥发性物质的 5.66%。经过大孔树脂脱腥

处理后，海带浆中酸性化合物去除率为 24.1%。花生四烯酸、二十二碳六烯酸和肉豆蔻酸没有明显的风味特征，酸性化合物对海带浆的风味贡献较小。

海带浆中共检出 6 种挥发性酯类化合物，其相对含量占海带浆总挥发性物质的 12.49%。其中，2-甲基丙酸酯、丁酸丁酯、E-丁酸-3-己烯酯和癸酸乙酯具有花果香味，但其阈值较高。经过大孔树脂脱腥处理后，海带浆中酯类化合物的去除率为 20.49%，其相对含量也提高到 15.73%。

海带浆中共检出 7 种挥发性烃类化合物，包括 5 种烷烃、1 种芳香烃和 1 种烯烃。烃类化合物的相对含量占海带浆总挥发性物质的 19.65%。经过大孔树脂脱腥处理后，烃类化合物的去除率为 30.4%。烃类化合物通常具有汽油味，但阈值较高<sup>[25]</sup>，对海带浆的风味影响较小。

综上，海带浆中的腥味物质包括 3-羟基-1-辛烯醇、己醛、E-2-庚烯醛、E-2-辛烯醛、庚醛、辛醛以及 1-辛烯-3-酮，这些腥味化合物的相对含量较高，占海带浆总挥发性化合物的 26.83%。经过 AB-8 大孔树脂脱腥处理后，腥味物质的相对含量显著降低，去除率达到 51.6%。此外，酮类化合物中的  $\beta$ -紫罗兰酮和 2-辛酮可以给海带浆带来良好的风味，经过 AB-8 大孔树脂吸附脱腥处理后去除率分别为 14.49%，24.67%，显著低于海带浆中腥味物质的去除率。说明采用 AB-8 大孔树脂对海带浆进行脱腥处理可以有效改善海带浆的风味。

表4 GC-MS分析海带浆中挥发性化合物结果  
Table 4 GC-MS results of volatile compounds in kelp pulp

种类	名称	峰面积		去除率/%	种类	名称	峰面积		去除率/%
		脱腥前	脱腥后				脱腥前	脱腥后	
醇类	1-辛醇	306 402	215 429	29.69	酮类	6,10-二甲基-5,9-十一双烯-2-酮	854 963	658 741	22.95
	E-2-壬烯-1-醇	1 014 493	751 425	25.93		$\beta$ -紫罗兰酮	178 239	152 950	14.19
	1-壬醇	1 048 619	856 720	18.30		2-辛酮	704 918	530 987	24.67
	E-2-癸烯醇	356 717	—	100.00	酸类	花生四烯酸	418 170	325 510	22.16
	3-羟基-1-辛烯醇	1 664 779	842 503	49.39		二十二碳六烯酸	441 184	319 581	27.56
	十二醇	434 861	126 970	70.80		肉豆蔻酸	725 720	561 180	22.67
	E-2-十二碳烯醇	104 887	90 856	13.38	酯类	2-甲基丙酸酯	989 765	697 270	29.55
	雪松醇	863 198	257 433	70.18		丁酸丁酯	876 568	779 852	11.03
	1-十四醇	212 864	104 278	51.01		E-丁酸-3-己烯酯	216 214	207 521	4.02
	己基癸醇	230 520	186 587	19.06		2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	424 740	352 079	17.11
醛类	己醛	1 551 426	852 942	45.02		癸酸乙酯	358 754	251 960	29.77
	E-2-庚烯醛	1 564 875	758 524	51.53		胡莫柳酯	631 382	492 116	22.06
	十一醛	852 674	529 874	37.86	烃类	十二烷	1 094 828	885 401	19.13
	E-2,4-庚烯二醛	1 285 746	657 912	48.83		正十三烷	800 385	622 791	22.19
	十五醛	652 304	519 820	20.31		十九烷	616 950	450 273	27.02
	E-2-辛烯醛	1 201 981	561 852	53.26		2,6,10-三甲基十五烷	767 776	519 807	32.30
	庚醛	576 583	351 896	38.97		十七烷	462 537	395 652	14.46
	辛醛	315 756	—	100.00		萘	1 347 804	705 254	47.67
酮类	1-辛烯-3-酮	638 055	268 520	57.91		$\alpha$ -柏木烯	411 716	250 412	39.18
	二氢- $\beta$ -紫罗兰酮	798 946	601 852	24.67					

#### 2.4 电子鼻分析

电子鼻数据分别采用主成分分析(PCA)和雷达图分析。由图3可知,PC1和PC2分别为75.4%和16.2%,两个主成分的累计贡献率为92.5%,高于85%的基准线,表明这两个主成分可有效代表样品的主要信息特征。经过AB-8大孔树脂处理过后,海带浆与未处理的海带原浆无重复交互部分,能被电子鼻区分,说明AB-8大孔树脂处理前后的海带浆整体气味有所差异。

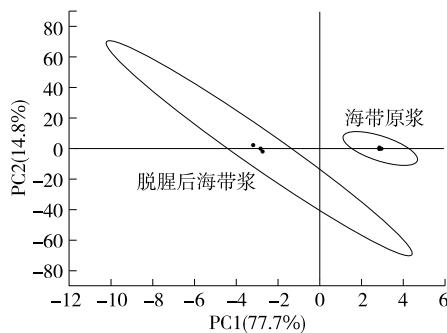


图3 海带浆脱腥前后的PCA分析图

Figure 3 PCA plot of kelp pulp before and after deodorization

由图4可知,响应最高的醇类、醛类和酮类化合物对应W2S传感器,其次是脂肪族烃类化合物对应的W3S传感器和氮氧化合物对应的W5S传感器,而其他传感器的响应非常低,说明醇类、醛类和酮类是海带浆的主要气味来源。此外,海带浆脱腥后,W2S传感器的响应大幅降低,而W3S和W5S传感器响应未有明显变化,说明AB-8大孔树脂可有效减少海带浆中醇类、醛类和酮类化合物含量,与GC-MS检测结果相符。

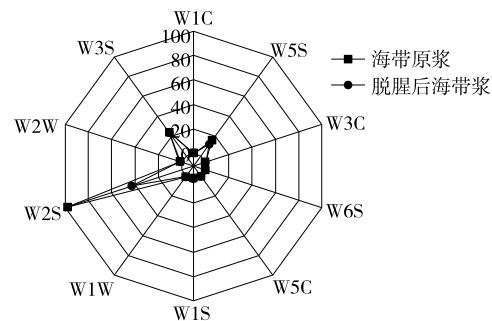


图4 海带浆脱腥前后的电子鼻雷达图

Figure 4 Electronic nose radar of kelp pulp before and after deodorization

### 3 结论

大孔树脂脱除海带浆腥味物质的最佳工艺条件为 AB-8 大孔树脂添加量 7.3%、脱腥时间 2 h、脱腥温度 51 ℃。HS-SPME/GC-MS 和电子鼻分析结果表明, AB-8 大孔树脂能有效减少海带浆中醇类、醛类和酮类挥发性化合物, 3 类挥发性化合物的脱除率分别为 44.98%, 47.10%, 30.31%, 其中腥味物质的去除率为 51.60%, 而具有花果香味的  $\beta$ -紫罗兰酮和 2-辛酮的去除率为 14.49% 和 24.67%。综上, AB-8 大孔树脂可以有效脱除海带浆腥味改善其风味。此外, 该研究仅考察了大孔树脂对海带浆的脱腥效果, 未来可全面评估脱腥工艺对海带浆营养成分和理化性质的影响, 确保在脱腥的同时, 不显著降低海带浆的营养价值和感官品质。

### 参考文献

- [1] 翟为. 昆布多糖的提取、纯化、衍生化及体外抗肿瘤活性研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2013: 1-2.
- [2] DI W. Extraction, purification, derivative and anti-tumor activities[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2013: 1-2.
- [3] 姚海芹, 王飞久, 刘福利, 等. 食用海带品系营养成分分析与评价[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 95-98.
- [4] YAO H Q, WANG F J, LIU F L, et al. Chemical analysis and nutritional assessment of new varieties of *Saccharina japonica* [J]. Food Science, 2016, 37(12): 95-98.
- [5] 房景辉, 何为, 毛玉泽, 等. 桑沟湾标准化与传统养殖模式海带的营养成分比较[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 170-175.
- [6] FANG J H, HE W, MAO Y Z, et al. A comparison of nutrients in kelp cultured in standardized and traditional long-line modes in Sanggou Bay[J]. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 170-175.
- [7] 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.
- [8] GU S Q, TANG W Y, ZHOU H X, 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.
- [9] 王江贺, 傅宝尚, 赵保民, 等. 响应面法优化海带苹果冻干休闲食品加工工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(1): 67-73.
- [10] WANG J H, FU B S, ZHAO B M, et al. Optimization of processing technology of kelp apple crisp based on response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2022, 43(1): 67-73.
- [11] 郭红珍, 胡娜娜, 刘伟悦, 等. 海带绿豆保健馒头制作工艺的优化[J]. 食品工业, 2016, 37(7): 5-8.
- [12] GUO H Z, HU N N, LIU W Y, et al. Preparation process of steamed bun containing kelp and mung bean[J]. The Food Industry, 2016, 37(7): 5-8.
- [13] 王广峰. 海带富锗鲜湿面条的研制[J]. 食品科技, 2008, 33(6): 124-125.
- [14] WANG G F. Research on kelp fresh-wetted noodle through adding germanium[J]. Food Science and Technology, 2008, 33(6): 124-125.
- [15] 王颖, 李晓, 孙元芹, 等. 海带口服液加工工艺研究[J]. 食品科技, 2009, 34(1): 77-80.
- [16] WANG Y, LI X, SUN Y Q, et al. Processing technology of seaweed beverage[J]. Food Science and Technology, 2009, 34(1): 77-80.
- [17] 孟秀梅, 刘昌衡, 袁文鹏, 等. 海带保健饮品的生产工艺研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(5): 283-285.
- [18] MENG X M, LIU C H, YUAN W P, et al. Study on the producing process of healthy kelp beverage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 30(5): 283-285.
- [19] 肖月娟, 贺建军. 海带花生营养调味酱的研制[J]. 食品工业科技, 2002, 23(5): 59-61.
- [20] XIAO Y J, HE J J. Development of kelp and peanut nutritional seasoning sauce[J]. Science and Technology of Food Industry, 2002, 23(5): 59-61.
- [21] LÓPEZ-PÉREZ O, DEL OLMO A, PICON A, et al. Volatile compounds and odour characteristics during long-term storage of kombu seaweed (*Laminaria ochroleuca*) preserved by high pressure processing, freezing and salting[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108710.
- [22] 李悦, 薛敬林, 张健, 等. 超临界  $\text{CO}_2$  萃取对海带粉脂质、岩藻黄素及挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 166-172.
- [23] LI Y, XUE J L, ZHANG J, et al. Effect of supercritical  $\text{CO}_2$  extraction on lipids, fucoxanthin, and volatile flavor compounds in *Sacharina japonica* powder[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 166-172.
- [24] 安庆文, 岳洋, 张全斌. 乳酸菌发酵海带的脱腥工艺及成分分析研究[J]. 海洋科学, 2024, 48(4): 97-107.
- [25] AN Q W, YUE Y, ZHANG Q B. Study on the deodorization process and component analysis of kelp fermented by lactic acid bacteria[J]. Marine Sciences, 2024, 48(4): 97-107.
- [26] 顾赛麒, 胡彬超, 张月婷, 等. 基于电子鼻、气-质联用技术和感官评价方法优化海带发酵脱腥工艺[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(19): 124-129.
- [27] GU S Q, HU B C, ZHANG Y T, et al. Optimization of fermentation deodorization of *Laminaria japonica* based on electronic nose, GC-MS and sensory evaluation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(19): 124-129.
- [28] 王红丽, 梁璋成, 何志刚, 等. 生物发酵脱腥海带的挥发性风味物质分析[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 295-303.

- WANG H L, LIANG Z C, HE Z G, et al. Analysis of volatile flavor compounds from microbial fermented deodorization kelp[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(6): 295-303.
- [16] 段吴勇. 海带腥味成分鉴定、脱除方法及应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016: 4.
- DUAN W Y. The identification, removal method of kelp fishy smell ingredients and application[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016: 4.
- [17] 王中凤, 曾凡坤. 海带饮料脱腥工艺研究[J]. 食品工业, 1993, 14(6): 31.
- WANG Z F, ZENG F K. Study on the deodorization of kelp beverages[J]. The Food Industry, 1993, 14(6): 31.
- [18] GAO R C, JING P, RUAN S Y, et al. Removal of off-flavours from radish (*Raphanus sativus L.*) anthocyanin-rich pigments using chitosan and its mechanism(s)[J]. Food Chemistry, 2014, 146: 423-428.
- [19] YU X H, MU N, LIU X C, et al. A green method for decolorization of polysaccharides from alfalfa by S-8 macroporous resin and their characterization and antioxidant activity[J]. RSC Advances, 2023, 13(14): 9 642-9 653.
- [20] 梁芮涵, 李博. 大孔树脂吸附法对鲱鱼皮胶原肽脱腥脱苦的作用效果[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(19): 217-225.
- LIANG R H, LI B. Effect of macroporous resin adsorption on deodorization and debittering of silver carp skin collagen peptides[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(19): 217-225.
- [21] 盛洁, 胡凌豪, 陈建康, 等. 凤尾鱼酶解产物脱腥脱色工艺优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 190-196, 202.
- SHENG J, HU L H, CHEN J K, et al. Optimization of deodorization and decolorization process of anchovy fish enzymatic hydrolysate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(7): 190-196, 202.
- [22] 陈增鑫, 刘咏霖, 潘芸芸, 等. 不同脱腥方法对海参肠卵酶解液脱腥效果的比较[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(5): 187-194.
- CHEN Z X, LIU Y L, PAN Y Y, et al. Effect of different deodorization methods on enzymatic hydrolysate of sea cucumber (*Stichopus japonicas*) intestines and gonads[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(5): 187-194.
- [23] 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: 14.
- GU Y J. Biological deodorization, polysaccharide extraction and antioxidant application of kelp[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 14.
- [24] WANG L T, HU J X, LV W J, et al. Optimized extraction of astaxanthin from shrimp shells treated by biological enzyme and its separation and purification using macroporous resin[J]. Food Chemistry, 2021, 363: 130369.
- [25] 刘智禹. 干海带中挥发性风味成分的分析与鉴定[J]. 农学学报, 2011, 1(6): 43-47.
- LIU Z Y. Analysis and evaluation of the volatile flavour compounds in dried kelp[J]. Journal of Agriculture, 2011, 1(6): 43-47.
- [26] 刘璐璐, 王宝贝. 藻类挥发性物质及其提取方法研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 220-228.
- LIU L L, WANG B B. Volatile compounds in algae and their extraction methods[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 220-228.
- [27] SUN M J, LI X Y, MCCLEMENTS D J, et al. Reducing off-flavors in plant-based omega-3 oil emulsions using interfacial engineering: coating algae oil droplets with pea protein/flaxseed gum[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107069.