

林思佳, 赵慧琳, 刘婧靛, 等. 植物提取物浸泡预处理对裙带菜品质及脱腥效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 1-10. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050257

LIN Sijia, ZHAO Huilin, LIU Jingliang, et al. Effect of Plant Extract Soaking Pretreatment on the Quality and Deodorization Effect of *Undaria pinnatifida*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 1-10. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050257

· 特邀主编专栏—地方特色食品:加工技术、感官品质、风味特性和营养健康 (客座主编:易俊洁、和劲松、郭超凡) ·

植物提取物浸泡预处理对裙带菜品质及脱腥效果的影响

林思佳^{1,2}, 赵慧琳¹, 刘婧靛¹, 郭焱³, 秦磊^{1,2}, 黄旭辉^{1,2,*}

(1.大连工业大学国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034;

2.大连星海湾实验室, 辽宁大连 116034;

3.大连浩和食品有限公司, 辽宁大连 116035)

摘要:本研究利用迷迭香、丁香、薄荷提取物制备的浸泡液对裙带菜进行预处理, 结合电子感官及气相色谱-质谱联用分析技术, 解析了不同提取物添加量、料液比和浸泡时间对裙带菜品质及脱腥效果的影响规律, 筛选出最佳预处理工艺。结果表明: 最佳脱腥工艺为提取物浓度 4 g/L、料液比 1:4 (g/mL)、浸泡时间 40 min。薄荷、迷迭香提取物有护色作用 ($\Delta E < 2$, 中等色差), 丁香提取物能提升裙带菜的质构特性 ($P < 0.05$)。电子鼻结果显示, 经丁香、迷迭香提取物浸泡后的裙带菜中氮氧化物和无机硫化物含量最高。气相色谱-质谱仪共鉴定出裙带菜中 52 种挥发物, 其中关键风味物质 6 种。迷迭香提取物降低了裙带菜中己醛、1-戊醇、2-庚醇等腥味物质含量, 提升了 3-辛酮、 β -紫罗兰酮、1-辛烯-3-醇、丁香酚、桉树脑、4-烯丙基苯甲醚花果香化合物的含量。本研究为裙带菜深加工过程脱腥及品质保持提供了理论基础。

关键词: 裙带菜, 脱腥, 电子感官, 气相色谱-质谱法 (GC-MS)

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2026)09-0001-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050257

本文网刊:



Effect of Plant Extract Soaking Pretreatment on the Quality and Deodorization Effect of *Undaria pinnatifida*

LIN Sijia^{1,2}, ZHAO Huilin¹, LIU Jingliang¹, GUO Yan³, QIN Lei^{1,2}, HUANG Xuhui^{1,2,*}

(1.National Engineering Research Center of Seafood, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2.Dalian Xinghai Bay Laboratory, Dalian 116034, China;

3.Dalian KOWA Foods Co., Ltd., Dalian 116035, China)

Abstract: In this study, soaking solutions prepared from rosemary, clove, and mint extracts were used for the pretreatment of *Undaria pinnatifida*. Combined with electronic sensory analysis and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) techniques, the effects of different extract addition amounts, solid-liquid ratios, and soaking times on the quality and deodorization effect of *Undaria pinnatifida* were analyzed, and the optimal pretreatment process was screened out. The results showed that the optimal deodorization process was as follows: extract concentration of 4 g/L, solid-liquid ratio of 1:4 (g/mL), and soaking time of 40 min. Mint and rosemary extracts exhibited color-protecting effects ($\Delta E < 2$, moderate color difference), while clove extract could improve the texture properties of *Undaria pinnatifida* ($P < 0.05$). The electronic nose results indicated that the contents of nitrogen oxides and inorganic sulfides in *Undaria pinnatifida* soaked with clove

收稿日期: 2025-05-28

基金项目: 大连星海湾实验室示范性项目 (Dljswgj202401)。

作者简介: 林思佳 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品风味分析, E-mail: 3130967770@qq.com。

* 通信作者: 黄旭辉 (1990-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品风味与品质调控技术, E-mail: xuhuiso@dipu.edu.cn。

and rosemary extracts were the highest. A total of 52 volatile compounds were identified in *Undaria pinnatifida* by GC-MS, among which 6 were key flavor substances. Rosemary extract reduced the contents of fishy substances such as hexanal, 1-pentanol, and 2-heptanol in *Undaria pinnatifida*, and increased the contents of floral and fruity compounds including 3-octanone, β -ionone, 1-octen-3-ol, eugenol, eucalyptol, and 4-allylanisole. This study provides a theoretical basis for deodorization and quality preservation during the deep processing of *Undaria pinnatifida*.

Key words: *Undaria pinnatifida*; deodorization; electronic sensory; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

裙带菜(*Undaria pinnatifida*)属于大型一年生温带褐藻,又名裙带、海芥菜,主要分布在辽宁、山东等地^[1]。新鲜裙带菜的预加工会影响最终品质,如清洗不当导致泥沙残留、浸泡不充分造成盐含量过度、切割不均影响最终口感。裙带菜中含有藻类特有腥味物质(含氮化合物、挥发性醛类)。新鲜度不足、清洗不彻底或加工前未经有效的脱腥处理,生产的裙带菜产品的腥味更明显。裙带菜的腥味主要由一些气味阈值较低的醛类、酮类和醇类物质组成,包括 1-辛烯-3-酮、壬醛、(E)-2-壬烯醛、(E, Z)-2,6-壬二烯醛和 1-辛烯-3-醇等^[2]。因此,预加工处理对裙带菜产品深加工很重要。为了降低裙带菜的腥味,使用以下几种脱腥方式^[3]:化学法利用有机溶剂、酸碱盐或臭氧脱腥,但加工过程中易造成有机试剂残留;发酵法使用酿酒酵母、植物乳杆菌和乳酸菌等生物活性菌对裙带菜发酵,但不适用于鲜食裙带菜制品^[4];物理法相对于其他脱腥手段更安全可靠。近年来,植物的天然成分因其安全性和有效性而备受关注。选择合适的植物提取物改善裙带菜等大型可食用藻类异味,为可食用藻类深加工提供有效帮助。

天然植物包括蔬菜、香料、谷物、茶类等。植物提取液或植物中的活性成分对裙带菜脱腥具有良好的效果。利用含有多酚类、黄酮类等天然抗氧化剂的植物浸出液处理裙带菜,能有效降低脂肪酸的自氧化对裙带菜风味产生的影响^[5]。这些天然植物提取液还可以将腥味物质吸附脱除,如儿茶素类化合物具备独特的性质,能够消除甲基硫醇化合物,与氨基酸发生结合作用,同时还展现出一定的酶钝化和杀菌效果^[6]。Huang 等^[7]研究发现迷迭香提取物可降低水产品腥味。迷迭香的主要脱腥成分是迷迭香酸、桉树醇、樟脑、芳樟醇等^[8-9]。此外,丁香和薄荷中主要活性成分为丁香酚和薄荷醇,通过浸泡对裙带菜腥味脱除也具有一定的效果^[10-11]。

本文通过探究不同植物提取物对裙带菜品质影响,进一步采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术结合电子感官分析不同植物提取物对裙带菜的脱腥效果,以期对裙带菜深加工利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜裙带菜、薄荷叶、迷迭香、丁香 大连长兴市场;氯化钾、D-(-)-酒石酸 分析级,美国 Aladdin 试剂公司;环己酮、C₇~C₃₀正构烷烃 色谱级,美国 Macklin 试剂公司。

MM400 混合研磨机 德国 RETSCH 公司;PEN3 电子鼻 德国 Airsense 公司;TS-5000Z 电子舌 日本 INSENT 公司;Ultra Scan Pro 测色仪 美国 Hunter Lab 公司;TA-XT PLUS 质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司;7890B-5977A 气相色谱-四极杆质谱联用仪 美国安捷伦公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 取新鲜裙带菜梗段,清洗后切成 1 cm 小段,4 ℃ 冷藏。薄荷、迷迭香、丁香于研磨机中粉碎,200 目过筛,常温保存。

1.2.2 单因素实验 以脱腥液浓度、料液比和浸泡时间为考察因素进行单因素实验,以腥味感官评分确定三种植物提取物对裙带菜脱腥的最佳工艺。

1.2.2.1 提取物浓度对裙带菜脱腥效果测定 将过筛后的迷迭香、丁香、薄荷粉末分别按照 0、4、8、12、16、20 g/L 的浓度加水浸泡 30 min,并取上清液备用。将裙带菜梗与提取液以料液比 1:4(g/mL)浸泡 40 min,对不同浓度提取液浸泡的裙带菜梗脱腥效果进行感官评价。

1.2.2.2 料液比对裙带菜脱腥效果测定 将过筛后的迷迭香、丁香、薄荷粉末以 4 g/L 加水浸泡 30 min,取上清液备用。将裙带菜梗与迷迭香、丁香、薄荷提取液按料液比 1:0、1:1、1:2、1:3、1:4、1:5(g/mL)浸泡 40 min,对不同料液比浸泡的裙带菜梗脱腥效果进行感官评价。

1.2.2.3 浸泡时间对裙带菜脱腥效果测定 将过筛后的迷迭香、丁香、薄荷粉末以 4 g/L 加水浸泡 30 min,取上清液备用。将裙带菜梗与迷迭香、丁香、薄荷提取液按料液比 1:4(g/mL)浸泡 0、10、20、30、40、50 min,对不同浸泡时间的裙带菜梗脱腥效果进行感官评价。

1.2.3 三种植物提取物对裙带菜色度、质构影响测定 将过筛后的迷迭香、丁香、薄荷粉末以 4 g/L 加水浸泡 30 min,取上清液备用。将裙带菜梗与迷迭香、丁香、薄荷提取物以料液比 1:4(g/mL)浸泡 40 min 后,4 ℃ 保存。使用 Ultra Scan Pro 测色仪测定裙带菜梗色度。在投射模式下,用白板和黑板对色度仪校准,测定裙带菜梗的亮度值(L*)、红绿值(a*)、黄蓝值(b*)。使用质构仪测定裙带菜梗质地。测试探头:P/5,测前速率、测试速率、测后速度:1 mm/s,TPA 模式,压缩深度:30%,间隔时间:5 s^[12]。

1.2.4 三种植物提取物对裙带菜电子鼻、电子舌影

响测定 将过筛后的迷迭香、丁香、薄荷粉末以 4 g/L 加水浸泡 30 min, 取上清液备用。将裙带菜梗与迷迭香、丁香、薄荷提取物以料液比 1:4(g/mL) 浸泡 40 min 后, 4 ℃ 保存。使用 PEN3 电子鼻测定裙带菜梗的挥发性物质信息。将 2 g 裙带菜梗切碎, 置于 20 mL 棕色样品瓶, 60 ℃ 水浴孵育 30 min。进样流速为 1 L/min, 测试时间为 180 s 和清洁时间 100 s^[13]。使用 TS-5000Z 电子舌测定裙带菜梗的滋味信息。将 2 g 裙带菜梗切碎并加入 20 mL 去离子水, 匀浆 2 min, 8000 r/min、4 ℃ 离心 10 min, 取上清液^[14]。取 40 mL 稀释 20 倍的上清液加入电子舌感官杯中, 采用两步洗脱方式测定裙带菜滋味信息。

1.2.5 顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用技术测定裙带菜中挥发性化合物 将过筛后的迷迭香、丁香、薄荷粉末以 4 g/L 加水浸泡 30 min, 取上清液备用。将裙带菜梗与迷迭香、丁香、薄荷提取物以料液比 1:4(g/mL) 浸泡 40 min 后, 4 ℃ 备用。将 2 g 裙带菜梗段切碎后置于 20 mL 棕色样品瓶中, 加入 20 μL 环己酮(100 μg/mL) 作为内标物。采用顶空固相微萃取结合 7890B-5977A 气相色谱-四级杆质谱仪提取裙带菜中的挥发性风味化合物。程序升温条件: 初始温度 35 ℃, 保持 3 min, 升至 50 ℃, 后以 5 ℃/min 升温到 250 ℃, 不分流进样, 载气流量(He): 1.5 mL/min, 进样量: 1 μL。全谱扫描: 质量扫描在 35~500 amu 之间; 电子轰击离子源: 70 eV 的电子能量; 输送线路的工作温度为 280 ℃, 四极杆工作温度为 150 ℃; 离子源的温度为 230 ℃^[15]。

1.2.6 裙带菜中挥发性化合物的定性、定量分析 通过在 NIST11 质谱库对挥发性物质的质谱结果进行检索, 选择匹配度大于 90% 的结果对未知化合物进行定性。同时使用保留指数(Retention index, RI) 对挥发物进行定性: 在 GC-MS 中注入 C₇~C₃₀ 正构烷烃并通过 Kovats 法计算得到保留指数 RI^[16]:

$$RI_{(x)} = \left(\frac{Rt_{(x)} - Rt_{(n)}}{Rt_{(n+1)} - Rt_{(n)}} + n \right) \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中: Rt_(x)、Rt_(n) 和 Rt_(n+1) 分别为化合物 X、化合物 X 前后的第 n 个和第 n+1 个正构烷烃的保留时间。

挥发物定量根据下式计算^[17]:

$$C_i = \frac{C_s A_i}{A_s} \quad \text{式 (2)}$$

式中: C_i 代表未知化合物的浓度, C_s 代表内标浓度, A_s 代表内标峰面积, A_i 代表未知化合物的峰面积。

相对气味活度值(Relative odor activity values, rOAV)根据下式计算^[18]:

$$rOAV = \frac{C_i}{O_{ti}} \quad \text{式 (3)}$$

式中: C_i 为分析物的质量浓度(μg/g); O_{ti} 为分

析物在水中的嗅觉阈值(mg/kg)。

1.2.7 感官评价 感官评价是裙带菜梗腥味最有效的评判标准。感官评价人员为 15 名对裙带菜梗不过敏的老师及同学。感官小组成员坐在感官评价室的隔间中, 灯光为白炽灯, 温度 25 ℃。裙带菜梗放在感官评定杯中并标注相应的英文随机代码。在每组感官样品旁放置漱口杯和饮用水, 测试前漱口, 参照表 1 的标准, 对样品腥味评分^[19]。

表 1 三种植物提取物浸泡裙带菜腥味评分标准
Table 1 Scoring standards of the fishy smell of wakame soaked in three plant extracts

| 评分(分) | 标准 |
|--------|-------|
| 10~20 | 腥味非常重 |
| 21~40 | 腥味较重 |
| 41~60 | 仍存在腥味 |
| 61~80 | 轻微腥味 |
| 81~100 | 无腥味 |

1.3 数据处理

利用 Microsoft Office Excel(Microsoft, US)对数据进行收集整理, 使用 Origin Lab 2021, (Microsoft, USA) 绘制柱状图和雷达图, 使用 IBM SPSS Statistics 25(SPSS Inc., Chicago, USA) 对数据进行 ANOVA 方差分析和 Duncan 多重比较法分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同植物提取物对裙带菜腥味强度的影响

图 1 为丁香、迷迭香、薄荷三种植物提取物对裙带菜脱腥感官评分结果。裙带菜异味主要来源于褐藻素、硫化物。微生物分解裙带菜中的蛋白质产生醛类物质, 这类化合物主要为酸败、腐臭味^[20]。图 1(A)可知, 三种植物提取物对裙带菜脱腥均有效果。丁香、薄荷提取物浓度在 4 g/L 后增加, 脱腥效果不再发生变化。迷迭香提取物在 4 g/L 后增加, 裙带菜脱腥效果明显增强。黄丕苗^[21]认为, 相比于其他香料提取物(花椒和山奈), 使用迷迭香提取物对鱼肉脱腥最有效, 在迷迭香提取物浓度 0.17%, 料液比 1:3.4(g/mL), 浸泡时间 41 min 的条件下, 鱼肉的腥味值最低。因此, 迷迭香对水产品的脱腥效果相较于其他香料具有更大的优势。图 1(B)为料液比对裙带菜脱腥效果的影响。利用丁香、薄荷提取物对裙带菜浸泡, 随着料液比不断上升, 脱腥效果没有明显变化。裙带菜梗段使用迷迭香提取物浸泡后, 随着料液比从 0 不断上升至 1:4, 裙带菜梗的脱腥效果与迷迭香提取液的料液比成正比。这是因为迷迭香中的酚自由基与裙带菜中挥发性化合物发生特定反应。酚类氧化引起了与挥发性化合物(如硫醇和其他有机含硫化合物)结合的自由基醌的形成, 产生了没有气味或具有香气的酚挥发性复合物, 降低了裙带菜异味^[22]。图 1(C)所示, 浸泡时间增加到 40 min 时, 裙

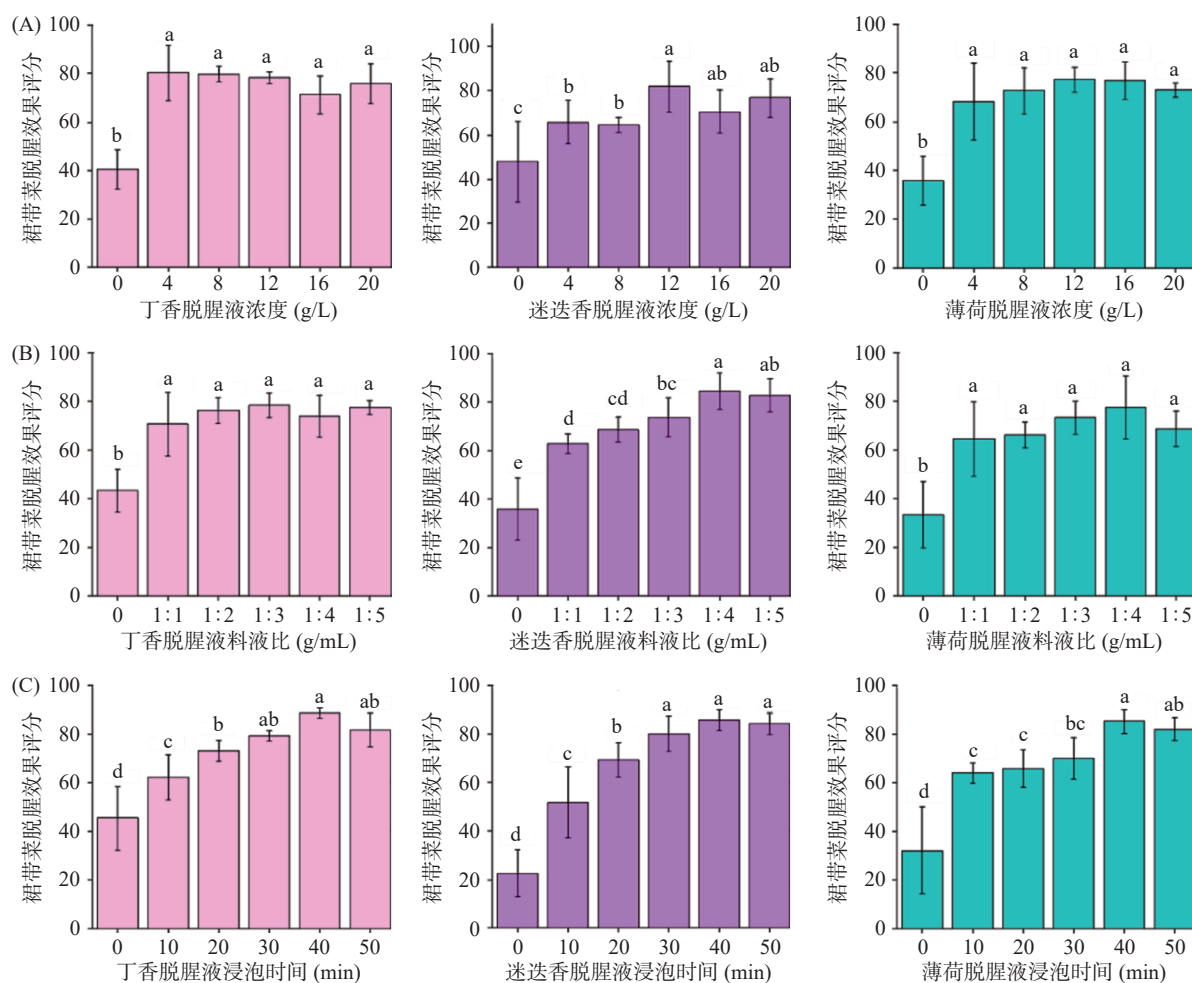


图1 三种植物提取物浓度(A)、料液比(B)、浸泡时间(C)对裙带菜脱腥效果感官评分

Fig.1 Sensory scores of the deodorization effect of kelp influenced by three plant extract concentration (A), solid-liquid ratio (B), and soaking time (C)

注: 图中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 图2~图4同。

带菜的脱腥效果最好。最终选择裙带菜的最优脱腥工艺为: 植物提取物浓度 4 g/L、料液比 1:4(g/mL)、浸泡时间 40 min。在此条件下, 裙带菜具有最佳的脱腥效果。

2.2 不同植物提取物对裙带菜颜色的影响

裙带菜颜色主要由自身色素组成、生长阶段及加工方式共同影响。裙带菜中的色素多为水溶性色素, 如叶绿素、类胡萝卜素等。经植物提取物浸泡后, 内部色素难免随水提液溶解, 造成裙带菜颜色变淡^[23]。图2是三种植物提取物对裙带菜色泽的影响。从图中可以看出, 薄荷提取物浸泡后的裙带菜亮度(L^*)降低, 绿度(a^*)增加, 黄度(b^*)增加, 总色差值为 1.53($1.0 < \Delta E < 2.0$: 中等色差), 颜色变为深绿色。裙带菜的绿度明显增加, 可能与裙带菜在薄荷提取物溶液中浸泡有关。薄荷本身含有较为丰富的叶绿素, 浸泡使裙带菜的颜色更绿^[24]。丁香提取物浸泡后的裙带菜亮度(L^*)增加, 绿度(a^*)降低, 黄度(b^*)增加, 总色差值为 3.91($3.0 < \Delta E < 4.0$: 高等色差)。丁香中使裙带菜颜色改变的主要物质是丁香酚, 它是丁香中主要的活性成分。丁香酚与裙带菜中的叶绿素发生

反应形成脱镁叶绿素, 导致裙带菜的绿色减弱。此外, 裙带菜中的叶绿素被类胡萝卜素取代导致裙带菜中黄色显现, 因此裙带菜出现绿色减弱, 黄色增强^[25]。迷迭香提取物浸泡后的裙带菜亮度(L^*)不变, 绿度(a^*)增加, 黄度(b^*)增加, 总色差值达到 1.12($1.0 < \Delta E < 2.0$: 中等色差), 颜色与新鲜裙带菜颜色相近。迷迭香中具有天然维生素 E, 是一种脂溶性抗氧化剂, 能够保护裙带菜中的色素分子免受氧化损伤, 延缓降解, 对裙带菜具有较好的护色作用^[26]。

2.3 不同植物提取物对裙带菜质地的影响

裙带菜梗主要依靠内部纤维素和细胞间基质支撑。纤维素提供裙带菜梗段的机械强度和刚性; 细胞间基质(如褐藻胶、岩藻聚糖等)增强裙带菜的韧性和弹性^[27]。图3为三种植物提取物对裙带菜质地影响。从图3中可以看出, 经过丁香提取物浸泡后的裙带菜硬度、胶着度及咀嚼度显著增加, 回复性显著下降($P < 0.05$)。丁香中的单宁酸是由多酚介导与蛋白质交联反应的中间产物(奎宁)发生缩合反应后形成的化合物^[28]。丁香酚的酚羟基可与裙带菜多糖分子中的羟基(-OH)、羧基(-COOH)等基团形成氢键,

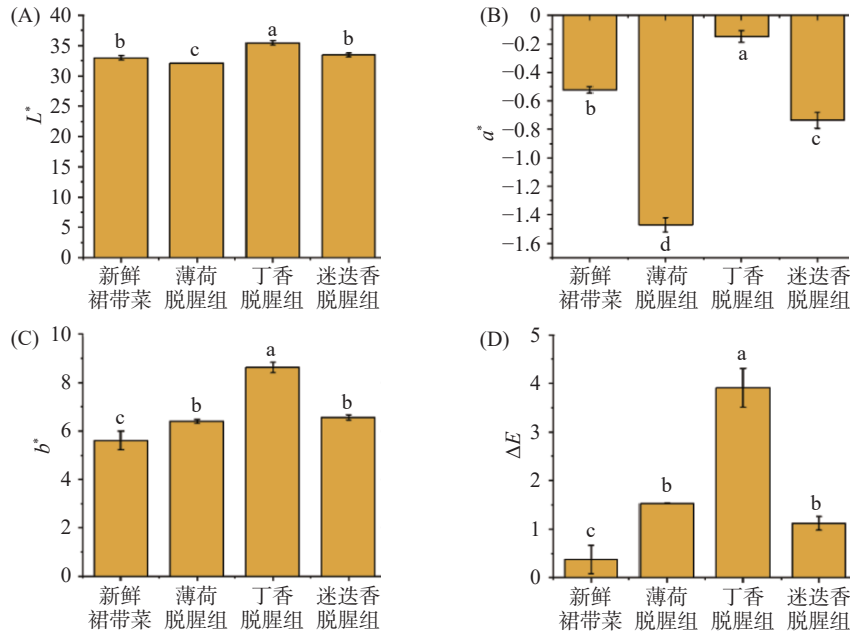


图 2 三种植物提取物对裙带菜亮度值(A)、红绿值(B)、黄蓝值(C)、总色差值(D)影响

Fig.2 Effects of three plant extracts on the lightness value (A), red-green value (B), yellow-blue value (C), and total color difference (D) of kelp

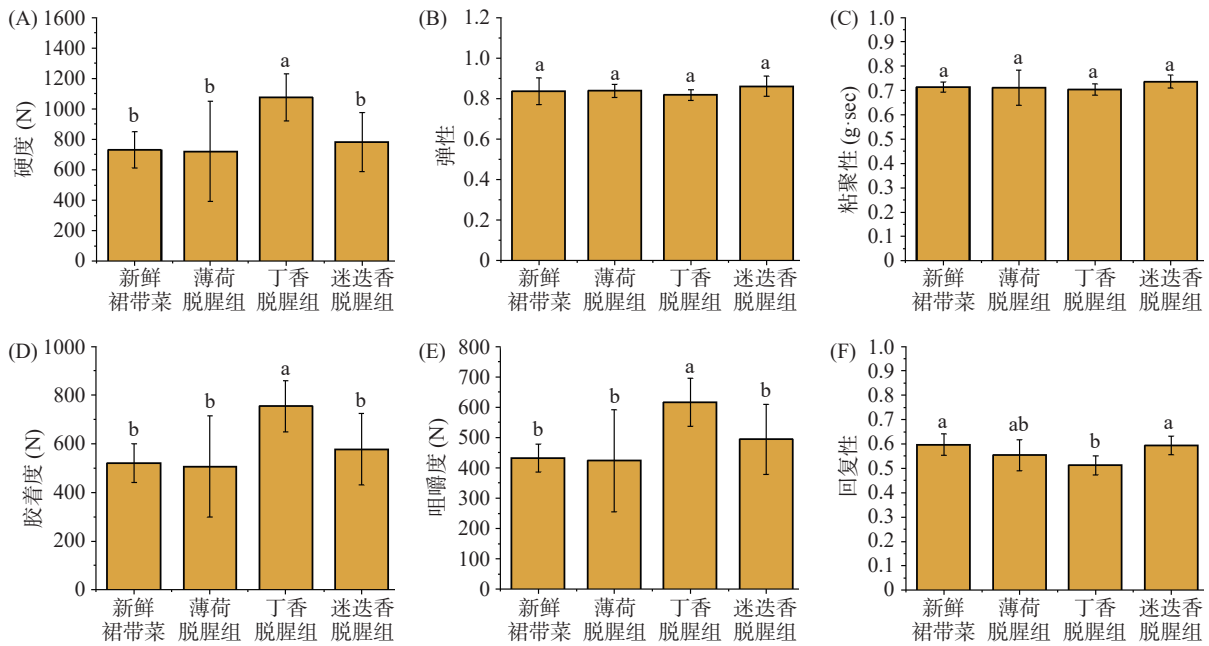


图 3 三种植物提取物对裙带菜硬度(A)、弹性(B)、粘聚性(C)、胶着度(D)、咀嚼度(E)、回复性(F)的影响

Fig.3 Effects of three plant extracts on the hardness (A), springiness (B), cohesiveness (C), gumminess (D), chewiness (E), and resilience (F) of kelp

增强分子之间的连接,提升裙带菜硬度。另外,丁香提取液呈酸性,进一步促使裙带菜中的多糖凝胶化,降低裙带菜的回复性^[29]。丁香提取物能增强许多果蔬的质地特性。例如,付文存等^[30]探究丁香精油抗菌保鲜剂对草莓采后保鲜效果的影响,提出经过丁香精油处理后的草莓硬度明显增强。此外,经迷迭香、薄荷提取物浸泡过的裙带菜,质构特性并没有出现较为显著的变化。可能因为迷迭香、薄荷提取物中缺乏与裙带菜中蛋白质、多糖直接作用的交联基团。

2.4 不同植物提取物对裙带菜风味特性的影响

2.4.1 不同植物提取物对裙带菜的电子感官分析

由图 4(A)可知,不同植物提取物浸泡后的裙带菜的电子鼻传感器响应值存在差异。裙带菜的异味来源于自身硫化物及胺类^[31]。W1W(对无机硫化物灵敏)、W5S(对氮氧化合物灵敏)两种传感器可较好地区分不同植物提取物对裙带菜脱腥效果。林晓娟等^[32]测定不同脱腥方式海带的电子鼻结果显示,W1W 可较好的区分不同脱腥海带的挥发性成分差异。与新鲜裙带菜相比,经过丁香、迷迭香提取物浸

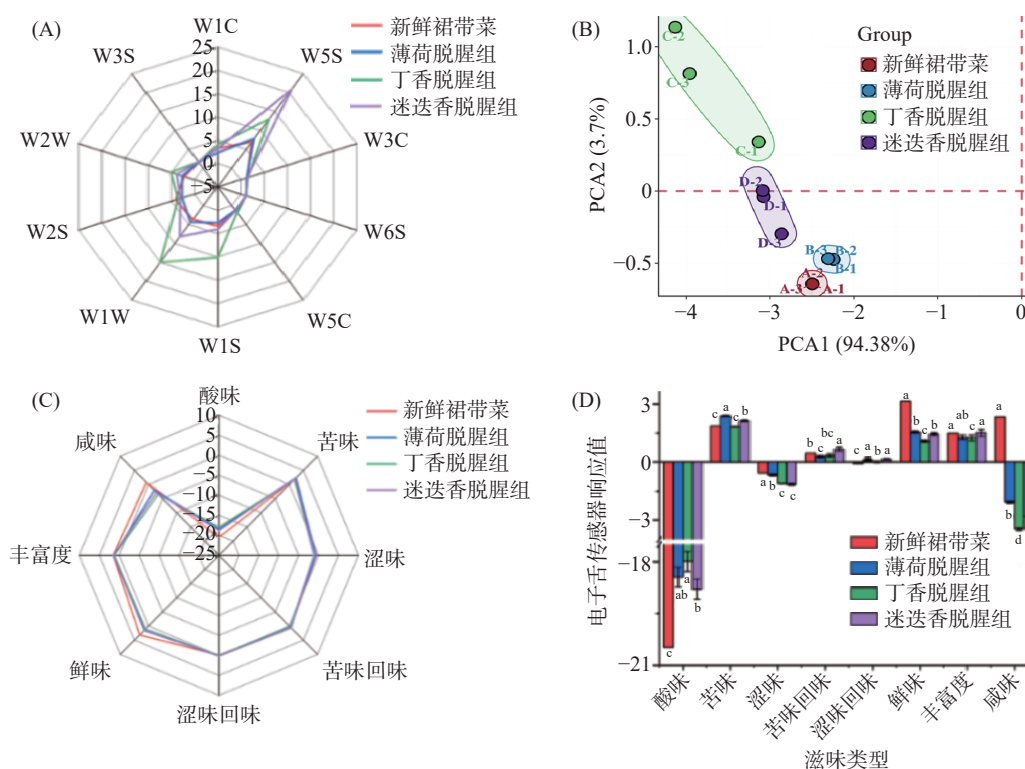


图4 三种植物提取物对裙带菜电子鼻(A)、电子鼻主成分分析(B)、电子舌(C)、电子舌相应值(D)影响
Fig.4 Effects of three plant extracts on the electronic nose (A), electronic nose principal component analysis (B), electronic tongue (C), and electronic tongue response (D) of kelp

泡后裙带菜的 W1W 传感器响应值增加明显。这两种提取物中的多酚类物质能够将裙带菜中的有机硫化物还原成无机硫化物(如硫化氢)。经过迷迭香提取物浸泡后的裙带菜,其 W5S 传感器响应值最高,其次是丁香提取物,最后是薄荷提取物。与丁香、薄荷中的活性成分相比,迷迭香中的迷迭香酸具有较强的抗氧化能力。迷迭香酸可以改变裙带菜中蛋白质构象,并进一步与腥味物质竞争风味结合位点,降低腥味^[33]。黄丕苗^[21]认为迷迭香酸、鼠尾草酸和鼠尾草酚是白鲑鱼肉的主要脱腥物质,其中迷迭香酸的脱腥效果最好。如图 4(B)所示,PC₁的贡献率为 94.38%,PC₂的贡献率为 3.7%,两个主成分的总贡献率为 98.08%,用于鉴别挥发性风味成分的差异。主成分分析图表明,新鲜裙带菜和脱腥后的裙带菜可分为四组,每组裙带菜样品在主成分分析图中相互独立,主要分布于二、三象限,可以较好区分样品之间的差异。经过丁香提取物浸泡后,裙带菜的挥发性风味组分主要集中于第三象限,与新鲜裙带菜、薄荷及迷迭香提取物浸泡后的裙带菜相距较远。说明经丁香提取物浸泡后,与新鲜裙带菜风味差异较大。而薄荷提取物对裙带菜的风味无突出贡献。迷迭香提取物浸泡后的裙带菜与新鲜裙带菜的挥发性成分同在第二象限,说明迷迭香提取物对裙带菜具有较好的脱腥效果。

裙带菜的滋味主要来源于其鲜味成分、海水中的盐分、天然糖类及蛋白质物质,但会在加工工艺、运输环境、贮藏方式等过程中产生一定的损失,造成

裙带菜风味品质下降^[34]。图 4(C)、图 4(D)为三种植物提取物对裙带菜脱腥效果。电子舌的检测结果分为 25 个刻度,高于 25 说明增加味物质的浓度之后,人们尝不出味觉变化,低于 0 说明味物质浓度低于人的尝味阈值范围。如图 4(D)所示,经三种植物提取物浸泡后的裙带菜的苦味、苦味回味、涩味回味、鲜味及丰富度五种电子舌传感器的响应值大于 0,认为这五种滋味对裙带菜的风味存在贡献^[35]。经三种植物提取物浸泡后裙带菜的苦味、苦味回味、涩味回味增加,而鲜味和咸味显著降低($P < 0.05$)。在浸泡过程中盐分会从裙带菜表面溶解在脱腥液中,水分也会通过渗透作用进入裙带菜内部,进一步降低裙带菜的盐含量,导致裙带菜咸味降低。而裙带菜中的盐含量与人体的鲜味感知呈现协同效应,在盐含量下降的情况下,鲜味也会明显减弱,风味也受到一定的影响^[36]。此外,裙带菜中的鲜味物质也会随着浸泡被溶解到脱腥液中,导致裙带菜的鲜味减弱^[37]。薄荷、丁香、迷迭香经水提后,植物中的一些苦味、涩味的化合物会进入到提取液中,如丁香中的单宁酸溶解在水中就会呈现苦味。这些苦涩味的化合物被吸附在裙带菜上,使裙带菜的苦涩味略微增加。

2.4.2 不同植物提取物对裙带菜的关键挥发性风味成分影响 采用 SPME-GC-MS 技术对裙带菜脱腥效果检测,鉴定出 7 大类共 52 种包括 4 种醛类、7 种酮类、12 种醇类、6 种烯烃类、5 种酚类、7 种酯类及 11 种其他类挥发性化合物。图 5 为三种植物提取物对裙带菜脱腥效果影响。由图 5 可知,新鲜

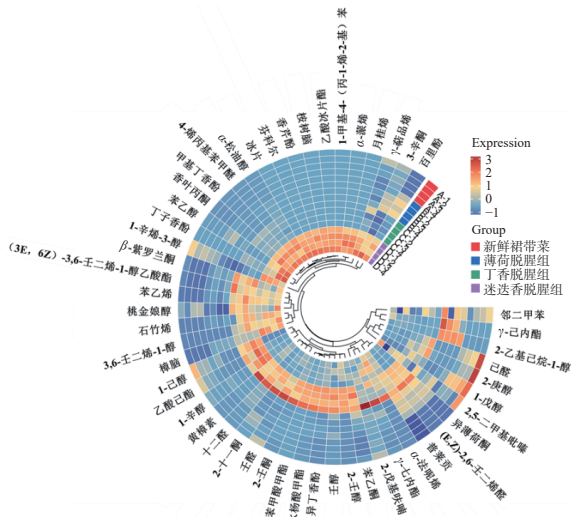


图 5 三种植物提取物对裙带菜的挥发性风味成分影响

Fig.5 Effects of three plant extracts on the volatile flavor components of kelp

裙带菜中己醛、1-辛烯-3-醇、1-戊醇、2-庚醇、邻二甲苯等化合物含量丰富。裙带菜中腥味主要来源于一些低阈值的挥发性化合物,主要包括己醛、1-辛烯-3-醇、2,4-壬二烯醛、2,4-癸二烯醛等,这些挥发性化合物相互作用直接影响其风味品质、营养价值及消费者接受度^[20]。经过迷迭香提取物浸泡后的裙带菜的己醛、1-戊醇、2-庚醇含量降低,这类化合物主要为油脂、腐败等味道。由表 2 可知,迷迭香提取物浸泡后的裙带菜中 rOAV>1 的主要挥发性化合物有六种,包括 3-辛酮、 β -紫罗兰酮、1-辛烯-3-醇、丁子香酚、桉树脑、4-烯丙基苯甲醚,它们主要为裙带菜提供青草香、花果香气,明显降低裙带菜的腥味。其中,丁子香酚和桉树脑在裙带菜中增量较高。新鲜裙带菜中,这两种挥发性风味化合物并没有被检测出。但经迷迭香提取物浸泡后,裙带菜中的丁子香酚(rOAV=156.82)的含量从 0 $\mu\text{g/g}$ 增加到 95.66 \pm

表 2 三种植物提取物浸泡后裙带菜的挥发物信息

Table 2 Information of volatiles in kelp after soaking with three plant extracts

| 序号 | 化合物名称 | 质量浓度($\mu\text{g/g}$) | | | | 相对气味活度值(rOAV) | | | |
|----|----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|-------|-------|--------|
| | | 新鲜裙带菜 | 薄荷提取物 | 丁香提取物 | 迷迭香提取物 | 新鲜裙带菜 | 薄荷提取物 | 丁香提取物 | 迷迭香提取物 |
| 1 | 己醛 | 0.21 \pm 0.07 ^a | 0.01 \pm 0 ^c | 0.11 \pm 0.08 ^{ab} | 0.02 \pm 0.02 ^{bc} | 0.15 | 0.01 | 0.08 | 0.01 |
| 2 | 壬醛 | 0.05 \pm 0.01 ^b | 0.05 \pm 0.01 ^b | 0.25 \pm 0.07 ^a | 0.09 \pm 0.03 ^b | 0.02 | 0.02 | 0.08 | 0.03 |
| 3 | (E,Z)-2,6-壬二烯醛 | 0.02 \pm 0.01 ^d | 2.74 \pm 0.48 ^b | 4.11 \pm 0.18 ^a | 0.89 \pm 0.02 ^c | 0.01 | 1.10 | 1.64 | 0.36 |
| 4 | 十二醛 | — | 0.09 \pm 0.02 ^b | 0.47 \pm 0.05 ^a | 0.01 \pm 0.00 ^c | — | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 5 | 3-辛酮 | 1.79 \pm 0.17 ^c | 2.94 \pm 0.35 ^b | 0.55 \pm 0.27 ^d | 3.87 \pm 0.03 ^a | 1.37 | 2.26 | 0.42 | 2.98 |
| 6 | 苯乙酮 | 0.05 \pm 0 ^c | 0.11 \pm 0.03 ^b | 0.24 \pm 0.04 ^a | 0.1 \pm 0.02 ^b | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7 | 2-壬酮 | 0.15 \pm 0.04 ^c | 0.13 \pm 0.02 ^c | 1 \pm 0.13 ^a | 0.31 \pm 0.04 ^b | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.01 |
| 8 | 异薄荷酮 | — | 6.68 \pm 1.2 ^b | 8.7 \pm 0.46 ^a | 2.06 \pm 0.12 ^c | — | 1.42 | 1.85 | 0.44 |
| 9 | 2-十一酮 | 0.16 \pm 0.05 ^b | 0.07 \pm 0.01 ^b | 0.42 \pm 0.09 ^a | 0.12 \pm 0.02 ^b | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 香叶丙酮 | 0.02 \pm 0.00 ^c | 0.13 \pm 0.02 ^{bc} | 0.43 \pm 0.08 ^b | 2.00 \pm 0.39 ^a | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.03 |
| 11 | β -紫罗兰酮 | 0.26 \pm 0.03 ^c | 0.79 \pm 0.09 ^b | 2.15 \pm 0.42 ^a | 1.17 \pm 0.25 ^b | 2.19 | 6.62 | 17.93 | 9.73 |
| 12 | 1-戊醇 | 0.05 \pm 0.01 ^a | — | 0.03 \pm 0.01 ^b | — | 0.00 | — | 0.00 | — |
| 13 | 1-己醇 | 2.31 \pm 0.93 ^b | 0.23 \pm 0.19 ^c | 8.98 \pm 1.16 ^a | 0.14 \pm 0.04 ^c | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 14 | 2-庚醇 | — | — | 0.01 \pm 0.00 | — | — | — | 0.00 | — |
| 15 | 1-辛烯-3-醇 | 1.85 \pm 0.16 ^b | 0.59 \pm 0.26 ^d | 1.09 \pm 0.16 ^c | 3.43 \pm 0.16 ^a | 0.68 | 0.22 | 0.40 | 1.27 |
| 16 | 2-乙基己烷-1-醇 | 0.06 \pm 0.01 ^c | 0.97 \pm 0.03 ^a | 0.11 \pm 0.02 ^b | 0.15 \pm 0.03 ^b | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 17 | 1-辛醇 | 0.02 \pm 0.00 ^b | 0.01 \pm 0.01 ^b | 0.47 \pm 0.04 ^a | 0.04 \pm 0.00 ^b | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| 18 | 2-壬醇 | — | 0.01 \pm 0.01 ^c | 0.72 \pm 0.02 ^a | 0.22 \pm 0.16 ^b | — | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 19 | 苯乙醇 | 0.02 \pm 0.00 ^b | 0.22 \pm 0.27 ^b | 0.03 \pm 0.02 ^b | 1.28 \pm 0.44 ^a | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.06 |
| 20 | 3,6-壬二烯-1-醇 | — | 0.01 \pm 0.00 ^b | 0.33 \pm 0.09 ^a | 0.31 \pm 0.02 ^a | — | 0.00 | 0.11 | 0.10 |
| 21 | 壬醇 | 0.02 \pm 0.01 ^b | 0.49 \pm 0.84 ^b | 5.57 \pm 0.74 ^a | 0.78 \pm 1.34 ^b | 0.00 | 0.03 | 0.31 | 0.04 |
| 22 | α -松油醇 | — | 1.37 \pm 0.12 ^b | 1.38 \pm 1.18 ^b | 14.67 \pm 2.96 ^a | — | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| 23 | 桃金娘醇 | 0.06 \pm 0.01 ^b | 0.04 \pm 0.01 ^c | 0.09 \pm 0.01 ^a | 0.07 \pm 0.01 ^b | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 24 | 苯乙烯 | 0.32 \pm 0.01 ^b | 0.56 \pm 0.11 ^b | 1.65 \pm 0.25 ^a | 1.35 \pm 0.19 ^a | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| 25 | α -蒎烯 | 0.01 \pm 0.00 ^b | 0.03 \pm 0.01 ^b | 0.01 \pm 0.01 ^b | 15.96 \pm 4.2 ^a | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.16 |
| 26 | 月桂烯 | 0.01 \pm 0.00 ^b | 0.04 \pm 0.03 ^b | 0.01 \pm 0.01 ^b | 2.77 \pm 0.64 ^a | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| 27 | γ -蒎品烯 | 0.11 \pm 0.02 ^b | 0.12 \pm 0.03 ^b | 0.13 \pm 0.04 ^b | 0.37 \pm 0.04 ^a | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 28 | 石竹烯 | — | 3.89 \pm 1.53 ^b | 27.79 \pm 4.56 ^a | 26.3 \pm 8.66 ^a | — | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 29 | α -法呢烯 | — | 0.03 \pm 0.02 ^b | 0.75 \pm 0.22 ^a | 1.17 \pm 0.43 ^a | — | 0.00 | 0.01 | 0.01 |
| 30 | 百里酚 | — | 1.45 \pm 0.22 ^a | 0.35 \pm 0.07 ^b | 1.67 \pm 0.33 ^a | — | 0.03 | 0.01 | 0.03 |
| 31 | 香芹酚 | — | 0.02 \pm 0.01 ^b | 0.03 \pm 0.01 ^b | 4.58 \pm 0.76 ^a | — | 0.00 | 0.00 | 0.03 |
| 32 | 丁子香酚 | — | — | 17.07 \pm 6.14 ^b | 95.66 \pm 65 ^a | — | — | 27.98 | 156.82 |
| 33 | 甲基丁香酚 | — | 0.01 \pm 0.01 ^c | 0.35 \pm 0.05 ^b | 1.74 \pm 0.28 ^a | — | 0.00 | 0.01 | 0.03 |

续表 2

| 序号 | 化合物名称 | 质量浓度($\mu\text{g/g}$) | | | | 相对气味活度值(rOAV) | | | |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|-------|-------|--------|
| | | 新鲜裙带菜 | 薄荷提取物 | 丁香提取物 | 迷迭香提取物 | 新鲜裙带菜 | 薄荷提取物 | 丁香提取物 | 迷迭香提取物 |
| 34 | 异丁香酚 | — | 0.54±0.48 ^c | 11.88±1.04 ^a | 3.37±0.26 ^b | — | 0.01 | 0.12 | 0.03 |
| 35 | 乙酸己酯 | 0.19±0.11 ^b | 0.01±0.01 ^b | 1.26±0.49 ^a | 0.15±0.09 ^b | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 36 | γ -己内酯 | — | 0.09±0.02 ^a | — | 0.01±0.00 ^b | — | 0.00 | — | 0.00 |
| 37 | 苯甲酸甲酯 | — | — | 0.49±0.02 ^a | 0.02±0 ^b | — | — | 0.32 | 0.02 |
| 38 | 邻氨基苯甲酸苄酯 | 0.02±0 ^c | 1.2±0.2 ^b | 0.94±0.03 ^b | 20.28±0.83 ^a | 0.00 | 0.01 | 0.15 | 0.02 |
| 39 | 水杨酸甲酯 | — | 0.37±0.17 ^c | 8.78±0.8 ^a | 1.47±0.19 ^b | — | 0.00 | 0.00 | 0.03 |
| 40 | (3E, 6Z)-3,6-壬二烯-1-醇乙酸酯 | 0.02±0.01 ^c | 0.18±0.05 ^b | 0.55±0.07 ^a | 0.48±0.06 ^a | 0.00 | 0.01 | 0.04 | 0.03 |
| 41 | γ -七内酯 | 0.02±0 ^b | 0.05±0.03 ^{ab} | 0.12±0.07 ^a | 0.13±0.06 ^a | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 42 | 邻二甲苯 | 0.22±0.05 ^a | 0.28±0.15 ^a | 0.24±0.07 ^a | 0.18±0.12 ^a | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 43 | 2,5-二甲基吡嗪 | 0.04±0.01 ^a | 0.04±0.01 ^a | 0.04±0.02 ^a | 0.04±0.03 ^a | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 44 | 2-戊基呋喃 | 0.14±0.02 ^a | 0.16±0.03 ^a | 0.23±0.03 ^a | 0.21±0.10 ^a | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 45 | 桉树脑 | — | — | — | 53.35±0.95 | — | — | — | 17.21 |
| 46 | 1-甲基-4-(丙-1-烯-2-基)苯 | — | 0.02±0.01 ^b | 0.01±0.00 ^b | 1.38±0.15 ^a | — | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 47 | 芬科尔 | — | 0.01±0.00 ^b | 0.02±0.01 ^b | 1.39±0.06 ^a | — | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| 48 | 樟脑 | — | 2.72±0.18 ^b | 4.62±0.15 ^b | 9.83±2.12 ^a | — | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 49 | 冰片 | — | — | — | 51.51±6.09 | — | — | — | 0.99 |
| 50 | 4-烯丙基苯甲醚 | — | 0.03±0.01 ^{bc} | 0.13±0.03 ^b | 1.00±0.13 ^a | — | 0.23 | 1.04 | 7.73 |
| 51 | 普菜贡 | — | 0.25±0.04 ^a | 0.25±0.03 ^a | 0.19±0.02 ^b | — | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 52 | 黄樟素 | — | — | — | 0.01±0.01 | — | — | — | 0.20 |

注: a、b和c代表不同组别之间同一化合物的显著性差异($P<0.05$); “—”未检测到或不存在。

65 $\mu\text{g/g}$, 桉树脑(rOAV=17.21)的含量从 0 $\mu\text{g/g}$ 增加到 53.35±0.95 $\mu\text{g/g}$ 。王源渊等^[38]研究迷迭香提取物对鲑鱼脱腥效果的影响,他提出迷迭香可以降低鱼腥味,增加果香味、酒香味及奶油香气。此外,从表 2 可知,相比迷迭香,经过薄荷和丁香提取物浸泡后的裙带菜, rOAV>1 的挥发性风味化合物的含量变化并不突出。由此可以说明,迷迭香能够在裙带菜脱腥中发挥重要作用。色度和电子鼻结果也显示,迷迭香提取物能够保护裙带菜的颜色,维持裙带菜的风味。因此,迷迭香或可为裙带菜脱腥提供帮助。

3 结论

本实验深入研究了迷迭香、丁香、薄荷三种植物提取物对裙带菜品质及风味影响规律。结果显示,使用 4 g/L 迷迭香提取物,按料液比 1:4(g/mL)对新鲜裙带菜浸泡 40 min 后,裙带菜的颜色影响较小($1.0<\Delta E=1.53<2.0$,中等色差),降低己醛、1-戊醇、2-庚醇(油脂、腐败味)的含量,提升 3-辛酮、 β -紫罗兰酮、1-辛烯-3-醇、丁子香酚、桉树脑及 4-烯丙基苯甲醚(rOAV>1,青草、花果香)的含量,同步提升无机硫化物、氮氧化物含量($P<0.05$)。目前,对裙带菜的研究大多为有益成分(岩藻多糖、褐藻多酚)的开发利用。对新鲜裙带菜原料的品质及风味维持的研究相对较少。本研究在原料阶段对裙带菜采取植物提取物浸泡处理,对维持裙带菜的风味品质具有良好的效果,进一步为裙带菜的深加工提供有效帮助。然而,本研究仅从单一植物提取物的角度脱除裙带菜异味,未来将深入研究不同植物提取物复配工艺进一步提升裙带菜的品质及风味。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 单体锋,李静,逢少军.我国裙带菜育苗和育种技术的回顾和展望[J].中国农业科技导报,2016,18(1):164-170. [SHAN Tifeng, LI Jing, PANG Shaojun. Review and prospect on seedling production and breeding techniques of *Undaria pinnatifida* in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(1): 164-170.]
- [2] 戚伟鹏,梁羽彤,童星,等.地衣芽孢杆菌发酵海带的脱腥效果与机理研究[J].食品与发酵工业,2024,50(23):77-86. [QI Weipeng, LIANG Yutong, TONG Xing, et al. Effect of *Bacillus licheniformis* fermentation on deodorization of kelp (*Laminaria japonica*) and underlying mechanism[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 77-86.]
- [3] 黄卉,陈胜军,赵永强,等.水产品预制菜加工与质量安全控制技术的研究进展[J].南方水产科学,2022,18(6):152-160. [HUANG Hui, CHEN Shengjun, ZHAO Yongqiang, et al. Research advances on processing and quality safety control technology of aquatic pre-made products[J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(6): 152-160.]
- [4] 陈钰红,邓文辉,许晶,等.不同发酵方式对海带中重金属去除效果的影响[J].食品研究与开发,2024,45(19):7-12. [CHEN Yuhong, DENG Wenhui, XU Jing, et al. Effects of different fermentation methods on removing heavy metals from kelp (*Laminaria japonica* Aresch)[J]. Food Research and Development, 2024, 45(19): 7-12.]
- [5] 魏来,王芳,谭嘉慧,等.水产品腥味来源、检测及去除技术研究进展[J].生物技术进展,2024,14(5):745-760. [WEI Lai,

- WANG Fang, TAN Jiahui, et al. Origins, detection and removal technology of off-flavor compounds in aquatic products[J]. *Current Biotechnology*, 2024, 14(5): 745–760.]
- [6] WU Tianle, WANG Meiqian, WANG Peng, et al. Advances in the formation and control methods of undesirable flavors in fish[J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2504.
- [7] HUANG Pimiao, WANG Zhirong, SHI Yue, et al. Deodorizing effects of rosemary extract on silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and determination of its deodorizing components[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(2): 636–650.
- [8] 郭鹏飞, 张爱华, 彭映辉, 等. 基于 SPME-GC/MS 法研究干燥方式对迷迭香叶挥发性成分的影响[J]. *生物质化学工程*, 2023, 57(4): 47–52. [GUO Pengfei, ZHANG Aihua, PENG Yinghui, et al. Effects of drying methods on volatile components of rosemary leaves based on SPME-GC/MS method[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2023, 57(4): 47–52.]
- [9] de OLIVEIRA J R, CAMARGO S E A, de OLIVEIRA L D. *Rosmarinus officinalis* L. (rosemary) as therapeutic and prophylactic agent[J]. *Journal of Biomedical Science*, 2019, 26(1): 5.
- [10] 蒋梦宇, 费泓浩, 于欣蕊, 等. 薄荷活性成分及其提取技术的研究进展[J]. *化工技术与开发*, 2022, 51(S1): 57–59. [JIANG Mengyu, FEI Honghao, YU Xinrui, et al. Research progress on active ingredient of *Mentha haplocalyx* Briq and its extraction technology[J]. *Technology & Development of Chemical Industry*, 2022, 51(S1): 57–59.]
- [11] de PAULA P M M S, PINHEIRO R O, DO NASCIMENTO R A, et al. Effects of harvest time and hydrodistillation time on yield, composition, and antioxidant activity of mint essential oil[J]. *Molecules*, 2023, 28(22): 7583.
- [12] YANG Zhixuan, DUAN Xinke, YANG Jinyan, et al. Effects of high hydrostatic pressure and thermal treatment on texture properties of pickled kohlrabi[J]. *LWT*, 2022, 157: 113078.
- [13] ZHONG Zhihong, WANG Zhiyun, ZHANG Yi, et al. Correlation study between quality and sensory characteristics of kelp paste by *Aspergillus oryzae* and *Aspergillus niger* during fermentation[J]. *Foods*, 2023, 12(9): 1815.
- [14] 祝闻晔. 海带腥味物质分析与生物法脱腥研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [ZHU Wenyang. Analysis of kelp fishy-odor compounds and research on deodorization by biological method[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
- [15] WEI Rong, JIANG Bo, CHEN Jingjing, et al. Removal of fishy flavor in kelp (*Laminaria japonica*) by natural antioxidant soaking combined with microbial fermentation[J]. *Food Bioscience*, 2024, 60: 104212.
- [16] 耿宇凤. 半连续加热过程中大豆油挥发性化合物形成机制[D]. 大连: 大连工业大学, 2018. [GENG Yufeng. Mechanism of volatile compound formation from soybean oils in a semi-continuous heating process[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2018.]
- [17] 李沅达. 基于 HS-SPME-GC-MS 技术紫娟茶特征香气组分研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023. [LI Yuanda. Study on the characteristic aroma components of zijuan tea based on HS-SPME-GC-MS technique[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.]
- [18] 梁奕. 海洋绿藻浒苔的风味物质及生物活性研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023. [LIANG Yi. Study on flavor compounds and biological activities of marine green algae (*Ulva* spp.) [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2023.]
- [19] 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. [AN Qingwen, YUE Yang, ZHANG Quanbin. Study on the deodorization process and component analysis of kelp fermented by lactic acid bacteria[J]. *Marine Sciences*, 2024, 48(4): 97–107.]
- [20] GUO Qingyuan, CHEN Xiao, YANG Kai, et al. Identification and evaluation of fishy odorants produced by four algae separated from drinking water source during low temperature period: Insight into odor characteristics and odor contribution of fishy odor-producing algae[J]. *Chemosphere*, 2023, 324: 138328.
- [21] 黄丕苗. 香辛料提取物对白鲢肉脱腥效果及其脱腥机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022. [HUANG Pimiao. Research on deodorizing effect and deodorizing mechanism of spice extracts on silver carp[D]. Chongqing: Southwest University, 2022.]
- [22] CASTADA H Z, MIRONDO R, SIGURDSON G T, et al. Deodorization of garlic odor by spearmint, peppermint, and chocolate mint leaves and rosmarinic acid[J]. *LWT*, 2017, 84: 160–167.
- [23] 陈婷茹, 王茵, 王晓玲, 等. 海带变色机理和护绿技术研究综述[J]. *渔业研究*, 2022, 44(2): 196–204. [CHEN Tingru, WANG Yin, WANG Xiaoling, et al. An overview of discoloration mechanism and green protection technologies of *Laminaria japonica*[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2022, 44(2): 196–204.]
- [24] 张建安, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 三种药食同源物质复配对海鲈鱼风味的影响[J/OL]. *食品工业科技*, 1–19(2025-08-12) [2025-09-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040215>. [ZHANG Jianlan, ZHAO Tiantian, JIAO Wenjuan, et al. Effect of three medicinal-food substances on the flavor of sea bass[J/OL]. *Science and technology of food industry*, 1–19(2025-08-12) [2025-09-13]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040215>.]
- [25] KANG Y R, PARK J, JUNG S K, et al. Synthesis, characterization, and functional properties of chlorophylls, pheophytins, and Zn-pheophytins[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 943–950.
- [26] 成婕, 潘晓宁, 陶健, 等. 迷迭香叶子、枝茎及其产品茶中维生素成分分析[J]. *食品安全导刊*, 2024(14): 57–61. [CHENG Jie, PAN Xiaoning, TAO Jian, et al. Analysis of vitamin components in leaves, stems and tea products of *Rosmarinus officinalis* L.[J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(14): 57–61.]
- [27] 杨贺棋, 何沁峰, 董秀瑜, 等. 可食性褐藻纤维素的分离纯化与结构分析[J]. *食品科学技术学报*, 2021, 39(1): 117–125. [YANG Heqi, HE Qinfeng, DONG Xiuyu, et al. Isolation, purification and structural analysis of cellulose from edible brown seaweeds[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 39(1): 117–125.]
- [28] ZHANG W L, ROY S, EZATI P, et al. Tannic acid: A green crosslinker for biopolymer-based food packaging films[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 136: 11–23.
- [29] 贺俊, 王梦蝶, 陈小强, 等. 食源性多糖和多酚的相互作用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(3): 403–414. [HE Jun, WANG Mengdie, CHEN Xiaoqiang, et al. Advances in research on the interaction of food-derived polysaccharide and polyphenol[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(3): 403–414.]
- [30] 付文存, 赵佳伟, 张林静, 等. 丁香精油抗菌保鲜剂的制备及对草莓采后保鲜研究[J]. *包装工程*, 2024, 45(7): 63–73. [FU Wencun, ZHAO Jiawei, ZHANG Linjing, et al. Preparation of antimicrobial clove essential oil preservative and post-harvest freshness preservation of strawberries[J]. *Packaging Engineering*, 2024,

45(7): 63-73.]

[31] 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. [DUAN Wuyong. The identification, removal method of kelp fishy smell ingredients and application[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.]

[32] 林晓娟, 陈勇, 黄宝特, 等. 不同脱腥处理对海带关键腥味组分及风味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 231-240. [LIN Xiaojuan, CHEN Yong, HUANG Baote, et al. Effects of different defishiness treatments on key fishy flavor components and flavor quality of kelp[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 231-240.]

[33] 张钦华, 洪婉馨, 胡知文, 等. 藻类腥味智能检测与脱腥策略的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(20): 182-194. [ZHANG Qinhu, HONG Wanxin, HU Zhiwen, et al. Research progress on intelligent detection and deodorization strategies for algal off-flavors[J]. Food Research and Development, 2025, 46(20): 182-194.]

[34] 倪辉, 王晓林, 姜泽东, 等. 海带生长初期与成体期食品原料学特性[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 34-40. [NI Hui, WANG Xiaolin, JIANG Zedong, et al. Nutritional, taste and texture characteris-

tics of juvenile and adult kelp[J]. Food Science, 2022, 43(23): 34-40.]

[35] HUANG Xuhui, ZHANG Yuying, ZHU Ming, et al. The effects of different extraction methods on the aroma fingerprint, recombination and visualization of clam soup[J]. Food & Function, 2021, 12(4): 1626-1638.

[36] SUN Xiaoxia, ZHONG Kui, ZHANG Di, et al. The enhancement of the perception of saltiness by umami sensation elicited by flavor enhancers in salt solutions[J]. Food Research International, 2022, 157: 111287.

[37] LI J Y, ZHONG F, SPENCE C, et al. Synergistic effect of combining umami substances enhances perceived saltiness[J]. Food Research International, 2024, 189: 114516.

[38] 王源渊, 张正雨, 祁立波, 等. 基于GC-IMS结合多元统计分析方法分析迷迭香提取物对鲑鱼脱腥效果的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(7): 187-197. [WANG Yuanyuan, ZHANG Zhengyu, QI Libo, et al. Effect of rosemary extract on deodorization of mackerel based on GC-IMS combined with multivariate statistical analysis method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(7): 187-197.]