

超临界 CO₂ 萃取对海带粉脂质、岩藻黄素及挥发性风味物质的影响

李 悦^{1,2,3} 薛敬林^{2,3} 张 健^{2,3} 徐英江^{2,3} 王共明^{2,3}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 山东省海洋资源与环境研究院, 山东 烟台 264006;

3. 烟台市海珍品质量安全控制与精深加工重点实验室, 山东 烟台 264006)

摘要: [目的] 考察超临界 CO₂ 萃取工艺对海带粉脱出脂溶性化合物的影响。[方法] 以脱脂率为指标优化超临界 CO₂ 萃取分离海带粉工艺条件, 采用顶空—气相色谱—离子迁移谱、气相色谱和高效液相色谱分别检测萃取前后挥发性风味物质、脂肪酸组成和岩藻黄素的变化。[结果] 超临界 CO₂ 萃取海带粉的最佳工艺条件为: 萃取温度 50 ℃、萃取压力 45 MPa、萃取时间 3 h, 该条件下海带粉脱脂率为 36.23%; 萃取前后海带粉中共检测定性到 70 种挥发性风味物质, 其中萃取后海带粉中呈腥味或刺激性气味物质的相对含量比原料中的明显降低, 整体风味得到很大改善; 脂肪酸组成检测结果发现, 萃取物中单不饱和脂肪酸占比明显较高, 达到 (28.87±0.23)%, 而花生四烯酸 (ARA)、二十碳五烯酸 (EPA) 等多不饱和脂肪酸在萃取后的海带粉中占比更高, 达到 (37.72±2.36)%; 海带粉、萃取后海带粉和萃取物中岩藻黄素质量分数分别为 0.050, 0.039, 4.766 mg/g。[结论] 超临界 CO₂ 萃取能够有效去除海带粉中具有腥味等刺激性气味的挥发性风味物质, 同时分离出海带粉中脂类物质和岩藻黄素。

关键词: 海带粉; 超临界 CO₂ 萃取; 挥发性风味; 脂肪酸; 岩藻黄素

Effect of supercritical CO₂ extraction on lipids, fucoxanthin, and volatile flavor compounds in *Sacharina japonica* powder

LI Yue^{1,2,3} XUE Jinglin^{2,3} ZHANG Jian^{2,3} XU Yingjiang^{2,3} WANG Gongming^{2,3}

(1. College of Food Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shandong Institute of Marine Resources and Environment, Yantai, Shandong 264006, China; 3. Yantai Key Laboratory of Quality and Safety Control and Deep Processing of Seafood, Yantai, Shandong 264006, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of supercritical CO₂ extraction on the removal of fat-soluble compounds from *Sacharina japonica* powder. [Methods] The process conditions for supercritical CO₂ extraction of *S. japonica* powder were optimized based on the defatting rate. Changes in volatile flavor compounds, fatty acid composition, and fucoxanthin content before and after the extraction process were analyzed using headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry, gas chromatography, and high-performance liquid chromatography. [Results] The optimal conditions for supercritical CO₂ extraction were: extraction temperature of 50 ℃, extraction pressure of 45 MPa, and extraction time of 3 h, under which a defatting rate of 36.23% was achieved. A total of 70 volatile flavor compounds were identified qualitatively in *S. japonica* powder before and after extraction. Notably, the relative content of fishy or pungent odorants in the extracted powder was significantly reduced compared to the raw material, leading to a substantial improvement in overall flavor. Fatty acid composition analysis showed that the content of monounsaturated fatty acids was notably higher in the extracts, reaching (28.87±0.23)%, while the proportion of polyunsaturated fatty acids such as arachidonic acid (ARA) and eicosapentaenoic acid (EPA) increased to (37.72±2.36)% in the extracted powder. The fucoxanthin content in the raw *S. japonica* powder, extracted powder, and extracts were 0.050, 0.039, and 4.766 mg/g, respectively. [Conclusion] Supercritical CO₂ extraction can effectively remove volatile flavor

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系藻类产业技术体系建设项目 (编号: SDAIT-26-05); 山东省自然科学基金重点项目 (编号: ZR2020KC034)

通信作者: 王共明 (1988—), 男, 山东省海洋资源与环境研究院高级工程师, 硕士。E-mail: wgmsd105@163.com

收稿日期: 2024-07-12 **改回日期:** 2024-12-29

compounds with fishy or pungent odors from *S. japonica* powder, while efficiently extracting and separating lipids and fucoxanthin.

Keywords: *Sacharina japonica* powder; supercritical CO₂ extraction; volatile flavor; fatty acids; fucoxanthin

海带(*Sacharina japonica*)是一种多年生海藻植物,是中国养殖规模和产量最大的海洋经济藻类之一。它富含多种营养物质和生物活性物质,如褐藻酸、岩藻黄素、海带多酚、活性碘、脂肪酸等^[1]。然而,强烈的腥味限制了海带的消费适用性和产品深加工。研究^{[2][3]3-4}表明,海带腥味的成分主要包括醛类、醇类、羧酸类、烯酮类、有机溴代物或碘代物等。目前,可用于去除海带腥味的方法有物理法、化学法以及微生物发酵法三大类^[4]。但均存在一定的缺陷,比如物理法主要通过包埋、掩盖等方法减轻海带的腥味,但并不能从根本上解决问题^[5]。化学法可能存在试剂残留问题^[6]。微生物法需严格控制条件,否则容易受到杂菌感染^{[3]4-5}。超临界CO₂萃取技术是一种以超临界CO₂作为溶剂,通过调节温度和压力来萃取天然产物中的活性成分^[7]。超临界CO₂萃取具有高效性、温度低、萃取过程洁净、安全性高、成本低和工艺简单等特点,被用于提取脂质、维生素和色素等化合物^[8-9]。同时,超临界CO₂萃取技术还是一种绿色高效的脱脂、脱腥技术。然而,目前关于超临界CO₂萃取技术在海带加工领域中的应用研究非常少,特别是在分离海带粉中的脂质、岩藻黄素以及挥发性风味物质方面的深入研究仍然缺乏。

研究拟先以更易于量化和准确测定的脱脂率为指标考察超临界CO₂萃取工艺技术参数,再利用顶空—气相色谱—离子迁移谱(headspace gas chromatography ion migration spectroscopy, HS-GC-IMS)、气相色谱(gas chromatography, GC)和高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)对萃取前后产物的挥发性风味物质、脂肪酸组成及岩藻黄素进一步深入检测分析,综合考察超临界CO₂萃取技术对海带粉脱脂、脱腥及岩藻黄素分离的影响,旨在为高品质海带粉和功能物质的高效绿色制备提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

海带:产地山东威海荣成;

甲醇、乙腈、正己烷:色谱纯,美国 Thermo 公司;

石油醚、盐酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

37种标准脂肪酸甲酯:分析纯,美国 Supelco 公司;

岩藻黄素标准品:美国 Sigma 公司。

1.1.2 主要仪器

超临界CO₂萃取装置:HA220-50-06-C型,海安县石

油科研仪器有限公司;

气相离子迁移谱(GC-IMS)联用仪:FlavourSpec[®]型,德国 GAS 公司;

气相色谱仪:GC2010型,日本岛津公司;

气相毛细管柱:SP-2560型,美国 Supelco 公司;

高效液相色谱:SIL-20A型,日本岛津公司;

电子天平:PL202型,瑞士梅特勒托利多公司;

恒温水浴锅:B-491型,瑞士步琦有限公司;

电热鼓风干燥箱:FXB101-1型,上海树立仪器仪表有限公司;

真空冷冻干燥机:Alpha1-4LDPlus型,德国 Christ 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 超临界CO₂萃取海带粉工艺流程 参考黄秋伟^{[10]11-12}的方法并结合预试验结果,设定超临界CO₂萃取海带粉基础工艺参数。取整根海带进行低温(55℃)干燥后,粉碎过60目筛,避光干燥保存,备用。取100g海带粉置于萃取釜(1L),设定进气阀调节流量15L/h,出口阀温度55℃,调节系统压力和萃取温度达到所需数值后开始计时,萃取一定时间后,从出口阀分离釜收集萃取物,解压后从萃取釜中收集萃取后海带粉。

1.2.2 脱脂率计算 萃取结束后,采用索氏抽提法测定脂质质量^[11],按式(1)计算脱脂率。

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

R ——脱脂率,%;

m_1 ——海带粉脂质的质量,g;

m_2 ——萃取后海带粉脂质的质量,g。

1.2.3 单因素试验 分别以萃取温度、萃取压力、萃取时间为变量,以脱脂率为评价指标,进行单因素试验,确定各影响因素的适宜条件。

(1) 萃取温度:固定萃取压力40MPa,萃取时间2h,考察萃取温度(30,40,50,60,70℃)对海带粉脱脂率的影响。

(2) 萃取压力:固定萃取温度50℃,萃取时间2h,考察萃取压力(30,35,40,45,50MPa)对海带粉脱脂率的影响。

(3) 萃取时间:固定萃取压力45MPa,萃取温度50℃,考察萃取时间(0.5,1.0,2.0,3.0,4.0h)对海带粉脱脂率的影响。

1.2.4 挥发性风味物质检测分析 参照 Zhai 等^[12]的方法。

(1) 样品前处理:精确称取 2.0 g 海带粉原料及萃取后海带粉,分别置于 20 mL 顶空瓶中,加盖密封后待分析检测。

(2) 自动进样条件:将密封的 20 mL 顶空瓶置于转速 500 r/min 的振荡器中,60 °C 孵化 15 min,采用自动进样系统进行检测,其中顶空进样针设定温度为 85 °C,单次进样量为 500 μ L。

(3) GC 和 IMS 条件:气相色谱柱为 WAX-5 色谱柱(L:15 m,ID:0.53 mm,膜厚 1 μ m),柱温 60 °C,运行时间 30 min,载气为高纯 N₂。设置离子迁移谱漂移管温度 45 °C,漂移气为高纯 N₂,流量保持 150 mL/min。

(4) 定性和作图:通过对比 NIST 数据库和 IMS 数据库对样品中挥发性风味物质进行定性分析,采用 Reporter 和 Gallery Plot 构建有机物的差异谱图和指纹图谱。按照峰面积归一化法计算挥发性风味物质的相对百分含量。

1.2.5 脂肪酸成分测定 按照最优工艺条件进行样品制备,分别对海带粉原料、萃取后海带粉和萃取物进行脂肪酸组成分析,参照马长兴等^[13]的方法。

(1) 样品前处理:取 0.1 g 样品于 15 mL 带螺帽的玻璃试管内,加入正己烷 1 mL,甲醇盐酸 2 mL,混匀后置于 70 °C 水浴 2 h,冷却至室温后加入 5 mL 6% K₂CO₃ 和 2 mL 正己烷,混匀离心,取上清液(甲酯化的脂肪酸)用 0.22 μ m 过滤膜过滤,采用气相色谱仪进行测定。

(2) GC 条件:色谱分析采用 SP-2560 气相毛细管柱(规格 100 m $\times$ 0.25 mm,膜厚 0.2 μ m),进样器温度设定为 250 °C,试验载气选用高纯 N₂,柱内流量精确控制为 1.8 mL/min,分流比设定为 90:1,单次进样体积为 1 μ L。检测器温度同样设为 250 °C。程序升温流程:起始温度 140 °C,保持 5 min,随后以 4 °C/min 的速率升温至 240 °C,并在该温度下保持 40 min。采用面积归一化法精确计算脂肪酸的相对含量。

1.2.6 岩藻黄素含量测定 参照花汝凤等^[14]的方法。

(1) 色谱条件:色谱柱为 C₁₈ 色谱柱(4.6 mm $\times$ 150 mm,5 μ m);柱温 25 °C;流量 0.8 mL/min;流动相为乙腈—纯水($V_{\text{乙腈}}:V_{\text{纯水}}=8:2$);检测器波长 450 nm;进样体积 10 μ L。

(2) 标准溶液配制:将岩藻黄素标准储备溶液用乙腈逐级稀释,配制成质量浓度为 0,10,20,50,100 μ g/mL 的岩藻黄素标准溶液。分别取上述溶液经滤膜过滤至液相瓶中待测。

(3) 样品溶液配制:准确称取原料、萃取物及萃取后

海带粉各 0.04 g,加少量无水乙醇,超声至完全溶解。将萃取物用无水乙醇定容至 10 mL 棕色容量瓶,原料和萃取后海带粉定容至 50 mL 棕色容量瓶,超声脱气后,经 0.22 μ m 滤膜过滤至液相进样瓶。

(4) 样品中的岩藻黄素含量按式(2)进行计算。

$$X=(C\times V\times 10^{-6}/m)\times f\times 100, \quad (2)$$

式中:

X ——样品中岩藻黄素含量,g/100 g;

C ——样品制备液中岩藻黄素质量浓度, μ g/mL;

V ——样品制备液最终定容体积,mL;

m ——样品的质量,g;

f ——样品的稀释倍数。

1.3 数据处理

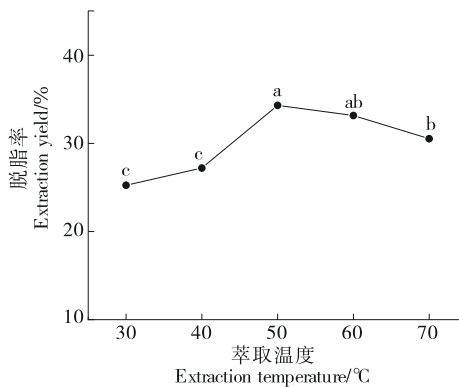
采用 SPSS Statistics 26.0 软件对数据进行 ANOVA 差异显著性分析,所有试验均重复 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示, $P<0.05$ 表示具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 萃取温度对萃取率的影响 由图 1 可知,脱脂率随着温度的升高而逐渐增加,但当温度超过 50 °C 后,脱脂率开始下降。这是因为温度升高会增强蒸汽压,进而加剧分子间的热运动强度,从而显著提高海带粉中脂质成分在超临界 CO₂ 流体中的溶解度。然而,当温度持续上升到某一阈值时,CO₂ 流体的密度会急剧降低,不利于海带粉中脂质的溶解,导致其溶解度下降^[15]。此外,过高的温度还会导致油脂氧化,并使一些挥发性成分散失,进一步降低脱脂率^[16]。因此,选择 50 °C 作为最佳萃取温度值。

2.1.2 萃取压力对萃取率的影响 由图 2 可知,在萃取压力为 30~45 MPa 时,脱脂率随着萃取压力的增加而逐渐

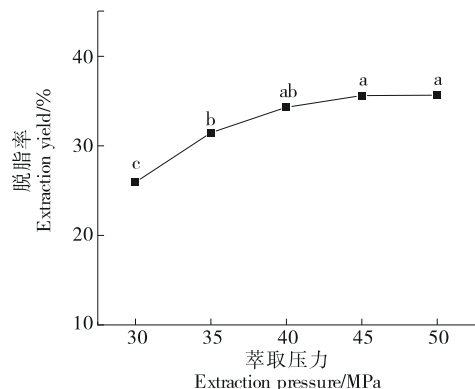


小写字母不同表示各组之间具有显著性差异($P<0.05$)

图 1 萃取温度对海带粉脱脂率的影响

Figure 1 Effect of extraction temperature on the defatting rate of *Sacharina japonica* powder

升高。然而,当萃取压力超过 45 MPa 后,脱脂率的提升趋于平缓。这可能是由于在低压区段,超临界流体的高度可压缩性导致 CO₂ 分子之间的吸引作用增强,密度增大,从而提升了对溶质的溶解能力。而在高压区段,超临界流体的可压缩性减小,密度增加幅度有限,导致溶解能力的提升速率减弱或达到平衡状态^{[10]15-16}。结合成本效益,选择 45 MPa 作为最优萃取压力值是合理的。



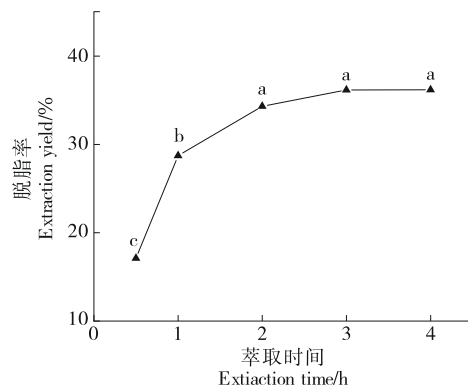
小写字母不同表示各组之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)

图2 萃取压力对海带粉脱脂率的影响

Figure 2 Effect of extraction pressure on the defatting rate of *Sacharina japonica* powder

2.1.3 萃取时间对萃取率的影响 由图3可知,萃取时间对脱脂率的影响也随着时间的增加而逐渐提升。当萃取时间为0.5~3.0 h时,脱脂率随着时间的增加迅速上升,在3 h时达到最高。这是因为在萃取初期,超临界流体尚未完全渗入海带粉内部,脂质与超临界流体的接触和渗透不充分,导致萃取率较低^[17]。当萃取时间超过3 h后,大部分脂质已被提取出来,进一步延长至4 h,萃取率相较于3 h并未显著提高。继续增加萃取时间会导致能耗增大。因此,选择3 h作为最优萃取时间。综上,海带粉超临界CO₂脱脂的最佳工艺条件为:萃取温度 50 °C、萃取压力 45 MPa,萃取时间 3 h,在此条件下进行3次重复试验,计算得出脱脂率为36.23%。

目前利用超临界CO₂萃取技术分离海带油脂的研究还鲜有报道,但在其他高脂水产品中用于脂质相关产品的萃取和制备成为一个热门方法。Franklin等^[18]考察了提取时间、操作压力、操作温度等参数对超临界CO₂萃取黄尾鱼内脏油的影响,得出鱼油的提取率可达40.87%,且与索氏提取油相比,具有更低的游离脂肪酸和过氧化物。Ali-Nehari等^[15]不用夹带剂,直接利用超临界CO₂萃取南极磷虾油,最高提取率达到11.5%,南极磷虾中的中性脂大部分可以被提取出来,利用此方法提取南极磷虾可得



小写字母不同表示各组之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)

图3 萃取时间对海带粉脱脂率的影响

Figure 3 Effect of extraction time on the defatting rate of *Sacharina japonica* powder

到质量更高、热稳定性更好的功能蛋白质。

2.2 挥发性风味物质检测分析

2.2.1 HS-GC-IMS 谱图对比分析 图4展示了海带粉超临界萃取前后的HS-GC-IMS挥发性风味物质成分对比谱图,直观反映了不同样品中各物质浓度的差异。结果显示,超临界萃取显著改变了海带粉中挥发性有机物的组成,可清晰观察到处理前后的变化。

2.2.2 挥发性风味物质定性分析 两组样品中共检测出85种挥发性成分,定性后得到70种挥发性风味物质。由图5可以直观看出,萃取前后的挥发性风味物质组成存在较大差异,如1-戊烯-3-醇、二甲硫醚、2-己酮、(E)-2-丁烯醛、2-甲基丁醛、丁醛和乙酸甲酯等在超临界萃取后相对含量明显降低,乙酸丁酯、乙醇和乙酸糠酯等物质在超临界萃取后相对含量有所增加。醛类是水产品中重要的风味成分,也是海带主要挥发性化合物,由于醛类气味阈值相对较低,使其对风味贡献较大^[16],且低相对分子质量的醛类具有不同程度的腥味或刺激性气味,经过超临界萃取后,(E)-2-丁烯醛、(E)-2-戊烯醛、2-甲基丁醛和3-甲基丁醛等含量明显减少,另外呈现海鲜腥味的1-戊烯-3-醇和二甲硫醚等物质也明显减少,使海带粉风味得到较大改善。综上,超临界CO₂萃取可以去除海带粉中具有腥味和刺激性气味的化合物,同时具有果香气味的酯类物质相对含量有所增加,表明超临界萃取工艺能够有效去除海带粉中的腥味。

2.3 脂肪酸成分测定

表1为海带粉、萃取后海带粉以及萃取物中脂肪酸组成分析结果,共检测出10种脂肪酸,其中饱和脂肪酸3种,C_{16:0}软脂酸含量最高,三者比较饱和脂肪酸总量相差不大,在萃取后海带粉中比例略高。检测到单不饱和

表1 超临界CO₂萃取对脂肪酸组成的影响[†]Table 1 Effect of supercritical CO₂ extraction on fatty acid composition

%

脂肪酸	海带粉	萃取后海带粉	萃取物
肉豆蔻酸(C _{14:0})	12.12±0.02	12.45±0.04	12.04±0.33
软脂酸(C _{16:0})	24.78±0.62 ^b	26.38±0.55 ^a	23.88±0.67 ^b
棕榈油酸(C _{16:1})	2.73±0.51	2.70±0.34	2.99±0.08
硬脂酸(C _{18:0})	1.28±0.23	1.50±0.11	1.20±0.22
油酸(C _{18:1n-9c})	23.09±0.57 ^b	19.24±0.66 ^c	25.88±0.15 ^a
亚油酸(C _{18:2n-6c})	8.49±0.31	8.37±0.54	8.75±0.34
γ-亚麻酸(C _{18:3n-6})	3.67±0.52	3.74±0.66	3.52±0.55
α-亚麻酸(C _{18:3n-3})	2.84±0.22	3.26±0.31	2.70±0.36
花生四烯酸(C _{20:4n-6})	15.03±0.55 ^a	15.31±0.49 ^a	13.63±0.51 ^b
二十碳五烯酸(C _{20:5n-3})	5.96±0.43 ^b	7.05±0.36 ^a	5.41±0.44 ^b
饱和脂肪酸	38.19±0.87 ^{ab}	40.33±0.70 ^a	37.11±1.22 ^b
单不饱和脂肪酸	25.82±1.08 ^b	21.95±1.00 ^c	28.87±0.23 ^a
多不饱和脂肪酸	35.99±2.03	37.72±2.36	34.02±2.20

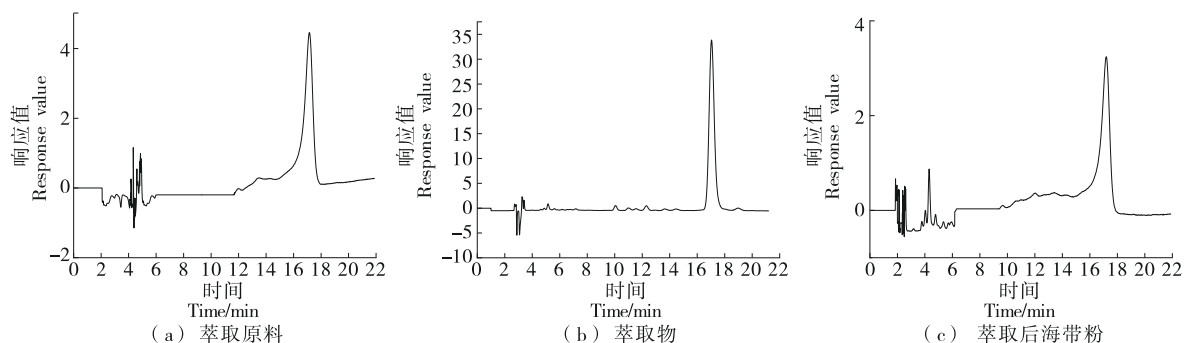
[†] 小写字母不同表示各样品之间具有显著性差异($P<0.05$)。

图6 萃取原料、萃取物和萃取后海带粉的高效液相色谱图

Figure 6 High performance liquid chromatograms of extracted raw material, extract, and post-extraction *Sacharina japonica*

中具有重要的应用潜力。同时,脂肪酸检测结果显示,萃取物中单不饱和脂肪酸含量较高,而萃取后海带粉中多不饱和脂肪酸含量更高。此外,萃取物中岩藻黄素含量达到4.766 mg/g,得到了有效富集。结果表明,超临界CO₂萃取技术是一种绿色高效的脱除海带腥味的办法,同时可以萃取并分离出海带粉中的部分脂类物质和岩藻黄素。

参考文献

- [1] 胡顺强,郑恩萍,赵婷雪,等.褐藻活性成分制备及其稳定性研究进展[J].浙江农业科学,2023,64(8):2 018-2 027.
- HU S Q, ZHENG E P, ZHAO T X, et al. Research progress on the preparation and stability of active components from Phaeophyta[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(8): 2 018-2 027.

- [2] PATRA J K, DAS G, BAEK K H. Chemical composition and antioxidant and antibacterial activities of an essential oil extracted from an edible seaweed, *Laminaria japonica* L. [J]. Molecules, 2015, 20(7): 12 093-12 113.
- [3] 祝闻畅.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 W Y. Analysis of kelp fishy-odor compounds and research on deodorization by biological method[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [4] 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.
- [5] 张李,聂志明,陈运中,等.海带脱腥工艺优化及复方海带代

- 餐粉的研制[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 23-28.
- ZHANG L, NIE S M, CHEN Y Z, et al. Optimization of kelp deodorization process and development of compound kelp meal substitute powder[J]. The Food Industry, 2021, 42(7): 23-28.
- [6] 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.
- [7] 汪洋, 李焱. 超临界 CO₂ 萃取在植物化学物提取中的研究进展[J]. 中国酿造, 2015, 34(7): 10-14.
- YANG W, YAN L. Research progress on the supercritical CO₂ extraction in phytochemicals[J]. China Brewing, 2015, 34(7): 10-14.
- [8] MOUAHID A, SEENGEON K, MARTINO M, et al. Selective extraction of neutral lipids and pigments from *Nannochloropsis salina* and *Nannochloropsis maritima* using supercritical CO₂ extraction: Effects of process parameters and pre-treatment[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2020, 165: 104934.
- [9] SAINI K C, YADAV D S, MEHARIYA S, et al. Overview of extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* using CO₂ supercritical fluid extraction technology vis-a-vis quality demands[M]// Global perspectives on astaxanthin. [S. l.]: Academic Press, 2021: 341-354.
- [10] 黄秋伟. 锯叶棕果油的超临界二氧化碳萃取及抗氧化活性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- HUANG Q W. Study on supercritical carbon dioxide extraction and anti-oxidation of oil from saw palmetto [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National standard for food safety determination of fat in food: GB 5009—2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 1-2.
- [12] ZHAI H N, DONG W J, TANG Y M, et al. Characterization of the volatile flavour compounds in Yunnan Arabica coffee prepared by different primary processing methods using HS-SPME/GC-MS and HS-GC-IMS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 192: 115717.
- [13] 马长兴, 王际英, 李宝山, 等. n-3/n-6 HUFA 对许氏平鲷幼鱼生长、体组成及组织脂肪酸组成的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(10): 2 138-2 153.
- MA C X, WANG J Y, LI B S, et al. Effects of dietary n-3/n-6 HUFA on growth, body composition and fatty acid composition of tissue in juvenile rockfish (*Sebastes schlegelii*) [J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(10): 2 138-2 153.
- [14] 花汝凤, 周淑华. 高效液相色谱法测定海带浓缩制品中岩藻黄素的含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(19): 7 114-7 117.
- HUA R F, ZHOU S H. Determination of fucoxanthin in kelp extract powder by high performance liquid chromatography[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(19): 7 114-7 117.
- [15] ALI-NEHARI A, CHUN B S. Characterization of purified phospholipids from krill (*Euphausia superba*) residues deoiled by supercritical carbon dioxide[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(7): 918-924.
- [16] NIE J L, FU X T, WANG L, et al. Impact of Monascus purpureus fermentation on antioxidant activity, free amino acid profiles and flavor properties of kelp (*Saccharina japonica*) [J]. Food Chemistry, 2023, 400: 133990.
- [17] 庞敏, 崔秀明. 超临界 CO₂ 提取葛缕子精油及其成分分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 175-179, 194.
- PANG M, CUI X M. Extraction of *Carum carvi* L. essential oil by supercritical carbon dioxide and its composition analysis[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 175-179, 194.
- [18] FRANKLIN E C, HAQ M, ROY V C, et al. Supercritical CO₂ extraction and quality comparison of lipids from Yellowtail fish (*Seriola quinqueradiata*) waste in different conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(11): e14892.
- [19] 叶彬清. 超临界 CO₂ 萃取秋刀鱼内脏油脂及卵磷脂氧化特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015: 30-33.
- YE B Q. Extracted from pacific saury (*Cololabis Saira*) viscera by supercritical carbon dioxide[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015: 30-33.