

海藻脱腥技术研究进展

张贤艳, 段文杨, 邹佳欣, 李继丹, 杨海龙*

(温州大学生命与环境科学学院, 温州 325035)

摘要: 海藻营养丰富, 味道鲜美, 富含多糖、多酚等活性成分, 具有抗凝血、抗病毒、降血脂、降血糖、抗氧化、抗疲劳及提高机体免疫等作用, 但由于海藻中含有种类繁多的挥发性化合物, 包括烃类、酚类、醛类、烷基苯、萜类、醇类、酮类、酸类、酯类以及含氮、卤素元素的有机化合物等, 多种挥发性成分相互混杂、共同作用产生了强烈的腥味, 严重影响了消费者的接受程度和海藻产业的发展。本文针对国内外近年来对海藻腥味物质与形成机制, 以及吸附、微胶囊、微生物发酵等脱腥技术进行了概述, 并对今后有关海藻脱腥的研究工作提出了展望。

关键词: 海藻; 脱腥; 掩盖法; 吸附法; 发酵法

Research progress on the deodorization technology of seaweed

ZHANG Xian-Yan, DUAN Wen-Yang, ZOU Jia-Xin, LI Ji-Dan, YANG Hai-Long*

(College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

ABSTRACT: Seaweed is rich in nutrient and tastes deliciously. Due to the presence of high amounts of active ingredients such as polysaccharide and polyphenol, seaweed has anticoagulant, anti-virus, hypolipidemic, hypoglycemic, antioxidation and anti-fatigue activities, as well as improving the immunity of the body. However, seaweed contains a wide variety of volatile compounds including hydrocarbon, phenols, aldehydes, alkyl benzene, terpenoids, alcohols, acids, esters, ketones, and other organic compounds containing nitrogen and halogen elements. The various volatile components are intermixed and the joint action produces a strong smell, which significantly affects the consumer acceptance and limits the development of seaweed industry. This paper summarized the domestic and overseas research progress on the odor compounds and their formation mechanism, as well as deodorization technology including adsorption, microcapsule, microbial fermentation, and also introduced the future research work on seaweed deodorization.

KEY WORDS: seaweed; deodorization; masking; adsorption; fermentation

1 引言

我国海域辽阔, 海洋藻类的生长环境多样, 海藻种类丰富多样, 已记录有 800 种左右, 其中 100 多种具有经济

利用价值, 主要是红藻、褐藻和绿藻等大型海藻种类^[1]。海带(*Laminaria japonica*)、紫菜(*Porphyra haitanensis*)、条斑紫菜(*P. yezoensis*)、羊栖菜(*Sargassum fusiforme*)、龙须菜(*Gracilariopsis lemaneiformis*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida*)、

基金项目: 温州市海洋与渔业局项目(KH1612108)

Fund: Supported by the Wenzhou Marine and Fisheries Bureau Project (KH1612108)

*通讯作者: 杨海龙, 教授, 主要研究方向为发酵技术研究。E-mail: 00121049@wzu.edu.cn。

*Corresponding author: YANG Hai-Long, Professor, College of Life and Environmental Science, Wenzhou University. E-mail: 00121049@wzu.edu.cn.

螺旋藻(*Spirulina platensis*)、鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)等都是常见的经济海藻。海藻富含岩藻糖等硫酸酯多糖、褐藻多酚、岩藻黄质色素、活性碘、膳食纤维等功能性成分^[2-4], 具有良好的保健价值, 现代药理学研究表明海藻活性成分具有抗凝血、抗菌^[5]、抗病毒^[6]、降血脂^[7]、降血糖^[8]、抗炎^[9-11]以及清除自由基、抗氧化^[12-14]、提高机体的免疫力、抗肿瘤^[15,16]、抗疲劳、增强记忆的作用^[17], 同时海藻含有微量元素、氨基酸等成分, 营养丰富, 而且脂质含量较低, 一般为 0.1%~1.0%, 但不饱和脂肪酸含量较高, 尤其富含 *n*-3 和 *n*-6 系列不饱和脂肪酸, 是不饱和脂肪酸的重要来源^[18], 但海藻中含有种类繁多的挥发性化合物, 包括烃类、酚类、醛类、烷基苯、萜类、醇类、酮类、酸类、酯类以及含氮、卤素元素的有机化合物等, 这些挥发性成分相互混杂、共同作用导致海藻具有浓重的腥味, 影响消费者的接受程度, 限制了海藻产业的发展。

2 海藻腥味物质及形成机制

海藻中的挥发性成分包括烃类、酚类、醛类、烷基苯、萜类、醇类、酮类、酸类、酯类以及含氮、卤素元素的有机化合物^[19]。这些挥发性成分构成了海藻腥味的物质基础, 脂肪酸氧化、酶(醛类物质生成酶、脂氧合酶等)催化、类胡萝卜素的降解是海藻形成挥发性物质的重要途径。烃类化合物主要通过脂肪酸烷氧自由基的均裂产生, 在一定条件下有些烷烯烃类裂解之后产生腥味的潜在物质^[20]; 长链醛合成酶(long chain aldehyde-forming enzyme, LCAE)普遍存在于红藻、褐藻、绿藻中, 它能催化亚麻酸、油酸、亚油酸和棕榈酸合成(8Z, 11Z, 14Z)-十七碳三烯醛(heptadecatrienal)、(8Z, 11Z)-十七碳二烯醛(heptadecadienal)、(8Z)-十七碳醛(heptadecanal)、(7Z, 10Z, 13Z)-十六碳三烯醛(hexadecatrienal)以及十五碳醛(pentadecanal)等长链醛类化合物^[21]; 在狭叶海带(*Laminaria angustata*)中, 不饱和脂肪酸亚油酸和花生四烯酸在脂氧合酶(lipoxygenase)和脂肪酸过氧化裂解酶(fatty acid hydroperoxide lyase)的作用下, 通过(*S*)-13-羟-过氧十八碳酸(*S*-13-hydroperoxyoctadecadienoic acid)、(*S*)-15-羟-过氧二十烷酸(*S*-15-hydroperoxyeicosatetraenoic acid)、(*R*)-9-羟-过氧十八碳酸(*R*-9-hydroperoxyoctadecadienoic acid)等中间产物形成 *n*-己醛、3Z-壬烯醛、2E-壬烯醛等挥发性成分^[22]; 绿藻砾菜(*Ulva conglobata*)中的酶将花生四烯酸经由 15-羟-过氧二十烷酸转化为 2,4-癸二烯醛(2,4-Decadienal)^[23]。Jüttern^[24]早在 1976 就从惠氏微囊藻(*Microcystis wesenbergii*)和铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)的挥发性成分中分离鉴定出了 β -柠檬醛与一些烃类成分; Tinoco 等^[25]的研究表明藻类中类胡萝卜素降解形成了 β -柠檬醛、 α -紫罗兰酮及 β -紫罗兰酮等化合物; Yamamoto 等^[26]确定浒苔(*Ulva prolifera*)、缘管浒苔(*Ulva linza*)中主要

的挥发性成分为十七碳烯、紫罗兰酮等类胡萝卜素降解物, 礁膜(*Monostroma nitidum*)中的主要挥发性物质为苯甲醛; 盒管藻(*Capsosiphon fulvescens*)的挥发性物质由(E)- β -紫罗兰酮、(E,E)-2,4-庚二烯醛、棕榈酸、肉豆蔻酸、 β -柠檬醛、辛烷、(Z,Z)-1,5-辛二烯-3-醇、苯甲醛等化合物组成^[27]。

不同海藻的腥味成分、浓度有差异, 而且同一海藻的品种、养殖时间、养殖环境都会影响藻类挥发性成分的种类及其含量, 另外, 测定方法的不同所获得的结果也有差异。张敏^[28]采用现代分析手段, 利用顶空固相微萃取(headspace solid phase micro-extraction, HS-SPME)和气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用法, 研究了鼠尾藻、龙须菜、浒苔、条斑紫菜和红毛菜等常见经济海藻的挥发性成分, 在 5 种海藻中分别鉴定出烃类、醇类、醛类及酯类物质, 其中鼠尾藻、浒苔及龙须菜以烃类、醛类、醇类、酯类及其他挥发性化合物为主; 红毛菜和条斑紫菜的挥发性成分均以烃类物质为主, 其含量占总挥发性成分的 60%以上, 烃类成分主要为 8-十七碳烯及十七碳烷, 含量超过总成分的 50%, 同时含有少量醛类、醇类、酯类成分。而在浒苔、龙须菜、鼠尾藻的挥发性成分中 8-十七碳烯的含量较少。海藻中挥发性物质一般经提取制备后采用 GC-MS 法, 但前处理方法较多, 不同的提取、制备方法获得的挥发性成分有所不同, 如网翼藻(*Dictyopteris membranacea*)采用水蒸馏法提取, 分析确定的产物主要是 C₁₁ 烃类, 微波辅助水蒸馏法分析出的主要成分是倍半萜类, 而超临界萃取法分析确定的主要代谢成分是含硫化合物^[29]。另外不同品种、海域、生长环境对海藻挥发性成分的形成也有影响, 李微等^[20]比较了不同海域不同品种坛紫菜(*P. haitanensis*)挥发性成分, 确定坛紫菜的挥发性组分有明显的品种和地区性差异, 在不同品种间 8-十七碳烯、1-十七碳烯、壬醛、2-乙基-6-甲基吡嗪、辛醛等为主的差异组分, 而 8-十七碳烯、壬醛、2-乙基-6-甲基吡嗪、1-十七碳烯、苯乙烯等是不同海域的主要差异组分; 徐年军等^[30]分析了高温胁迫条件下龙须菜(*G. lemaneiformis*)的挥发性成分, 确定了 E-2-庚烯醛、2-正戊基呋喃、E,E-2,4-庚二烯醛和三氯甲烷与龙须菜高温逆境生理有关。

形成海藻的特有风味的主要成分还含有苯乙醛、甲基吡咯、间甲基异丙基苯、溴代戊烷、5,6-二甲基己内酯、邻甲基乙基苯等, 其中胺类、萜类和吡啶类物质是形成海藻腥味的主要成分。陈婉珠等^[31]以海带均浆液为实验材料, 采用二乙烯苯-Caroxen-聚二甲基硅氧烷涂层的固相微萃取头萃取挥发性成分, 并通过气质联用仪分析鉴定海带中的气味成分, 结果表明 3-羟基-1-辛烯醇含量最多, 其次是十六烷酸、愈创蓝油烃、异丙基豆蔻酸酯、四甲基十七烷, 这些物质共同作用形成了海带特殊的藻香藻腥味。丁洁^[32]的研究表明, 螺旋藻腥味的主要成分为 2-甲基四氢呋喃、

三甲胺、3,5,5-三甲基-2-环己烯-1-酮、甲苯、1,3-二氯苯和1-辛烯-3-醇。

3 海藻脱腥技术

海藻腥味重,如何脱除其腥味是研究人员开发海藻产品的重要任务之一,目前的腥味物质脱除技术,主要包括传统的酸碱盐法脱腥、蒸汽脱腥、掩盖法脱腥,以及新型的吸附法、微胶囊法、萃取法、微生物发酵法脱腥等。

3.1 酸碱处理法脱腥

腥气成分在一定条件下可以与酸碱发生化学反应生成无腥味的物质,盐有利于水产品中的腥气成分析出,实现脱腥。醋酸、柠檬酸等是常用于脱腥的酸,碱一般使用氢氧化钠,用于脱腥的盐有 CaCl_2 、 NaCl 等。王中凤等^[33]采用 0.2% 盐酸+2% 柠檬酸煮沸 60 min, 有效地脱除了海带腥味; 江洁等^[34]制备了体积分数为 1% 醋酸、5% 柠檬酸、2% NaOH 和 10% 乙醇的脱腥液, 分别将大小不同的海带放入脱腥液中浸泡研究脱腥效果, 结果表明海带经体积分数为 1.0% 醋酸溶液脱腥 20 min, 所得产品无腥臭味; 周峙苗等^[35]通过正交试验, 确定羊栖菜脱腥处理液的优选配方为: 乙醇 25%、过氧化氢 7%、乙酸酐 10%、醋酸 1%, 在室温浸泡 20 h 左右可达到脱腥的效果。

3.2 掩盖法脱腥

掩盖法脱腥是食品加工中最常用的方法之一。辣椒、大蒜、姜、桂皮、八角等香辛物质含有特殊的风味物质, 可以掩盖那些不受欢迎的异味, 如生姜含有姜醇、姜醇、姜酚, 葱含挥发油及葱蒜辣素, 花椒、胡椒含川椒素, 桂皮中含挥发油有机酸, 八角中含有茴香醇、茴香醚等, 香辛料中的这些风味物质能使异味物质在嗅觉上产生减弱效果并且增香。迟玉森等^[36]的试验表明采用甘草、八角、桂皮按 1:0.3:0.3 的比例配比, 然后加入 10 倍的水煮汁, 以海带浸提汁计算加入 1% 的水煮汁, 可以有效地掩盖海带汁的腥味; 甘草单独使用也能够有效地除去海带的腥味^[37]; 俞静芬等^[38]比较了柠檬酸、醋酸、氢氧化钙和甘草等不同物质对海带脱腥的效果, 结果表明, 脱腥效果最佳的是甘草, 海带经 3% 的甘草液在 50 °C 下处理 10 min 后, 可以达到脱腥并带有淡甘草味的效果; 陈丽春等^[39]研究了复合脱腥液对羊栖菜的脱腥效果, 通过正交试验确定复合脱腥液的最佳组成为 4.5% 酵母、2.0% 紫苏液、5.0% β -环糊精的混合液; 处理工艺为, 先在 30 °C 水浴锅中保持 1 h, 之后升温至 60 °C 保持 2 h, 经复合脱腥液处理的羊栖菜样品基本无腥味。

3.3 蒸汽脱腥法

真空脱腥和加热脱腥是蒸汽脱腥的主要方法。真空脱腥是将样品置于真空装置中, 通过抽真空达到一定的真空

度, 同时加热使产品中的异味物质随蒸气排出, 达到脱腥的效果。目前藻粉、藻液采用该方法进行脱腥。一些原料加热时可以施加一定压力促使腥味物质释放, 对除腥要求不高的液体产品可以采用加热除腥的方法, 如加 2.0% 老姜后经高压蒸煮对海带具有一定的脱腥作用^[33]; 谢林明等^[40]分别采用真空脱腥、掩盖脱腥、吸附脱腥以及发酵等方法对螺旋藻进行脱腥处理, 表明这些方法都有良好的脱腥效果, 其中效果最佳是真空脱腥。

3.4 吸附法

吸附是溶质从液相或气相转移到固相的现象。活性炭是日常生活和工业生产中应用最为广泛的吸附剂。活性炭稳定性高, 具有高度发达的孔隙结构, 而且比表面积非常大, 对腥臭成分、色素等都有较好的吸附作用。2% 活性炭吸附 2.0h 可去除马尾藻的腥味^[41]。在海藻脱腥处理中, 茶叶也是良好的吸附剂, 利用 1.5% 的绿茶或花茶吸附处理海带进行脱腥, 60 °C 下作用 10 min, 具有良好的脱腥效果^[42,43]。谢林明等^[40]的试验表明茉莉花茶对螺旋藻的最佳脱腥工艺条件为, 添加量 0.6%, 吸附时间 30 min, 吸附温度 50 °C。

3.5 环糊精包埋法

β -环糊精(β -cyclodextrin)是一种应用广泛的食物添加剂, 它是由 7 个葡萄糖单体在酶的作用下经 α -1,4 糖苷键结合生成的环状物, 食用后能作为碳水化合物被人体吸收利用, 无毒副作用。 β -环糊精外部亲水, 而分子内部存在疏水的环状结构可以包埋腥味物质, 从而达到脱腥的作用, 因此, β -环糊精是海藻产品生产中理想的脱腥剂。阳晖等^[44]比较了加热法、遮蔽法等技术对螺旋藻的脱腥情况, 确定其中的最佳脱腥方法是在加热的条件下添加 β -环糊精, 其最佳的工艺条件为: 添加 4 g/L 的 β -环糊精, 30 °C 温度条件下处理 40 min, 该处理条件不但可以去腥, 还具有护色和保持螺旋藻蛋白质的作用。丁洁^[32]研究了 β -环糊精等物质对螺旋藻进行微胶囊处理达到脱腥效果, 确定的最佳微胶囊化工艺条件是, β -环糊精、麦芽糊精、和阿拉伯胶以 1:1:1 混合为壁材, 螺旋藻粉为芯材, 壁材与芯材的比例为 10:1, 总固形物浓度为 15%, 16000 r/min 的条件下乳化, 乳化温度 30 °C, 时间 3 min; 喷雾干燥条件为, 进风温度 200 °C, 出风温度 90 °C, 进料温度为 30 °C, 采用该条件制备的螺旋藻微胶囊化产品无腥味。

3.6 微生物发酵法脱腥

微生物的新陈代谢作用可以吸收利用海藻中的部分化学物质, 选择适宜的微生物菌株可将海藻中的小分子腥味成分转变成无腥味的大分子物质, 或者通过微生物酶的作用下对腥味物质的分子结构进行修饰, 转化成为无腥味成分, 达到脱腥的效果。发酵脱腥不添加其他物质, 是一

种绿色的脱腥方法, 能够比较彻底地除去腥味^[45], 常用微生物如乳酸菌、酵母、醋酸菌、米曲霉等。王中凤等^[33]的结果表明, 海带汁经乳酸发酵 24 h, 腥味大大减轻, 发酵 48 h 后, 完全去除了海带腥味, 并有浓郁的发酵香。颜栋美等^[45]的研究认为海带汁中 0.4% 的酵母, 30 °C 条件下发酵 0.5 h, 具有最佳的脱腥效果。对螺旋藻发酵脱腥的工艺条件有不同的研究报道, 谢林明等^[40]确定的最佳脱腥工艺为: 添加 0.6% 的酵母, 温度 32 °C 条件下发酵 90 min; 王海平等^[46]确定的最佳发酵条件为: 接种 0.5% 的高活性干酵母, 温度 29 °C 条件下发酵 1 h; 而张丽君等^[47]认为脱腥最佳工艺条件为: 添加 0.1% 的活性干酵母在 30 °C 下发酵 30 min; Seo 等^[48]采用米曲霉(*Aspergillus oryzae*)发酵海带, 以热脱吸结合 GC-MS 技术分析出了 56 种海带风味物质, 其中主要特征成分为异戊酸、异硫氰酸烯丙酯、辛醛和乙醛; 在搅拌转速 120 r/min、30 °C 条件下发酵 4 d 能有效去除腥味, 与发酵前相比, 腥味强度下降 4 倍。另外, 发酵还能显著改善海藻的风味成分, 张艳艳等^[49]采用毛霉发酵螺旋藻, 发现毛霉发酵可以明显改善螺旋藻的风味, 而且在发酵前后螺旋藻挥发性成分的种类和含量都发生了显著的变化。螺旋藻中醇类和芳香族、醛类、酮类等具有腥味的成分发酵后明显减少, 而形成了具有乳和卤肉香的新风味物质, 2-羟基-麝香酮和 5,6,7,7-四氢-4,4,7-三甲基-(R)-2(4H)苯并呋喃酮。

4 结 论

目前海藻制品在食品、药物、化妆品等行业已获得广泛应用, 人们对其品质(如气味、颜色等)的要求也越来越高。对海藻而言如何控制腥味物质的形成以及脱除腥味成分越来越受到研究者的重视。掩盖、吸附等传统脱腥方法虽然对海带、羊栖菜等海藻有一定的脱腥效果, 但对蛋白质等营养成分可能有一定的破坏, 从而影响海藻的营养价值, 微生物脱腥法是一种绿色环保的脱腥方法, 效果好, 不但具有改善海藻风味的作用, 还可以提高其生物活性, 如采用经芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)发酵海带、以经乳酸菌(*Lactobacillus* sp)发酵鼠尾藻均可显著提高它们的抗炎作用^[50,51]。因此, 发酵是海藻脱腥处理的发展方向。另外, 目前脱腥技术的研究大多是以感官品评为指标确定其最佳工艺参数, 缺乏具体对腥味成分去除方面的分析, 利用气相色谱-质谱联用仪及电子鼻分析等现代分析手段, 可以清晰地了解不同方法对海藻腥味成分种类及含量脱除的变化进程, 感官品评结合现代分析技术可以更好地评价海藻脱腥的效果。

参考文献

[1] 张淑梅, 李忠红. 浅议中国海藻开发利用[J]. 水产科学, 2001, 20(4): 35-37.

- Zhang SM, Li ZH. Discussion of the exploitation and utilization of seaweed in China [J]. *Fish Sci*, 2001, 20(4): 35-37.
- [2] Florez-Fernandez N, Lopez-Garcia M, Jesus GMM, et al. Ultrasound-assisted extraction of fucoidan from *Sargassum muticum* [J]. *J Appl Phycol*, 2017, 29: 1553-1561.
- [3] Li YJ, Fu XT, Duan DL, et al. Extraction and identification of phlorotannins from the brown alga, *Sargassum fusiforme* (Harvey) setchell [J]. *Mar Drugs*, 2017, 15(2), 49.
- [4] Isaka S, Cho K, Nakazono S, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activities of porphyran isolated from discolored nori (*Porphyra yezoensis*) [J]. *Int J Biol Macromol*, 2015, 74: 68-75.
- [5] Liu M, Liu Y, Cao MJ, et al. Antibacterial activity and mechanisms of depolymerized fucoidans isolated from *Laminaria japonica* [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 172: 294-305.
- [6] Cao YG, Hao Y, Li ZH, et al. Antiviral activity of polysaccharide extract from *Laminaria japonica* against respiratory syncytial virus [J]. *Biomed Pharm*, 2016, 84: 1705-1710.
- [7] Kolsi RBA, Salah HB, Jardak N, et al. Sulphated polysaccharide isolated from *Sargassum vulgare*: Characterization and hypolipidemic effects [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 170: 148-159.
- [8] Pantidos N, Boath A, Lund V, et al. Phenolic-rich extracts from the edible seaweed, *ascophyllum nodosum*, inhibit α -amylase and α -glucosidase: Potential anti-hyperglycemic effects [J]. *J Funct Foods*, 2014, 10: 201-209.
- [9] Joung EJ, Gwon WG, Shin T, et al. Anti-inflammatory action of the ethanolic extract from *Sargassum serratifolium* on lipopolysaccharide-stimulated mouse peritoneal macrophages and identification of active components [J]. *J Appl Phycol*, 2017, 29: 563-573.
- [10] Sanjeeva KKA, Fernando IPS, Kim EA, et al. Anti-inflammatory activity of a sulfated polysaccharide isolated from an enzymatic digest of brown seaweed *Sargassum horneri* in RAW 264.7 cells [J]. *Nutr Res Pract*, 2017, 11: 3-10.
- [11] Liu Q, Wang Y, Cao M, et al. Anti-allergic activity of R-phycoerythrin from *Porphyra haitanensis* in antigen-sensitized mice and mast cells [J]. *Int Immunopharm*, 2015, 25: 465-473.
- [12] Chen BJ, Shi MJ, Cui S, et al. Improved antioxidant and anti-tyrosinase activity of polysaccharide from *Sargassum fusiforme* by degradation [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 92: 715-722.
- [13] 汪财生, 王璐, 刘丽平, 等. 羊栖菜岩藻黄质色素的抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(23): 125-128.
- Wang CS, Wang L, Liu LP, et al. Study on the antioxidative properties of algal xanthophyllin [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(23): 125-128.
- [14] Fawzy MA, Gomaa M, Hifney AF, et al. Optimization of alginate alkaline extraction technology from *Sargassum latifolium* and its potential antioxidant and emulsifying properties [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 157: 1903-1912.
- [15] Fan S, Zhang J, Nie W, et al. Antitumor effects of polysaccharide from *Sargassum fusiforme* against human hepatocellular carcinoma HepG₂ cells [J]. *Food Chem Toxicol*, 2017, 102: 53-62.
- [16] Chen H, Zhang L, Long X, et al. *Sargassum fusiforme* polysaccharides inhibit VEGF-A-related angiogenesis and proliferation of lung cancer in

- vitro and *in vivo*[J]. Biomed Pharm, 2017, 85: 22–27.
- [17] Hu P, Li Z, Chen M, *et al.* Structural elucidation and protective role of a polysaccharide from *Sargassum fusiforme* on ameliorating learning and memory deficiencies in mice [J]. Carbohydr Polym, 2016, 139: 150–158.
- [18] Foseid L, Devle H, Stenstrom Y, *et al.* Fatty acid profiles of stipe and blade from the norwegian brown macroalgae *Laminaria hyperborea* with special reference to acyl glycerides, polar lipids, and free fatty acids [J]. J Lipids, 2017, 2017(1): 1–9.
- [19] Kamenarska Z, Ivanova A, Stancheva R, *et al.* Volatile compounds from some black sea red algae and their chemotaxonomic application [J]. Bot Mar, 2006, 49(1): 47–56.
- [20] 李微, 阿曼尼萨·买买提, 徐继林, 等. 不同海域不同品种坛紫菜 (*Pyropia haitanensis*) 挥发性成分的比较分析[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(5): 147–156.
- LI W, Omannisa MMT, XU JL, *et al.* Comparative study of volatile components from two strains of *Pyropia haitanensis* in different culture areas [J]. Prog Fish Sci, 2016, 37(5): 147–156.
- [21] Kajiwara T, Matsui K, Hatanaka A, *et al.* Distribution of an enzyme system producing seaweed flavor: conversion of fatty acids to long-chain aldehydes in seaweeds [J]. J Appl Phycol, 1993, 5: 225–230.
- [22] Boonprab K, Matsui K, Akakabe Y, *et al.* Formation of aldehyde flavor (*n*-hexanal, 3Z-nonenal and 2E-nonenal) in the brown alga *Laminaria angustata* [J]. J Appl Phycol, 2006, 18: 409–412
- [23] Akakabe Y, Matsui K, Kajiwara T. 2,4-Decadienals are produced via (R)-11-HPITE from arachidonic acid in marine green alga *Ulva conglobata* [J]. Bioorg Med Chem, 2003, 11(17): 3607–3609.
- [24] Jüttner F. β -cyclocitral and alkanes in *Microcystis* (*Cyanophyceae*) [J]. Z Naturforsch C, 1976, 31: 491–495.
- [25] Tinoco NAB, Uekane TM, Tsukui A, *et al.* Generation of volatile compounds from carotenoids of *Dunaliella bardawil* algae by water bath heating and microwave irradiation [J]. J Brazil Chem Soc, 2016, 27(8): 1452–1458.
- [26] Yamamoto M, Baldermann S, Yoshikawa K, *et al.* Determination of volatile compounds in four commercial samples of Japanese green algae using solid phase microextraction gas chromatography mass spectrometry [J]. Sci World J, 2014, 2014(1): 289780.
- [27] Sun SM, Chung GH, Shin TS. Volatile compounds of the green alga, *Capsosiphon fulvescens*[J]. J Appl Phycol, 2012, 24(5): 1003–1013.
- [28] 张敏. 五种经济海藻代谢及代谢机制的初步研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- Zhang M. Primary studies on metabolic composition and metabolic mechanism of five economic seaweeds [D]. Suzhou: Suzhou University, 2011.
- [29] Hattab ME, Culioli G, Piovetti L, *et al.* Comparison of various extraction methods for identification and determination of volatile metabolites from the brown alga *Dictyopteris membranacea*[J]. J Chromatogr, 2007, 1143: 1–7.
- [30] 徐年军, 何艳丽, 唐军, 等. 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)高温逆境代谢产物的 GC-MS 分析[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 221–227.
- Xu NJ, He YL, Tang J, *et al.* Volatile metabolite in *Gracilaria lemaneiformis* at high temperature[J]. Oceanol Et Limnol Sin, 2009, 40(2): 221–227.
- [31] 陈婉珠, 芮汉明, 张玲. 海带腥味物质的 HS-SPME-GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2006, 27(12): 71–74.
- Chen WZ, Rui HM, Zhang L. HS-SPME-GC-MS analysis of fishy smell substances from *Laminaria* [J]. Sci Technol Food Ind, 2006, 27(12): 71–74.
- [32] 丁洁. 螺旋藻主要腥味物质与脱腥技术的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- Ding J. *Spirulina* major flavor compounds and deodorization technology [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [33] 王中凤, 曾凡坤. 海带饮料脱腥工艺研究[J]. 食品工业, 1993, (6): 31.
- Wang ZF, Zeng FK. Study on deodorization process of kelp beverage[J]. Food Ind, 1993, (6): 31.
- [34] 江洁, 陈兴才. 即食海带的脱腥与杀菌工艺[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2007, 36(1): 106–109.
- Jiang J, Chen XC. Smell removal and sterilization processes of instant kelp [J]. J Fujian Agri Forest Univ (Nat Sci Ed), 2007, 36(1): 106–109.
- [35] 周峙苗, 洪映君. 脱腥脱色羊栖菜精粉的研制[J]. 食品研究与开发, 2000, 21(5): 14–17.
- Zhou ZM, Hong YJ. Preparation of *Sargassum fusiform* powder with deodorization and decolorization [J]. Food Res Dev, 2000, 21(5): 14–17.
- [36] 迟玉森, 蒋丽, 唐琳, 等. 富碘无腥海带饮料的研制[J]. 食品科学, 1996, 17(12): 28–32.
- Chi YS, Jiang L, Tang L, *et al.* Preparation of iodine rich kelp beverage with deodorization [J]. Food Sci, 1996, 17(12): 28–32.
- [37] 何晋浙, 孙培龙, 丁玉庭, 等. 海带的除腥研究[J]. 食品研究与开发, 2004, 25(1): 65–66.
- He JZ, Sun PL, Ding YT, *et al.* Study on deodorization of kelp [J]. Food Res Dev, 2004, 25(1): 65–66.
- [38] 俞静芬, 凌建刚, 周安渊, 等. 海带脱腥工艺的研究[J]. 农产品加工(创新版), 2009, (4): 20–22.
- Yu JF, Ling JG, Zhou AY, *et al.* Smell removal process of kelp [J]. Acad Period Farm Prod Process (Innov Ed), 200, 9(4): 20–22.
- [39] 陈丽春, 邓勇, 夏晨琳, 等. 羊栖菜脱腥技术研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(24): 103–107.
- Chen LC, Deng Y, Xia CL, *et al.* Study on *Sargassum Fusiforme* deodorizing technological [J]. Food Res Dev, 2015, 36(24): 103–107.
- [40] 谢林明, 励建荣. 螺旋藻的脱腥研究[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(11): 67–71.
- Xie LM, Li JR. Study on removing off-flavor of spirulina [J]. Food Ferment Ind, 2003, 29(11): 67–71.
- [41] 王新广, 张歧, 刘军华, 等. 马尾藻提取液脱腥处理的研究[J]. 中国食品添加剂, 2006, (6): 10–15.
- Wang XG, Zhang Q, Liu JH, *et al.* Research on the eliminating sargassum smell [J]. China Food Addit, 2006, (6): 10–15.
- [42] 马久虎. 海带脱腥脱色技术研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(23): 10186–10187.
- Ma JH. Study on deodorization and decolorizing of kelp [J]. J Anhui Agric Sci, 2008, 36(23): 10186–10187.
- [43] 李应彪, 尹保卫. 绿茶对海带脱腥效果的研究[J]. 中国食物与营养, 2007, (9): 37–39.

- Li YB, Yin BW. Study on deodorization effect of green tea on kelp [J]. Food Nutr China, 2007, (9): 37–39.
- [44] 阳晖, 方遂, 邹霞, 等. 螺旋藻脱腥工艺的筛选[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(7): 106–110.
- Yang H, Fang S, Zou X, *et al.* Research on the eliminating fishy smell of *spirulina* [J]. Food Res Dev, 2009, 30(7): 106–110.
- [45] 颜栋美, 于兰. 脱腥海带饮料的研制[J]. 食品科学, 1994, (8): 36–39.
- Yan DM, Yu L. Preparation of kelp beverage with deodorization [J]. Food Sci, 1994, (8): 36–39.
- [46] 王海平, 黄和升. 螺旋藻破壁发酵脱腥技术研究[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(12): 276–277.
- Wang HP, Huang HS. Study on deodorization technological of *Spirulina* by wall breaking fermentation [J]. Jiangsu Agric sci, 2012, 40(12): 276–277.
- [47] 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 LJ, Liu D, Li SM. Study on deodourization process of *Spirulina* [J]. Food Ferment Ind, 2008, 34(6): 95–97.
- [48] Seo YS, Bae HN, Eom SH, *et al.* Removal of off-flavors from sea tangle (*Laminaria japonica*) extract by fermentation with *Aspergillus oryzae* [J]. Bioresource Technol, 2012, 121: 475–479
- [49] 张艳艳, 张红霞, 程妮, 等. 气相色谱-质谱联用分析发酵脱腥前后螺旋藻风味物质[J]. 食品科学, 2012, 33(22): 181–185.
- Zhang YY, Zhang HX, Cheng N, *et al.* Effect of fermentation on flavor compounds of *Spirulina* as analyzed by GC-MS [J]. Food Sci, 2012, 33(22): 181–185.
- [50] Lin HTV, Lu WJ, Tsai GJ, *et al.* Enhanced anti-inflammatory activity of brown seaweed *Laminaria japonica* by fermentation using *Bacillus subtilis* [J]. Process Biochem, 2016, 51: 1945–1953.
- [51] Mun OJ, Kwon MS, Karadeniz F, *et al.* Fermentation of *Sargassum thunbergii* by kimchi-derived *Lactobacillus* sp SH-1 attenuates LPS-stimulated inflammatory response via down regulation of JNK [J]. J Food Biochem, 2017, 41: e12306.

(责任编辑: 武英华)

作者简介



张贤艳, 主要研究方向为食品生物技术研究。

E-mail: 874127819@qq.com

杨海龙, 教授, 主要研究方向为发酵技术研究。

E-mail: yhl@wzu.edu.cn