

海藻多酚功能性作用机制及其应用研究

彭雍博¹, 罗宣¹, 汪秋宽^{1,2,3}, 宋悦凡¹, 任丹丹^{1,2,3}, 丛海花¹

(1. 大连海洋大学 食品科学与工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 国家海藻加工技术研发分中心, 辽宁 大连 116023; 3. 辽宁水产品加工及综合利用重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 海藻多酚 (Algae Polyphenols) 是海藻次级代谢产物, 可保护海藻自身免受植食性动物干扰, 因其具有多种生物学活性, 已成为人们对海洋活性物质研究的热点。本研究中对海藻多酚提取工艺和分离纯化技术进行综述, 阐明了海藻多酚的抗氧化、抑菌、抗病毒、抗肿瘤、抗过敏、抗炎症、抗血凝、葡萄糖稳态调节等生物学活性作用机制, 以及海藻多酚化学结构与其生物学活性的构效关系, 总结了海藻多酚的应用现状, 表明海藻多酚具有可持续性高值化利用发展的价值。同时指出今后需加强海藻多酚功能性结构、活性作用机制、产品应用开发的研究, 海藻多酚在工农业生产中具有广泛应用前景。

关键词: 海藻多酚; 提取工艺; 分离纯化; 化学结构; 生物活性

中图分类号: S958.4; Q946.82

文献标志码: A

海藻作为海洋中的初级生产者, 在长期的生命过程中受到海洋独特的自然环境影响, 能够合成多种具有生理功效的活性物质, 如海藻淀粉、褐藻胶、岩藻聚糖、海藻色素、褐藻氨酸和多酚等^[1-5]。多酚类化合物是具有拒食功能海藻的次级代谢产物, 也是海藻保护自身免受外来生物干扰的有效组分, 因其具有多种生物学活性, 已成为人们对海洋活性物质研究的热点^[6]。由于海藻多酚含量较低、结构复杂、易氧化, 导致其纯化难度高, 因此, 学界对其分离纯化、结构解析、生物活性等的研究较少, 限制了海洋多酚类化合物的产业化发展^[7]。本研究中, 对近年国内外海藻多酚的研究及其应用现状予以综述, 以期对多酚的深层次开发利用提供参考。

1 海藻多酚的提取工艺

海藻多酚 (Algae Polyphenols) 在红藻 Rhodophyta、褐藻 Phaeophyta、绿藻 Chlorophyta 和蓝藻 Cyanobacteria 中均有分布, 是一种低含量的活性物质, 近年来, 研究者围绕着其提取工艺进行了许多有益探索。除经典的溶剂萃取法外, 超声波辅提法、微波辅提法、超临界流体萃取法, 以及几种方法相结合的复合提取工艺也被应用于多酚的研究。

1.1 溶剂萃取法

溶剂萃取法作为多酚提取的经典方法, 其原理为利用植物中化合物在溶剂中的溶解度差异进行提取分离^[8]。此法提取的海藻多酚纯度、提取率相较于纯水均有较大提升, 氧化程度和生物活性也有一定改善。但溶剂使用量大、加热时间长、干扰性化合物多、安全性差等是多酚产业推广中亟待解决的问题^[9]。2016年, 甘育鸿等^[10]探讨了乙醇提取海发菜 *Gracilaria lemaneiformis* 中多酚工艺条件, 最佳提取条件为 70% 乙醇、回流 2 h、液固比 50 mL/g, 海藻多酚提取率为 (2.20 ± 0.04) mg/g。而 Wang 等^[11]关于纯水和 70% 丙酮溶液提取对多种海藻多酚提取率试验表明, 不同来源的海藻采用有机溶剂作为提取剂, 其多酚提取率均显著高于单纯水提法的提取率。Matanjun 等^[12]研究表明, 在甲醇和乙醚两种不同溶剂对北婆罗洲的 8 种海藻中多酚提取率的影响研究中, 同等条件下采用甲醇作为萃取剂, 多酚提取效果明显优于乙醚, 因此, 甲醇更适宜应用于海藻多酚的提取。

1.2 超声辅助萃取法

为了更有效地提取海藻多酚, 研究工作者在利

用溶剂萃取的基础上辅以超声波震动,以提高提取效率,即为超声波辅助萃取法。利用超声波的高频振动产生能量,可使溶剂与植物体中的有效成分充分接触,促使有效成分尽可能向溶剂中转移,强化胞内物质的释放、扩散和溶解以提高提取率^[13]。超声萃取因其高效、节能和环保的优点,已成为植物多酚提取的一种新手段。Wang等^[14]以海带 *Laminaria japonica* 为原料,通过正交试验优化超声波浸提法提取多酚工艺,研究结果显示,对海带多酚提取率具有显著影响的因素为提取温度和时间,最优提取工艺参数为:在超声辅助提取前提下,采用80%的乙醇作为萃取剂,在65℃条件下萃取4h,提取物中多酚含量高达11.1 mg GAE(没食子酸当量)/g。杨会成等^[15]研究发现,超声波处理后的海带样品,再辅以适当的微波辐射,可以缩短多酚的提取时间,并显著提升提取效率,提取率最高为2.08%。虽然相较于传统水提法和溶剂萃取法,超声辅助萃取法可提高海藻多酚的提取率及提取物中多酚含量,但超声辅助萃取法在工厂化生产过程中,因受超声波衰减因素的制约(在器壁形成超声空白区),以及无法实现在线维修等因素影响,目前仅限于小批量加工。

1.3 微波辅助萃取法

微波辅助萃取法是另一种利用电磁波使分子发生高频运动,进而提高活性物质提取率的一种技术;此法浸提时间短、产品杂质少且有效活性成分稳定、提取率高^[16]。微波萃取的缺点是不易自动化,缺乏与其他仪器在线联机的可能性,且由于微波启动中释放了大量热能,不能应用于热敏性生物活性物质的提取。劳敏军等^[17]分析了超声萃取法与微波萃取法对海带多酚提取率的影响,研究发现,微波辅助提取优于超声辅助提取,微波提取最佳条件为液固比75 mL/g、乙醇浓度60%、微波功率800 W、提取时间60 s,多酚提取率为1.6 mg/g。欧阳小琨等^[18]研究表明,在微波提取功率为700 W、乙醇浓度为15%、液固比为25 mL/g、微波处理40 s的条件下,鼠尾藻 *Sargassum thunbergii* 多酚提取率为2.81 mg/g。钟明杰等^[19]研究表明,在功率为800 W、时间为60 s、液固比为50 mL/g、乙醇浓度为25%的条件下,紫菜 *Porphyra haitanensis* 多酚提取率最高为4.80 mg/g。而白蕾^[20]比较了4种提取方法(浸提法、索氏回流法、微波法、超声波法)对海带多酚提取率的影响,结果表明,微波辅助提取法能显著提升海带多酚得

率,该法比甲醇浸提法、索氏提取法高62.5%,比超声法高150.5%。

1.4 超临界流体萃取法

超临界流体萃取法以超临界状态下的流体为溶剂,从固体或液体中萃取有效组分,近年来被广泛应用于海藻生物活性物质的提取研究^[21]。超临界流体萃取法的优点是具有萃取和分离的双重作用,而且节能环保、工艺简单、萃取效率高、无溶剂残留且质量标准高^[22];但其方法要求的装备复杂,溶剂选择范围窄,投资成本高,建立大规模提取生产线有工程难度。Klejduš等^[23]研究证实,超临界流体萃取条件下溶剂易渗透到海藻的基质中,甚至可从钝顶螺旋藻 *Spirulina platensis* 中提取到其内低含量的酚类物质,且产品提取率高,无溶剂残留。Roh等^[24]利用超临界二氧化碳和乙醇作为共溶剂,探索了裙带菜 *Undaria pinnatifida* 干品的多酚最佳提取工艺,在压力为250 bar、温度为333 K条件下多酚提取率最高。Qiu等^[25]在研究超声强化超临界流体萃取对海藻中生物活性物质的影响时发现,与超临界流体萃取相比,超声强化超临界流体萃取过程可以减小CO₂流量,降低萃取温度及压力,缩短萃取时间,而生物活性物质的释放量显著升高。

离子沉淀法是一种比较常用的多酚提取法,被广泛用于分离茶多酚^[26]及果蔬多酚^[27],但对于海藻多酚的应用研究尚未见报道。这可能是因为海藻中的多酚含量相较于陆生植物较低,不易聚集形成金属离子络合物基团析出或析出时间长。而生物酶解法工艺温和,有利于保护产物活性,环保低能耗,易于实现工业化,目前在陆生植物多酚的研究中多有应用^[28],必将成为海藻多酚提取工艺探索的新方向。除此之外,一些高新技术提取法也相继应用于海藻多酚的提取,如脉冲电场刺激^[29]、纳滤结合技术^[30]等方法。这些方法的应用丰富了海藻多酚的提取工艺,还可避免一些物理或化学性损失,有效提高多酚提取率。

2 海藻多酚的纯化技术应用现状

由溶剂萃取等方法提取的海藻多酚中杂质含量高,纯度不能满足实际生产需求,多酚粗品需要进一步分离纯化。目前,多酚的分离纯化技术主要分为两种类型:粗分离技术(大孔树脂吸附法、膜技术纯化法、柱层析法)和纯化技术(高效液相色谱法、高速逆流色谱法)。其中,大孔树脂吸附法、凝胶柱层析法应用于多酚纯化已呈现出工业化

发展的趋势,而高效液相技术等多酚纯化法仍处于实验室研究阶段。

2.1 海藻多酚的粗分离技术

大孔吸附树脂具有良好的大孔网状结构和较大的比表面积,可以选择性吸附水溶液中的有机物,是一类不含交换基团且有较大结构的高分子吸附树脂^[31]。Kim 等^[32]比较了四种不同类型大孔树脂对腔昆布 *Ecklonia cava* 多酚的吸附条件,研究结果表明,大孔树脂 HP-20 对多酚的分离效果最佳,纯化后的多酚含量可由 452 mg PGE/g 增加到 905 mg PGE/g,解吸率高达 92%。吕成林等^[33]以多酚吸附量和解吸率为指标比较了 10 种大孔树脂对羊栖菜 *Hizikia fusiforme* 多酚的分离效果,其中 NKA-9 表现最佳,其吸附量为 0.73 mg/g,解吸率高达 91%,并确定最佳工艺条件为: pH 为 4 的多酚粗品 300 mL,流速 1 mL/min。最佳分离条件为 70% 的乙醇体积 400 mL、流速 1 mL/min。

膜技术是通过仿生学膜材料实现不同介质分离的技术,分离过程中由于原料中不同组分浓度、性质和膜两侧的压力差等因素的驱动,使得原料的各组分有选择的透过膜,从而实现分离的目的^[34]。此法可在常温下进行且选择性好,此外,膜技术无相态变化和化学变化,不破坏活性成分^[35]。但由于试验成本高,缺乏实践经验,目前,膜技术应用于多酚纯化研究尚处于初级阶段。

柱层析技术是根据样品混合物中各组分在固定相和流动相中的分配系数不同,经多次反复分配将各组分分离的一种分离纯化技术。柱层析分离纯化技术在多酚的纯化中应用比较广泛,研究中大多采用硅胶柱层析法、凝胶柱层析法和微晶纤维素柱层析法等^[36]。曲词^[37]在早期制备的海黍子 *Sargassum kjellmanianum* 多酚(多酚含量 2.17 mg GAE/g)中,先通过 NKA-9 大孔树脂吸附树脂分离多酚组分 F1、F2(多酚含量分别为 4.40 mg GAE/g 和 5.52 mg GAE/g),再经 Sephadex LH-20 凝胶柱层析分离纯化,得到 F1-1、F2-1 和 F2-2 3 个组分,其多酚含量分别为 4.57、5.28、6.61 mg GAE/g,结果显示,凝胶柱层析分离法相较于大孔树脂吸附法,其分离效果和多酚含量均得到有效提升。而白蕾^[20]通过葡聚糖 G-25 凝胶柱和 Sephadex LH-20 凝胶柱对海带多酚分离纯化效果的对比发现,两种凝胶柱对海带多酚分离时分配系数(Kav)相差较大,可对各组分进行有效分离,特别是 Sephadex LH-20 凝胶柱分离效果最佳,能

够分离得到 6 个峰。综合分析葡聚糖 G-25 凝胶柱(Kav1、Kav2 分别为 0.00、0.60)更适宜应用于海带多酚的分离纯化。

2.2 海藻多酚的纯化技术

液相色谱纯化是利用混合物中各组分理化性质差异,使其不同程度地分布在流动相和固定相中,各组分在两相的相对运动中,发生多次分布进行分离^[38]。López 等^[39]通过反相高效液相(RP-HPLC)对帚状麻基藻 *Stypocaulon scoparium* 多酚粗提物进行研究,成功分离出 14 种酚类物质,且出峰效果良好。Steevensz 等^[40]研究证实,超高效液相色谱-高分辨质谱技术(UHPLC-HRMS)也能够满足海藻多酚的分离及性能分析要求,同时发现,由于受到多酚聚合度的限制,亲水性液相色谱对不同褐藻多酚的分离差异显著,其对于低分子质量的多酚分离效果最佳。上述研究从侧面验证了高效液相技术应用于海藻多酚分离的可行性,并为下一步采用制备型高效液相色谱快速、大量分离纯化多酚粗品指明了方向。

高速逆流色谱(HSCCC)是一种液-液相色谱分离技术,具有样品无损失、无污染、高效、快速和大制备量分离等优点^[41]。HSCCC 技术正在发展成为一种备受关注的新型分离纯化技术,在食品、保健品、医药研发、天然产物分离和化妆品等领域得到广泛应用,特别适合中小型分子的分离纯化^[42]。虽然现阶段依旧缺乏 HSCCC 大规模分离制备海藻多酚的技术与设备,但随着各种相关技术的不断发展和完善,HSCCC 将会在海藻多酚分离领域发挥越来越重要的作用。

3 海藻多酚的化学结构及其生物活性

3.1 海藻多酚的分类

1955 年,日本学者斋藤首次从内枝多管藻 *Polysiphonia morrowii* 中分离并鉴定出一种含溴的单酚,后来海洋科研人员又陆续从其他海藻中分离出上百种卤代单酚及其衍生物和卤代二酚化合物,在已确定的简单卤代酚中,绝大多数含有溴,极少数含氯^[43]。此外,也有研究指出,从红藻和褐藻可以分离出不含卤代物的简单酚衍生物和带有脂肪链的酚类,但这些简单酚的结构类型及其来源相对较少^[44]。目前,在海藻多酚的众多研究中,褐藻多酚是现阶段研究的主要方向,这主要是因为褐藻分布广、种类多、产量高、多酚含量丰富。

不同种类的海藻其多酚基本结构单元均是间苯三酚,但组成多酚的间苯三酚连接方式和数量不同,这是因为海藻种类、藻龄、产地、季节和藻体的不同部位会对海藻多酚结构产生显著差异^[45]。目前,根据间苯三酚寡聚物聚合方式的不同,可将低聚的海藻多酚分为6种类型^[43,46]:间苯三酚以芳基相互联接,称为 Fucols;间苯三酚以二芳基醚键联接,称为 Phlorethols;同时含有芳基键和二芳基醚键,称为 Fucophlorethols;间苯三酚的连接方式类似于 Phlorethols,但其组成结构以间苯三酚单元数量为多,且其单体中含有邻羟基化合物,称为 Fuhalols;多酚结构复杂、聚合度高、生物活性强,在由3个以上间苯三酚的脱水寡聚物中,其中两个单酚可以进一步杂化形成二苯杂二氧,或者芳基化联接后脱水形成二苯呋喃型化合物,称为 Eckols,此外, Eckols 还能聚合成 Dieckols 或 Bieckols 等;卤代、烷基化、硫酸酯化多酚型,称为 Halogenated phlorotannins。一般认为,寡聚的间苯三酚还可进一步聚合形成更高分子量的聚合多酚,但红外、紫外及核磁等现有结构分析方法均未获得明确的结构信息。故对于高分子质量的海藻多酚结构分析仍需要更深入地研究。

3.2 海藻多酚结构及其生物活性作用机制

3.2.1 抗氧化活性研究 机体中过多的活性氧自由基对人体正常细胞、组织和生物活性物质有较强的破坏能力,因此,清除机体内多余的自由基有助于提高机体免疫力。羟基的还原性是酚类化合物的共性之一,以间苯三酚为单体的海藻多酚分子中的多个酚羟基,既可作为氢的供体,又可与空气中的氧气反应离解出 H^+ ,参与氧化过程中产生的过氧化物自由基、羟基自由基反应,形成稳定的羧酸或水,切断氧化链式反应,抑制和延缓氧化^[47]。另外,海藻多酚分子中含有包括连苯三羟基在内的大量羟基,这些羟基基团能够与金属离子反应,形成稳定的络合物,减少金属离子对氧化反应的催化作用^[10]。陈景明等^[48]对东南沿海常见的10种海藻抗氧化活性监测发现,铁钉菜 *Ishige okamurae* Yendo 甲醇提取物具有较高含量的多酚、总抗氧化能力 (TEAC),以及较强的二苯代苦味酰基自由基 (DPPH) 清除能力,特别是其乙酸乙酯萃取物 DPPH 自由基清除的半效应浓度 EC_{50} 仅为 0.17 mg/mL,优于二丁基羟基甲苯 (BHT) 的清除能力。杨小青等^[49]的研究表明:羊栖菜多酚的抗氧化活性会根据分子质量大小和溶剂的不同表现出显

著性差异;其中采用乙酸乙酯萃取、相对分子质量大于 30 000 的多酚组分总抗氧化能力最好;分离的各组分中,对 DPPH 自由基、羟自由基的 IC_{50} 最低,分别为 10.10、9.04 mg/L,在 40 mg/L 浓度下对超氧阴离子自由基清除率最高,为 18.60%。此外,国外学界对于海藻多酚的抗氧化活性研究,也取得了积极进展。Fujii 等^[50]对爱森藻 *Eisenia bicyclis* 多酚及其衍生物抗氧化能力指数 (ORAC) 的检测发现,其抗氧化能力相较茶多酚、L-抗坏血酸等常用抗氧化剂更高,且此抗氧化能力随多酚分子质量的增加而增加。Vijayabaskar 等^[51]研究表明,喇叭藻 *Turbinaria ornata* 多酚对 DPPH 自由基、超氧化物阴离子和羟自由基具有较强的清除能力;酚类化合物的薄层色谱和红外光谱分析表明,其强抗氧化活性是由于藻体高含量多酚 (43.72 mg GAE/g) 的作用。

3.2.2 抑菌活性研究 许多海藻提取物具有抗菌活性,且与卤代酚类物质密切相关,特别是溴代酚。此外,海藻多酚中的酚羟基可促进多酚通过细胞膜,增强多酚对细菌细胞膜结构和功能的干扰,破坏细胞膜完整性,发挥抗菌作用^[52];Rajauria 等^[53]使用不同浓度的伸长海条藻 *Himanthalia elongata* 多酚,并基于多酚对李斯特菌 *Listeria monocytogenes*、乳酸菌 *Lactobacillus reuteri*、绿脓杆菌 *Pseudomonas aeruginosa*、沙门氏菌 *Salmonella enterica* 作用后产生的抑菌圈大小评价其抑菌能力,结果显示,60%的甲醇提取物展现出最强的抑菌活性,总体效果优于美国食品及药品管理局建议的苯甲酸钠和亚硝酸钠。Sandsdalen 等^[52]、Lee 等^[54]分别用墨角藻 *Fucus vesiculosus*、腔昆布多酚对痤疮丙酸杆菌 *Propionibacterium acnes* 的抑制试验证实,褐藻多酚不仅自身具有良好的抗菌功效,还可以与红霉素或林可霉素复配应用,显著增加红霉素或林可霉素的抗菌效果,而这种杀菌机制主要通过裂解细菌的细胞壁来实现。

3.2.3 抗病毒活性研究 对海藻多酚结构与抗病毒关系研究发现,对于缩合的海藻多酚,其抗病毒活性取决于聚合度;对于水解多酚则取决于其分子中醚基数目,与多酚中的多元醇无明显效应关系^[20];而多酚经过酶解处理后,可使海藻多酚活性减弱,证明多酚对病毒的抑制与其结构收敛性密切相关。在海藻多酚抗病毒活性研究中, Eckols 类多酚是最主要的活性成分,也是目前抗病毒药物研发的热点方向。Ahn 等^[55]的一项最新研究结果表明, Eckol 类化合物对 HIV-1 逆转录酶和蛋白酶的

活性有抑制作用, 其中 8, 8'-bieckol 的抑制效果最好 ($IC_{50}=0.51$ mmol/L), 疗效与 HIV 感染治疗药物奈维拉平 ($IC_{50}=0.28$ mmol/L) 相当。此外, 在对抗病毒药物的筛选研究发现, Eckol 类褐藻多酚对疱疹病毒、杆状 DNA 病毒、冠状病毒等病毒表现出良好的抑制作用^[56]。

3.2.4 抗肿瘤活性研究 传统抗肿瘤制剂的疗效偏低、副作用显著、价格昂贵, 这均为海洋抗癌药物的研究提供了空间。海藻多酚主要是通过两方面发挥抗肿瘤作用: 其一是由于海藻多酚自身的多羟基结构, 可高效地清除机体内的氧自由基, 使机体内源性的抗氧化酶活性增加, 发挥抑制肿瘤细胞生长的作用^[57]; 其二是多酚的间苯三酚结构可以通过直接细胞毒作用或通过发挥阻滞作用影响细胞周期。Namvar 等^[58]探索了海黍子多酚对乳腺癌细胞的抑制作用, 试验证明, 海黍子多酚对细胞 MCF-7 和 MDA-MB-231 具有较好的抑制效果, 其 IC_{50} 值分别为 0.022、0.055 mg/mL; 进一步地研究表明, 海藻多酚的肿瘤抑制作用与其添加剂量呈现剂量效应关系, 且海藻多酚的这种抗肿瘤机制是通过抗肿瘤血管形成实现的。而 Aravindan 等^[59]在叶囊藻 *Hormophysa triquerta* 多酚抗肿瘤机制研究中指出, 胰腺癌细胞的复制是多种传导信号共同作用的结果, 海藻多酚可通过干扰正常信号传导, 起到抑制肿瘤细胞的作用。

3.2.5 抗过敏及抗炎活性研究 据国内外流行病学调查显示, 22% 的儿童和 35% 的成人均曾受过不同程度的过敏性及炎症疾病的困扰, 因此, 从食品原料中开发新的抗过敏、抗炎症活性成分, 已成为当前治疗过敏性及炎症疾病研究的热点。Chen 等^[60]通过检验 5 种海藻多酚的透明质酸酶抑制活性来评价其抗过敏活性, 其中, 萱藻 *Scytosiphon lomentarius* 多酚活性最高 ($IC_{50}=0.67$ mg/mL), 高于典型的抗过敏药物二钠色甘 (DSCG), 此外, 海藻多酚在炎症治疗中也能发挥积极作用。Kang 等^[61]对二鹅掌菜酚进行了一系列探索后得出, 其可以通过抑制炎症反应的信号转导因子干扰素 γ 的产生和 STAT1 细胞核的转录与翻译, 起到较强的抗炎作用。Corona 等^[62]研究发现, 大分子质量的泡叶藻 *Ascophyllum nodosum* 多酚经人体消化道后被分解成 3 种小分子质量的多酚, 可引起机体内抗炎症的标志性物质细胞因子白细胞介素-8 (IL-8) 的增加, 刺激机体产生抗炎反应。

3.2.6 抗凝血及降血脂活性研究 海藻多酚一些生物学活性与其自身的分子质量密切相关, 在一定

的分子质量分布范围内, 分子质量越大, 活性越强^[47,50,63]。魏玉西等^[64]使用高分子质量的鼠尾藻多酚进行抗血凝活性研究证明, 海藻多酚可同时干扰内源性、外源性凝血因子的活性, 有显著的抗凝血活性; 动物试验则表明, 多酚可显著减少兔洗涤血小板内钙释放及外钙内流, 他推断鼠尾藻多酚的抗凝血活性机制可能与其降低血小板内钙离子浓度密切相关。Jung 等^[65]通过分析 5 种不同结构的褐藻多酚的降血脂机制发现, 5 种多酚均能不同程度地降低脂肪细胞标记基因的表达, 进而抑制脂肪细胞分化以及脂质形成和积累, 同时证明, 海藻多酚的分子量是影响其抑制脂肪细胞分化和调节脂肪细胞标记基因表达水平的重要因素。

3.2.7 抗糖尿病活性研究 糖尿病主要分为两种类型, 分别为 I 型和 II 型。虽然胰岛素能够有效控制 I 型糖尿病, 但 II 型糖尿病属于非胰岛素依赖型, 到目前为止还无有效的药物治疗手段。Nwosu 等^[66]和 Apostolidis 等^[67]在各自的研究中指出, 泡叶藻中含有丰富的多酚类化合物 (4.5 mg/g 湿质量), 其具有良好的 α -淀粉酶抑制效果 ($IC_{50}\approx 0.11$ g GAE/mL) 和 α -葡萄糖苷酶抑制效果 ($IC_{50}\approx 201$ g GAE/mL), 是一种潜在的抗糖尿病天然药物。Habtariam 等^[68]研究发现, 泡叶藻多酚在机体新陈代谢过程中能够调节关键信号转导, 调控葡萄糖转运和酶的活性, 以及受体的竞争和拮抗作用, 实现对生命体血糖平衡的调节, 可以应用于糖尿病患者的治疗。

研究海藻多酚的结构与生物活性关系, 对人类身体健康和保证良好的生活质量具有重要的意义。近年来, 随着对海藻多酚研究的不断深入, 一些研究发现, 多酚还具有抗神经衰退^[69]、抗抑郁^[63]、抗哮喘^[70]、预防肝损伤^[71]、抗紫外辐射^[72]等生物活性。

4 海藻多酚在食品工业及日用化工中的应用

海藻多酚常被用作抵御植食动物觅食, 具有阻食及毒害两方面的作用^[73]。这是因为海藻多酚的涩性可以降低植食动物的捕食欲, 且多酚自身独特的多羟基结构可以与消化酶结合降低动物的消化能力^[74]。而海藻多酚中的羟基群结构和鞣质类的单体结构对甲硫醇表现出明显的除臭活性, 是一种高效的天然除臭剂^[75]。除此之外, 海藻多酚的一些新型应用也正逐渐被挖掘。

4.1 海藻多酚在食品工业中的应用

海藻生物活性物质的抗氧化活性应用研究,一直以来均为食品领域研究的热点,利用海藻多酚进行肉制品和油脂防腐保鲜时可同时起到抗氧化和护色功效^[76]。孟彤^[77]专门研究了海带多酚提取物对乳化肠的品质(颜色、质构、感官指标、气味滋味)的影响,结果显示,处理后的产品总体可接受度高,且能有效抑制乳化肠的脂质过氧化值(TBARS)的升高,降低羰基的含量和巯基的损失,以及抑制蛋白质的氧化。亓明秀^[78]在油脂的抗氧化作用研究中发现,低剂量的海藻多酚(0.02%)就能表现出明显优于维生素E的抗氧化活性,但略低于叔丁基对苯二酚(THBQ)的油脂抗氧化能力;同时研究也指出,半胱氨酸盐能有效抑制多酚褐变,保证食用油色泽正常,若将0.02%的海藻多酚和半胱氨酸盐混合添加,既能延长油脂保存期,又能保持色泽正常,其安全性远高于化学合成物质。

随着水产品需求的增加及对其新鲜度要求的提升,在运输过程中的防腐保鲜问题越发受到关注。党法斌等^[79]采用平板生长抑制法检验角叉菜、海蒿子和鼠尾藻多酚对多种海洋弧菌的抑菌效果,试验结果表明,不同来源海藻多酚对受试海洋弧菌均具有显著性的抑制作用($P < 0.05$),且随着多酚浓度的增加,抑菌能力逐渐增强;王亮等^[80]以细菌群体感应抑制活性为指标,选取海带多酚对南美白对虾 *Penaeus vannamei* 进行保鲜处理,结果表明,海带多酚可有效抑制微生物的生长和挥发性盐基氮(TVB-N)的增加,保持水产品pH值稳定和良好的感官质量,且相较于不处理组,喷洒海带多酚可延长南美白对虾货架期48 h以上;曾惠^[81]则以细菌群体感应抑制活性为指标,选取石莼 *Ulva lactuca* L.、马尾藻 *Sargassum* C. 和裙带菜3种海藻多酚对大菱鲆 *Scophthalmus maximus* 进行保鲜处理,试验证明,0.5 mg/mL的3种海藻多酚就可不同程度地延缓大菱鲆的品质变化,并指出海藻多酚是一种发展潜力巨大的水产品保鲜剂。

海藻多酚还可应用于果蔬等食品的保鲜,但目前这方面的研究相对较少。李会丽等^[82]研究了鼠尾藻海藻多酚处理对采后草莓 *Fragaria ananassa* Duch. 腐烂的控制与贮藏品质的影响,发现海藻多酚不但具有直接抗菌活性,控制草莓的采后腐烂,而且能诱导草莓的采后抗病性,提高抗病的相关酶活性,保持草莓品质;而刘尊英等^[83]的研究指出,

鼠尾藻多酚有较强的抗果蔬病原菌活性,体外抑菌试验结果显示,在浓度分别为16、12 mg/mL时,其能有效抑制灰葡萄孢菌 *Botrytis cinerea* 和扩展青霉菌 *Penicillium expansum* 的正常生长,进一步对草莓致病的研究结果表明,经鼠尾藻多酚处理后的草莓,其灰葡萄孢菌和扩展青霉菌病斑直径相较于对照组分别降低了28.4%和47.6%。

4.2 海藻多酚在日用化妆品中的应用

海藻多酚应用于新型功能性化妆品,是多酚应用开发研究的新方向。Nayoung等^[84]的研究发现,腔昆布中的多酚类化合物不仅具有抗氧化作用,还能起到美白功效,而这种美白作用主要是通过多酚对酪氨酸酶活性抑制调控黑色素生成实现的。后续试验则表明,腔昆布提取的多种多酚中双鹅掌菜酚能显著抑制酪氨酸酶活性,防止黑色素的形成和累积。基质金属蛋白酶(MMP-1)、转录因子(NF- κ B)和转录激活因子(AP-1)主要参与细胞外基质的代谢,其过量表达可引起间质胶原(I、II、III型胶原)降解和多种蛋白质的水解。Sugiura等^[85]研究发现,从鹅掌菜 *Eisenia arborea* 中提取的多酚组分能够有效抑制MMP-1、NF- κ B和AP-1的表达水平,且当皮肤受到紫外线直接照射时,多酚因其具有的紫外线吸收能力,可以减少机体中胶原蛋白的损失进而抑制面部皱纹的产生。此外,有研究指出,腔昆布多酚也具有光保护作用,可吸收紫外线,保护HaCaT细胞免受紫外辐射,避免辐射引起的细胞损伤和光氧化胁迫^[86]。

5 前景展望

海藻多酚作为一类储量丰富、可再生的绿色资源,必将成为人类可以利用的重要的海洋资源宝库。在加快发展海洋产业的二十一世纪,为达到对海藻多酚的定向利用,需要对海藻多酚现有的提取、分离、纯化工艺做出较大地改进和整合,找到适合商业化应用的提取分离方法,实现有选择、有目的地利用多酚类化合物。目前,对海藻多酚的研究多集中在生物活性探索,对其功能性结构、活性作用机制、产品应用开发尚处于初级阶段,还有待进一步地研究。此外,如何在不破坏多酚生理活性的前提下,对其结构进行化学性修饰或通过有机途径大量合成,改进其稳定性和适应性,拓展其在工业、农业、食品安全、医疗保健和日用化工中的应用,还需广大科研工作者继续探索。

参考文献:

- [1] Thangaraj S, Bragadeeswaran S, Srikumaran N. *In vitro* antimicrobial and antioxidant activities of seaweeds from hare island, Tuticorin coast of India[J]. Chinese Journal of Integrative Medicine, 2013, doi:10.1007/s11655-013-1548-x.
- [2] Gupta S, Abu-Ghannam N. Bioactive potential and possible health effects of edible brown seaweeds[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, 22(6):315-326.
- [3] 张海霞, 汪秋宽, 何云海, 等. 马尾藻褐藻多糖硫酸酯的分离纯化及结构研究[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(5):559-562.
- [4] 任丹丹, 李景娟, 李佰磊, 等. 海带岩藻黄素对油脂氧化的抑制作用研究[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(6):564-566.
- [5] 付慧, 汪秋宽, 何云海, 等. 多肋藻渣膳食纤维对小鼠降血脂作用的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(3):200-204.
- [6] Ank G, Gama B A P D, Pereira R C. Polyphenols from *Styopodium zonale* (Phaeophyceae): intrapopulation variation, induction by simulated herbivory, and epibiosis effects[J]. Aquatic Botany, 2013, 111:125-129.
- [7] Balboa E M, Conde E, Moure A, et al. *In vitro* antioxidant properties of crude extracts and compounds from brown algae[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3):1764-1785.
- [8] Do Q D, Angkawijaya A E, Tran-Nguyen P L, et al. Effect of extraction solvent on total phenol content, total flavonoid content, and antioxidant activity of *Limnophila aromatica* [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2014, 22(3):296-302.
- [9] Zlotek U, Mikulska S, Nagajek M, et al. The effect of different solvents and number of extraction steps on the polyphenol content and antioxidant capacity of basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) extracts[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2016, 23(5):628-633.
- [10] 甘育鸿, 张子敬, 吕应年, 等. 海发菜中总多酚提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 广东医学院学报, 2016, 34(2):113-116, 120.
- [11] Wang T, Jónsdóttir R, Ólafsdóttir G. Total phenolic compounds, radical scavenging and metal chelation of extracts from Icelandic seaweeds[J]. Food Chemistry, 2009, 116(1):240-248.
- [12] Matanjun P, Mohamed S, Mustapha N M, et al. Antioxidant activities and phenolics content of eight species of seaweeds from north Borneo[J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(4):367-373.
- [13] Kadam S U, Tiwari B K, Smyth T J, et al. Optimization of ultrasound assisted extraction of bioactive components from brown seaweed *Ascophyllum nodosum* using response surface methodology [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 23:308-316.
- [14] Wang Z, Bi Y G, Chen X W, et al. Extraction of total polyphenols kelp optimization test [J]. Advances in Engineering Research, 2015, 33:125-128.
- [15] 杨会成, 郑斌, 郝云彬, 等. 具有抑菌活性的海藻多酚联合提取工艺优化研究[J]. 浙江海洋学院学报:自然科学版, 2014, 33(2):147-153.
- [16] Rodríguez-Jasso R M, Mussatto S I, Pastrana L, et al. Microwave-assisted extraction of sulfated polysaccharides (fucoïdan) from brown seaweed[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(3):1137-1144.
- [17] 劳敏军, 王阳光. 海带多酚提取工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(9):93-96.
- [18] 欧阳小琨, 郭红焯, 杨立业, 等. 微波辅助提取鼠尾藻多酚及抗氧化活性研究[J]. 中国民族民间医药, 2010, 19(15):19-21.
- [19] 钟明杰, 王阳光. 微波辅助提取紫菜多酚及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2010, 35(10):204-207.
- [20] 白蕾. 海带多酚的分离提取及其抗肿瘤活性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
- [21] Michalak I, Górka B, Wiczorek P P, et al. Supercritical fluid extraction of algae enhances levels of biologically active compounds promoting plant growth[J]. European Journal of Phycology, 2016, 51(3):1-10.
- [22] Aizpurua-Olaizola O, Ormazabal M, Vallejo A, et al. Optimization of supercritical fluid consecutive extractions of fatty acids and polyphenols from *Vitis vinifera* grape wastes[J]. Journal of Food Science, 2015, 80(1):E101-E107.
- [23] Klejduš B, Kopecký J, Benešová L, et al. Solid-phase/supercritical-fluid extraction for liquid chromatography of phenolic compounds in freshwater microalgae and selected cyanobacterial species[J]. Journal of Chromatography A, 2009, 1216(5):763-771.
- [24] Roh M K, Uddin M S, Chun B S. Extraction of fucoxanthin and polyphenol from *Undaria pinnatifida* using supercritical carbon dioxide with co-solvent[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 13(6):724-729.
- [25] Qiu T Q, Ding C M, Hu A J, et al. Analyses of factors affecting the ultrasonically-enhanced supercritical fluid extraction of EPA and DHA from algae[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2004, 32(4):43-47.
- [26] 易灵红. 离子沉淀法提取绿茶中的茶多酚[J]. 化工技术与开发, 2013, 42(3):18-20.
- [27] 欧阳玉祝, 李雪峰, 姚懿桓. 离子沉淀法分离八月瓜果皮中的总多酚[J]. 食品科学, 2014, 35(16):76-79.
- [28] Ran J J, Fan M T, Li Y H, et al. Optimisation of ultrasonic-assisted extraction of polyphenols from apple peel employing cellulase enzymolysis[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(5):910-917.
- [29] Boussetta N, Vorobiev E, Le L H, et al. Application of electrical treatments in alcoholic solvent for polyphenols extraction from grape seeds[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 46(1):127-134.
- [30] Sarmiento L A V, Machado R A F, Petrus J C C, et al. Extraction of polyphenols from cocoa seeds and concentration through polymeric membranes[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2008, 45(1):64-69.
- [31] Bian Y Y, Guo J, Zhu K X, et al. Macroporous adsorbent resin-based wheat bran polyphenol extracts inhibition effects on H₂O₂-induced oxidative damage in HEK293 cells[J]. RSC Advances, 2015, 5(27):20931-20938.
- [32] Kim J, Yoon M, Yang H, et al. Enrichment and purification of marine polyphenol phlorotannins using macroporous adsorption resins[J]. Food Chemistry, 2014, 162:135-142.
- [33] 吕成林, 汪秋宽, 宋悦凡, 等. 羊栖菜多酚的提取及纯化工艺研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(22):231-235, 240.

- [34] Conidi C, Rodriguez-Lopez A D, Garcia-Castello E M, et al. Purification of artichoke polyphenols by using membrane filtration and polymeric resins[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 144: 153-161.
- [35] Giacobbo A, Prado J M D, Meneguzzi A, et al. Microfiltration for the recovery of polyphenols from winery effluents[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 143: 12-18.
- [36] Haider S, Li Z X, Lin H, et al. Optimization of preparative separation and purification of total polyphenols from *Sargassum tenerrimum* by column chromatography[J]. Journal of Ocean University of China, 2009, 8(4): 425-430.
- [37] 曲词. 海黍子多酚的提取分离及其生物活性研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016.
- [38] Tierney M S, Soler-Vila A, Rai D K, et al. UPLC-MS profiling of low molecular weight phlorotannin polymers in *Ascophyllum nodosum*, *Pelvetia canaliculata* and *Fucus spiralis*[J]. Metabolomics, 2014, doi: 10.1007/s11306-013-0584-z.
- [39] López A, Rico M, Rivero A, et al. The effects of solvents on the phenolic contents and antioxidant activity of *Stypocaulon scoparium* algae extracts[J]. Food Chemistry, 2011, 125(3): 1104-1109.
- [40] Steevens A J, Mackinnon S L, Hankinson R, et al. Profiling phlorotannins in brown macroalgae by liquid chromatography-high resolution mass spectrometry[J]. Phytochemical Analysis, 2012, 23(5): 547-553.
- [41] Chen X F, Huang X Y, Wang G H, et al. Effect of ionic liquid on separation and purification of tea polyphenols using counter current chromatography[J]. Asian Journal of Chemistry, 2014, 26(8): 2271-2276.
- [42] Cui H Y, Jia X Y, Zhang X, et al. Optimization of high-speed counter-current chromatography for separation of polyphenols from the extract of hawthorn (*Crataegus laevigata*) with response surface methodology[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 77(2): 269-274.
- [43] 纪明侯. 海藻化学[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 628-653.
- [44] Watson R R, Preedy V R, Zibadi S. Polyphenols in Human Health and Disease[M]. London: Elsevier, 2014: 757-778.
- [45] Heffernan N. Extraction, characterization and seasonal variation of bioactive compounds (polyphenols, carotenoids and polysaccharides) from Irish origin macroalgae with potential for inclusion in functional food products[D]. Limerick: University of Limerick, 2015.
- [46] 许亚如. 褐藻多酚的抗氧化活性研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- [47] 范晓, 严小军, 房国明, 等. 高分子量褐藻多酚抗氧化性质研究[J]. 水生生物学报, 1999, 23(5): 494-499.
- [48] 陈景明, 黄晓冬, 蔡建秀, 等. 海藻铁钉菜抗氧化活性部位研究[J]. 闽南师范大学学报: 自然科学版, 2016, 29(2): 73-79.
- [49] 杨小青, 卢虹玉, 李延平, 等. 羊栖菜不同分子量褐藻多酚抗氧化活性研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(4): 47-51.
- [50] Fujii Y, Tanaka R, Miyake H, et al. Evaluation for antioxidative properties of phlorotannins isolated from the brown alga *Eisenia bicyclis*, by the H-ORAC method[J]. Food and Nutrition Sciences, 2013, 4(8A): 78-82.
- [51] Vijayabaskar P, Shiyamala V. Antioxidant properties of seaweed polyphenol from *Turbinaria ornata* (Turner) J. Agardh, 1848[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2012, 2(S1): S90-S98.
- [52] Sandsdalen E, Haug T, Stensvåg K, et al. The antibacterial effect of a polyhydroxylated fucophlorethol from the marine brown alga, *Fucus vesiculosus*[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2003, 19(8): 777-782.
- [53] Rajauria G, Jaiswal A K, Abu-Gannam N, et al. Antimicrobial, antioxidant and free radical-scavenging capacity of brown seaweed *Himantalia elongata* from western coast of Ireland[J]. Journal of Food Biochemistry, 2013, 37(3): 322-335.
- [54] Lee J H, Eom S H, Lee E H, et al. In vitro antibacterial and synergistic effect of phlorotannins isolated from edible brown seaweed *Eisenia bicyclis* against acne-related bacteria[J]. ALGAE, 2014, 29(1): 47-55.
- [55] Ahn M J, Yoon K D, Min S Y, et al. Inhibition of HIV-1 reverse transcriptase and protease by phlorotannins from the brown alga *Ecklonia cava*[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2004, 27(4): 544-547.
- [56] 秦绪龙, 万升标, 江涛. Eckol 类褐藻多酚的研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2007(S1): 176-181.
- [57] Katayama K, Masuyama K, Yoshioka S, et al. Flavonoids inhibit breast cancer resistance protein-mediated drug resistance: transporter specificity and structure-activity relationship[J]. Cancer Chemotherapy and Pharmacology, 2007, 60(6): 789-797.
- [58] Namvar F, Mohamad R, Baharara J, et al. Antioxidant, antiproliferative, and antiangiogenesis effects of polyphenol-rich seaweed (*Sargassum muticum*) [J]. Bio Med Research International, 2013, 2013: 604787.
- [59] Aravindan S, Ramraj S K, Somasundaram S T, et al. Polyphenols from marine brown algae target radiotherapy-coordinated EMT and stemness-maintenance in residual pancreatic cancer[J]. Stem Cell Research & Therapy, 2015, 6: 182.
- [60] Chen Y, Lin H, Li Z X, et al. The anti-allergic activity of polyphenol extracted from five marine algae[J]. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(4): 681-684.
- [61] Kang N J, Koo D H, Kang G J, et al. Dieckol, a component of *Ecklonia cava*, suppresses the production of MDC/CCL22 via down-regulating STAT1 pathway in interferon- γ stimulated HaCaT human keratinocytes[J]. Biomolecules & Therapeutics, 2015, 23(3): 238-244.
- [62] Corona G, Ji Y, Aneghoonlap P, et al. Gastrointestinal modifications and bioavailability of brown seaweed phlorotannins and effects on inflammatory markers[J]. The British Journal of Nutrition, 2016, 115(7): 1240-1253.
- [63] 顾丽霞, 潘成燕, 赵水莲, 等. 海藻羊栖菜不同分子量多酚抗抑郁活性研究[J]. 时珍国医国药, 2015, 26(2): 272-274.
- [64] 魏玉西, 王长云, 李敬, 等. 高相对分子量鼠尾藻多酚的抗凝血活性及对血小板内钙水平的影响[J]. 中国药科大学学报, 2008, 39(3): 257-261.
- [65] Jung H A, Jung H J, Jeong H Y, et al. Phlorotannins isolated from the edible brown alga *Ecklonia stolonifera* exert anti-adipogenic

- activity on 3T3-L1 adipocytes by downregulating C/EBP α and PPAR γ [J]. *Fitoterapia*,2014,92:260-269.
- [66] Nwosu F, Morris J, Lund V A, et al. Anti-proliferative and potential anti-diabetic effects of phenolic-rich extracts from edible marine algae[J]. *Food Chemistry*,2011,126(3):1006-1012.
- [67] Apostolidis E, Lee C M. *In vitro* potential of *Ascophyllum nodosum* phenolic antioxidant-mediated α -glucosidase and α -amylase inhibition[J]. *Journal of Food Science*,2010,75(3):H97-H102.
- [68] Habtemariam S, Varghese G K. The antidiabetic therapeutic potential of dietary polyphenols[J]. *Current Pharmaceutical Biotechnology*,2014,15(4):391-400.
- [69] Barbosa M, Valentão P, Andrade P B. Bioactive compounds from macroalgae in the new millennium; implications for neurodegenerative diseases[J]. *Marine Drugs*,2014,12(9):4934-4972.
- [70] Jung W K, Choi I, Oh S, et al. Anti-asthmatic effect of marine red alga (*Laurencia undulata*) polyphenolic extracts in a murine model of asthma[J]. *Food and Chemical Toxicology*,2009,47(2):293-297.
- [71] Kepeççi R A, Polat S, Çelik A, et al. Protective effect of *Spirulina platensis* enriched in phenolic compounds against hepatotoxicity induced by CCl₄[J]. *Food Chemistry*,2013,141(3):1972-1979.
- [72] Guinea M, Franco V, Araujo-Bazán L, et al. In vivo UVB-photoprotective activity of extracts from commercial marine macroalgae[J]. *Food and Chemical Toxicology*,2012,50(3-4):1109-1117.
- [73] 杨会成. 海带 (*Laminaria japonica* Aresch) 多酚的提取、分离及其抗肿瘤、抗菌活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学,2008.
- [74] Lüder U H, Clayton M N. Induction of phlorotannins in the brown macroalga *Ecklonia radiata* (Laminariales, Phaeophyta) in response to simulated herbivory—the first microscopic study[J]. *Planta*,2004,218(6):928-937.
- [75] Kita N, Fujimoto K, Nakajima I, et al. Screening test for deodorizing substances from marine algae and identification of phlorotannins as the effective ingredients in *Eisenia bicyclis*[J]. *Journal of Applied Phycology*,1990,2(2):155-162.
- [76] Andrade P B, Barbosa M, Matos R P, et al. Valuable compounds in macroalgae extracts[J]. *Food Chemistry*,2013,138(2-3):1819-1828.
- [77] 孟彤. 海带多酚提取物对猪肉乳化肠品质及氧化稳定性的影响[D]. 上海: 上海海洋大学,2015.
- [78] 元明秀. 海藻多酚与半胱氨酸盐混合物对油脂延长保存期及护色研究[J]. *中国保健营养*,2013,23(4):530-531.
- [79] 范法斌, 王伟, 陈赓超, 等. 几种海藻多酚对鱼类致病菌的抑菌性研究[J]. *水产科学*,2012,31(8):499-501.
- [80] 王亮, 曾名湧, 董士远, 等. 海带多酚制备及其对南美白对虾保鲜效果的研究[J]. *食品工业科技*,2009,30(10):187-191.
- [81] 曾惠. 海藻多酚 QSI 对大菱鲜腐败变质调控的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学,2012.
- [82] 李会丽, 黄文芊, 刘尊英. 海藻多酚处理对采后草莓腐烂与贮藏品质的影响[J]. *农产品加工·学刊*,2012(11):61-64,87.
- [83] 刘尊英, 毕爱强, 王晓梅, 等. 鼠尾藻多酚提取纯化及其抗果蔬病原菌活性研究[J]. *食品科技*,2007,32(10):103-105.
- [84] Nayoung Y, Taekil E, Moonmoo K, et al. Inhibitory effect of phlorotannins isolated from *Ecklonia cava* on mushroom tyrosinase activity and melanin formation in mouse B16F10 melanoma cells[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*,2009,57(10):4124-4129.
- [85] Sugiura Y, Matsuda K, Yamada Y, et al. Radical scavenging and hyaluronidase inhibitory activities of phlorotannins from the edible brown alga *Eisenia arborea*[J]. *Food Science and Technology Research*,2008,14(6):595-598.
- [86] Heo S J, Ko S C, Cha S H, et al. Effect of phlorotannins isolated from *Ecklonia cava* on melanogenesis and their protective effect against photo-oxidative stress induced by UV-B radiation[J]. *Toxicology in Vitro*,2009,23(6):1123-1130.

A review of mechanism and application of alga polyphenols

PENG Yong-bo¹, LUO Xuan¹, WANG Qiu-kuan^{1,2,3}, SONG Yue-fan¹, REN Dan-dan^{1,2,3}, CONG Hai-hua¹

(1. College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. Branch Center of National Research & Development For Seaweed Processing, Dalian 116023, China; 3. Key Laboratory of Fishery Product Processing and Utilization of Liaoning Province, Dalian 116023, China)

Abstract: Alga polyphenols, as secondary metabolites of algae, protect algae against herbivorous animal interference, and have a variety of biological activities, becoming a hot research direction of marine bioactive substances. The development of extraction methods and purification techniques are overviewed, and the mechanism of bioactivities of alga polyphenols are described including antioxidation, antibacterial, antiviral, antitumor, anti allergic, anti inflammatory, anticoagulation, glucose homeostasis and other biological activities. The relationships between chemical structure and biological activity and the application status of polyphenols are presented simultaneously. Therefore, alga polyphenols has sustainable utilizing value. The further research is needed on the functional structures, mechanism of biological activity, and application of alga polyphenols to develop great potential of alga polyphenols in industrial and agricultural production.

Key words: alga polyphenol; extractive method; purification technique; chemical structure; biological activity