

# 羊栖菜主要组分及其分离纯化方法研究进展

郑维睿, 徐一贝, 饶虞彤, 陈宇, 陈慧慧, 杨进利\*, 李青青\*

杭州医学院药学院、食品科学与工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年4月7日; 录用日期: 2025年5月8日; 发布日期: 2025年5月16日

## 摘要

羊栖菜富含多种营养素与活性物质, 是我国重要的经济海藻。本文对其所含的主要组分如羊栖菜多糖、氨基酸、矿物质、微量元素及有害物质等的分离纯化方法的研究进展进行了综述。羊栖菜含褐藻糖胶、硫酸多糖及必需氨基酸等活性成分, 具有抗肿瘤和免疫调节功能, 其中微波辅助萃取法多糖提取率达18.82%。通过EDTA-2Na-超声联合技术可有效去除重金属污染, 为羊栖菜资源的进一步开发和安全利用奠定了基础。

## 关键词

羊栖菜, 多糖, 氨基酸, 有害物质, 分离纯化

# Research Progress on the Main Components and Separation and Purification Methods of *Sargassum fusiformes*

Weirui Zheng, Yibei Xu, Yutong Rao, Yu Chen, Huihui Chen, Jinli Yang\*, Qingqing Li\*

School of Pharmacy, School of Food Science and Engineering, Hangzhou Medical College, Hangzhou Zhejiang

Received: Apr. 7<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 8<sup>th</sup>, 2025; published: May 26<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

*Sargassum fusiforme* is rich in a variety of nutrients and active substances, and is an important economic seaweed in China. In this paper, the research progress of the isolation and purification methods of the main components such as polysaccharides, amino acids, minerals, trace elements and harmful substances contained in *Cephalopods* is reviewed. *Sargassum fusiforme* contains bioactive components such as fucoidan, sulfated polysaccharides, and essential amino acids, exhibiting anti-

\*通讯作者。

文章引用: 郑维睿, 徐一贝, 饶虞彤, 陈宇, 陈慧慧, 杨进利, 李青青. 羊栖菜主要组分及其分离纯化方法研究进展[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(3): 361-370. DOI: 10.12677/hjfn.2025.143041

tumor and immunomodulatory activities, with a microwave-assisted extraction achieving a polysaccharide yield of 18.82%. The study developed an EDTA-2Na-ultrasonic combined technology to effectively remove heavy metal contaminants. It lays the foundation for the further development and safe utilization of *Sargassum fusiforme* resources.

Keywords

*Sargassum fusiforme*, Polysaccharides, Amino Acids, Harmful Substances, Isolation and Purification

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

羊栖菜(学名: *Sargassum fusiforme*), 隶属于马尾藻科马尾藻属, 主要生长于温暖海域, 广泛分布于太平洋西北岸沿海的中下游潮间带区域[1]。在我国, 其分布范围涵盖山东、辽宁、浙江、福建、广东等多个省份[2]。羊栖菜在中、日、韩等国家拥有悠久的食用传统, 并且具备较高的药用价值。依据《本草纲目》的记载, 羊栖菜具备补血、降血压、通便以及软坚化痰等功效, 能够有效治疗高血压以及大肠癌、胃癌等病症[3]。在现代医学领域, 羊栖菜及其衍生提取物在医疗领域广泛应用, 常用于治疗子宫肌瘤、乳腺增生及甲状腺肿大等多种健康问题[4]。作为药食两用海洋生物资源的重要组成部分, 羊栖菜含有较多人体必需的营养物质及活性成分, 如氨基酸、微量元素、多酚类化合物、矿物质、脂肪酸、多糖等[5], 药用价值丰富, 展现出极为广阔的发展前景。

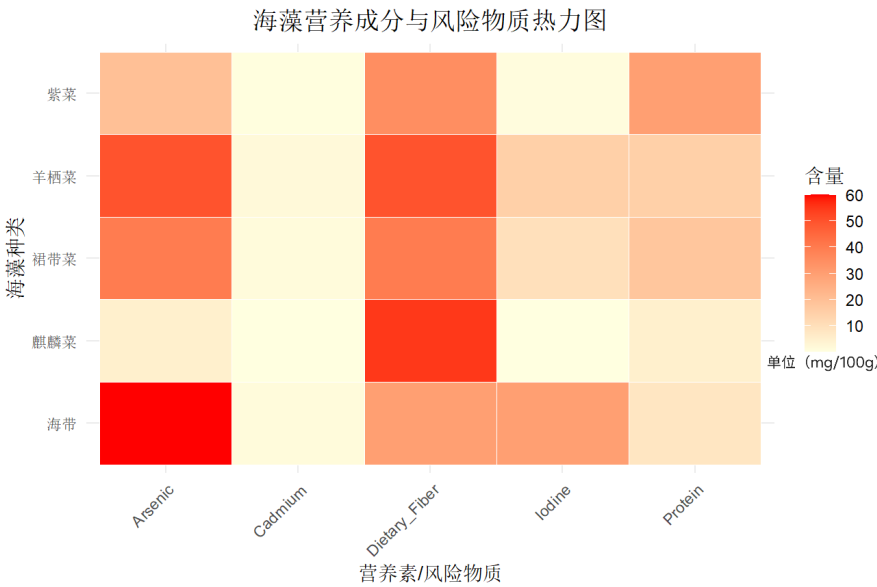


Figure 1. Heatmap of nutritional components and risk substances in seaweed  
图 1. 海藻营养成分与风险物质热力图

与其他常见食用海藻(海带[6]、紫菜[7]、裙带菜[8]、麒麟菜[9])相比, 羊栖菜展现出独特的营养特性。

见图 1, 其膳食纤维(40~55 g/100g)与褐藻活性物质(如岩藻黄质、岩藻多糖)含量显著高于多数海藻, 尤其在矿物质(如钙、铁)和碘(5~15 mg/100g)的富集能力上表现突出, 远超紫菜、麒麟菜, 但碘含量仍低于海带(10~30 mg/100g)。然而, 羊栖菜的重金属风险需警惕——总砷含量(10~50 mg/kg)显著高于紫菜和麒麟菜, 且无机砷占比高达 20%~50%, 长期过量食用可能带来健康隐患。将羊栖菜作为补充膳食纤维和矿物质的优质来源, 但需控制摄入量(每日干品  $\leq 5$  克), 烹饪前充分浸泡以降低砷和碘残留, 甲状腺疾病患者应谨慎食用。

## 2. 羊栖菜多糖

### 2.1. 羊栖菜多糖种类及功能

多糖(Polysaccharide), 是一种由至少 10 个的单糖组成的聚合糖高分子碳水化合物, 在自然界有着广泛分布, 可用于多种疾病的诊疗, 如抗肿瘤[10]、抗病毒[11]、降血脂[12]等, 这些特性吸引了中外众多学者对多糖的提取方法和功能展开深入研究, 使其成为生物学领域的一个重要研究热点。

羊栖菜多糖(*Sargassum fusiforme* polysaccharide, SFPS)是从羊栖菜中提取的一种具有水溶性的多糖, 主要由褐藻酸、岩藻聚糖硫酸酯及褐藻淀粉组成[13], 该物质在模型大鼠体内展现出显著的效应, 能够抑制血中胆固醇、甘油三酯及低密度脂蛋白胆固醇的上升, 并促进高密度脂蛋白胆固醇含量的提升。其主要组分有褐藻糖胶、硫酸多糖[14]等。

#### 2.1.1. 褐藻糖胶

褐藻多糖主要是从褐藻细胞壁中提取得到的硫酸盐多糖, 具有强保水能力、抗黑色素、抗氧化和抗衰老等功能活性。褐藻糖胶(*Sargassum fusiforme* fucoidan, SFF)存在于褐藻细胞壁基质中, 李涛[15]等使用 BrdU 和 CCK8 试剂盒确定了褐藻糖胶可通过上调 HaCaT 细胞分化标志物的基因表达, 进而促进 HaCaT 细胞的增殖、迁移和分化, 最终修复表皮屏障功能损伤。孙妍华[16]等通过高脂饮食和链脲佐菌素诱导 T2DM 大鼠模型, 再灌胃 SFF, 发现 SFF 可以显著改善大鼠的粪便菌群的整体结构, 从而明显改善大鼠空腹血糖、空腹胰岛素及血脂四项等指标, 改良 T2DM 大鼠的糖脂代谢, 对 II 型糖尿病有一定的治疗效果。另外, SFF 衍生的碳点作为血脑屏障的纳米穿透剂可以用于帕金森病的治疗[17]。综上, SFF 在如化妆品、食品、医药等多种领域都具有潜在的应用前景。

#### 2.1.2. 硫酸多糖

羊栖菜硫酸多糖(*Sargassum fusiforme* polysaccharide, SFPS)是从羊栖菜中提取的一种具有多种生物功能的硫酸多糖, 如抗氧化[18]、免疫增强[19]、抗肿瘤[20]。茹珂焯[18]等发现 SFPS III 可通过激活 PI3K/AKT/mTOR 通路发挥抗凋亡作用, 从而保护  $H_2O_2$  诱导的 MRC-5 细胞氧化应激损伤。人红白血病(Human erythro leukemia cells, HEL)细胞会因 SFPS II 诱导而凋亡, 肿瘤发生的机制之一被阻断, SFPS II 发挥抗肿瘤的性質。同时, SFPS II 能对大鼠阿司匹林诱发的胃溃疡有保护作用, 通过改变白细胞介素(IL-4、6、10、12)、肿瘤坏死因子  $\alpha$  (TNF- $\alpha$ )、干扰素  $\gamma$  (IFN- $\gamma$ )等细胞因子水平, 起到增强免疫的作用。刘温凯[14]等利用组合酶分解纯化 SFPS 得到四种组分, 分别命名为 SFP-1、SFP-2、SFP-3 和 SFP-4。进一步研究该组分的理化性质, 发现 SFP-4 由岩藻糖、半乳糖、葡萄糖醛酸等七种单糖组成, 具有多孔结构和硫酸酯基团的多糖在 500  $\mu$ g/mL 浓度下显著( $P < 0.01$ )降低斑马鱼脂质积累, 通过调控 mtp、pparg、fasn、pparab 和 acaca 基因表达, 表现出与辛伐他汀相似的降脂作用。另外, 在四种组分中, SFP-4 对牛磺胆酸钠的结合能力最好。多糖与胆汁酸结合形成复合物会降低胆汁酸的重吸收效率, 从而增加被肠道细菌代谢和排泄的机会, 而褐藻多糖能通过调节小鼠的胆汁排泄从而达到降血脂的作用[21], 所以 SFP-4 有潜在的降胆固醇的作用。

## 2.2. 羊栖菜多糖的提取

传统的羊栖菜多糖提取方法主要包括水提法、酸、碱提取法。热水提取法是最常用的方法之一，但存在耗时长、提取率低的缺点。酸、碱提取法则容易破坏多糖的活性结构，影响其功能特性。因此，研究者们开始探索更为高效、环保的提取方法，比如辅助水提法，循环超声提取法、微波辅助提取法、酶解法等，见表 1。这些新提取方法也各有优缺点，如：超声提取法能快速破坏细胞壁从而提高得率，但可能损伤多糖结构；微波辅助提取法效率高、能耗低，但需精准控制参数以免损伤活性成分；酶解法绿色环保且得率高，但成本较高。未来研究应聚焦于开发更高效、绿色的提取技术，如优化超声-微波协同提取法，同时深入探究多糖的结构与活性关系，为功能性食品和药物开发提供理论支持。

### 2.2.1. 水提法

水提法是提取羊栖菜多糖最主要的方法之一，其原理是利用热力作用使细胞破裂，多糖组分流入并溶于水中，加入适当的乙醇，使羊栖菜多糖在醇溶液中溶解度降低析出沉淀，从而实现分离[22]。其特点是操作简单，适用于工业化生产，但存在耗时、耗能和多糖得率较低的问题[23]。传统水提法的多糖得率约为 6.59% [24]。孔秋红[25]在传统方法的基础上略作修改，改用热水提取(H-SFP)多糖得率为 7.07%。

### 2.2.2. 酸碱提取法

酸碱提取法通过调节溶液的 pH 值，改变细胞壁和细胞膜的通透性，从而释放出多糖成分。然而酸、碱提取法容易破坏羊栖菜多糖的活性结构，从而导致多糖的生物活性降低。

酸提取法一般使用盐酸或三氯乙酸[22]。卞俊[26]等利用酸提醇沉法得到棕黑色粗羊栖菜多糖，粗多糖得率为 13%。碱提醇沉法可提取碱溶性多糖，提取剂一般使用氢氧化钠。碱提醇沉法所提取的提取物杂质较多，另外可能引起多糖降解。卞俊[26]等利用碱提醇沉法得到棕黑色粗羊栖菜多糖，粗多糖得率为 17.7%。

### 2.2.3. 超声提取法

超声辅助提取法利用超声波破坏细胞壁和细胞膜，加速多糖的释放。超声辅助提取法具有提取时间短、多糖得率高的优点。孔秋红[25]利用超声辅助热水提取法，使多糖得率达到 12.57%。丁浩森[27]等人 在研究中使用循环超声提取法，控制温度 87℃、固液比 1:35 (g/mL)、功率 900 W、时间 13 min，在此工艺参数下，羊栖菜多糖提取率达到 10.54%。此外，循环超声作用能够进一步提高多糖的生物活性和抗氧化性。

### 2.2.4. 微波辅助萃取

微波提取技术作为一种新兴方法，有快速升温、低能耗及良好的选择性的特点。然而，微波功率与时间参数的设定对多糖的产量及其生物活性的保持至关重要，过高功率或过长处理时间可能引发多糖结构损伤，进而导致生物活性下降[22]。吕美云[28]等人的研究表明，采用微波辅助策略可获得 18.26%的粗多糖提取率，并通过正交试验优化得出最佳工艺条件：羊栖菜需预先浸润 1.5 h，随后在 600 W 功率下微波处理 10 分钟。与常规水提法相比，在同样 1.5 h 的浸润预处理后，微波辅助法仅需 8 h 即可达到 18.26% 的提取率，而传统方法则需 12 h，提取率仅为 17.87%。这一对比凸显了微波辅助提取在缩短周期、提升效率及成本控制方面的显著优势。

### 2.2.5. 酶解法

目前羊栖菜多糖提取方法虽然多样，但仍然有各自的缺点，水提法耗时长且提取率低，酸碱提取可能破坏多糖的活性结构且不环保，超声波提取同样会破坏多糖结构且成本高。酶解法是一种绿色环保的

新型提取技术[14]，孔秋红[25]等对比了热水提取、超声辅助提取及纤维素酶解提取羊栖菜多糖的多糖得率及理化性质，发现酶解法所得多糖得率最高，达到 14.02%。刘温凯[14]等采取了果胶酶和中性蛋白酶的比例 4:1 的组合酶法，不仅使羊栖菜多糖的得率达到 5.4%，其多糖产物也表现出较好的降血脂活性。为筛选和制备降脂功能的羊栖菜多糖提供了理论依据，有助于开发新的天然降脂产品 and 功能化食品。

**Table 1.** Polysaccharide extraction yields from *Sargassum fusiforme* using different methods  
**表 1.** 不同方法提取羊栖菜多糖得率

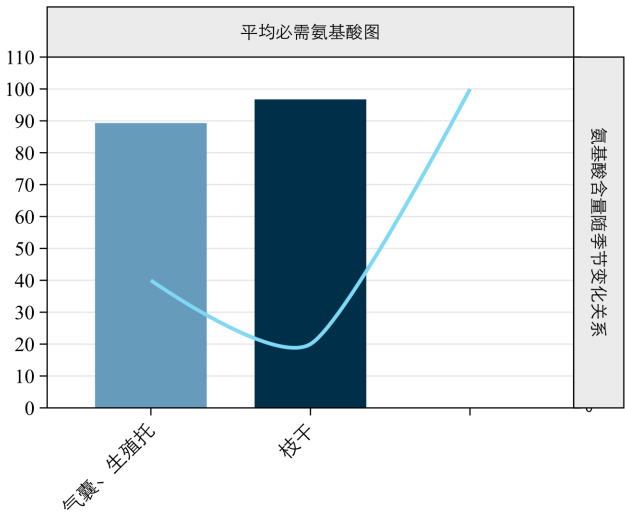
提取方法	多糖得率	研究者	年份
酶解法	14.88% (粗多糖)	周峙苗[5]	2003
组合酶法	5.4%	刘温凯等[14]	2024
6 种组合酶法	6.86%	欧阳丹等[29]	2024
水提法	6.59%	季德胜[24]	2017
超声辅助水提法	12.57%		
脉冲电场辅助水提法	10.38%	孔秋红等[25]	2021
纤维素酶辅助水提法	14.02%		
酸提取	13%	卞俊等[26]	2002
循环超声提取	10.54%	丁浩淼等[27]	2015
微波辅助萃取	18.82%	吕美云等[28]	2012

3. 氨基酸

3.1. 羊栖菜氨基酸种类与功效

羊栖菜富含氨基酸，氨基酸总量为 6.18%至 12.01%，平均值为 10.82 克每百克，高于海带的 5.62 克每百克，其中含有 18 种人体必需氨基酸，8 种(赖氨酸、色氨酸、苯丙氨酸、甲硫氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和缬氨酸)为人体无法自行合成，占氨基酸总量的 42.08%至 47.36% [30]。

崔海峰[31]通过研究发现：羊栖菜的氨基酸含量会随季节变化而波动，冬季末期达到最高，春季末期最低，夏季则有所回升(见图 2 曲线)。



**Figure 2.** Profile of essential amino acid composition in seaweed  
**图 2.** 平均必需氨基酸图



羊栖菜富含优质氨基酸,具有促进生长发育、增强免疫的功效。含量为 6.65%至 15.64%;其枝干氨基酸平均标准参考比值(SRC)分别为 67.11/74.02 (FAO/全蛋),平均必需氨基酸指数(EAAI)为 96.73;气囊、生殖托的平均 SRC 值为 65.75/71.30 (FAO/全蛋),平均 EAAI 为 89.31 [32]。郑淘[33]表示:必需氨基酸与非必需氨基酸的比值为 86.7%,羊栖菜的蛋白质模式基本符合 FAO/WHO 推荐的蛋白质模式。

### 3.2. 羊栖菜氨基酸分离与提纯

类菌胞素氨基酸(简称 MAAs)是由多种氨基酸通过缩合反应生成的一类化合物,它们拥有氨基环己烯酮或氨基环己烯胺的独特结构[34]。这类化合物广泛存在于藻类、浮游植物及微生物群体中[35],在羊栖菜中也富含 MAAs。

研究者以羊栖菜作为原料,通过一系列单因素和正交实验,分析了提取温度、时间、次数以及液料比对 MAAs 提取效果的影响。对于羊栖菜中 MAAs 的提取,最佳条件为温度 40℃、时间 2 小时、液料比为 25 mL/g,此时 MAAs 的提取率可达到 29.27% [36]。

通过硅胶柱层析的方法[37],可对羊栖菜中的 MAAs 进一步分离,羊栖菜 MAAs 提取物被分离为 Y1 至 Y3 三个组分,实现了良好的初步分离效果。通过紫外光谱、高效液相色谱和液相质谱等分析手段,并参考相关文献资料,鉴定 11 个分离组分中的 MAAs 成分。

## 4. 矿物质和微量元素

### 4.1. 羊栖菜中矿物质和微量元素成分及功效

羊栖菜内含有多种矿物质和微量元素,例如铜、铁、碘、锰、镍、砷、镁、锌、钾、钠、钙、铝、钡等,因其具有极强的从海水中富集钙镁元素的能力,其钙、镁、碘、钾、钠和镓元素在羊栖菜内的含量相对较高[38]。因其钙含量普遍高于海带、龙须菜、浒苔等其他藻类,是一种良好的钙镁补充食物,同时也为陆地植物提供了一种有效的钙镁补充途径[39]。另外,羊栖菜中硒元素的含量丰富,具有很高的保健食品开发价值。

需要注意的是,羊栖菜不同部位以及不同季节、不同地区生长的羊栖菜,其元素含量存在差异。通过提取、分离、纯化羊栖菜中有益的矿物质和微量元素,可以更有效地提升羊栖菜利用率。

### 4.2. 羊栖菜中矿物质和微量元素分离检测工艺

由于羊栖菜矿物质含量较低,传统提取工艺存在局限性,研究人员针对其特性提出两种分离检测方法,分别基于酸提取预处理[40]与微波消解-电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)联用技术[41],以实现矿物质的高效释放与精准测定。酸提取法操作简便、耗时短(总处理时间 < 30 min),适用于快速筛查;微波消解法虽流程复杂(总耗时约 4 h),但可获取总矿物质含量数据。研究建议根据检测目的选择适用方法,当需评估生物可利用态矿物质时优选酸提取法,而进行总量分析时宜采用微波消解法。

## 5. 有害物质

### 5.1. 羊栖菜的主要有害元素分析

近年来海水污染问题的日益严峻,海洋环境逐渐遭受破坏,近海区域中 Hg、Pb、Ni、Cu、Cd 等重金属的污染越来越严重[42]。重金属具有难以降解的特点,可沿食物链富集,并参与生物圈循环,并最终危害到人类的健康[43]。朱姚镓[44]等的研究表明,2020 年全国直排海水中的六价铬、铅总量达到了 2153 kg 和 14,100 kg。羊栖菜中亦检测到了微量重金属元素的存在,主要包括 Cd、Pb、Al、As 等[45]。

随着羊栖菜受到了社会越来越多的关注,但是主要针对其中的活性成分等进行研究,关研究相对较

少。因羊栖菜类属的海藻类结构特点，如细胞壁等结构能提供较多可与离子结合的官能团，液泡等结构能够隔离和固定微量元素，使得羊栖菜易从周围介质中积聚各类离子[44]。林立东[46]、林金霞[47]等的相关研究发现，羊栖菜所属的褐藻的金属吸附容量和吸附效率远高于红藻、绿藻。因此，羊栖菜中铜(Cu)、铬(Cr)等多种金属元素随着浓度的增加而成为有毒重金属[48]，过量食入可能危害人体健康。

5.2. 不同研究中羊栖菜所含重金属元素比较

在不同研究中，对羊栖菜所含的重金属元素含量测量的种类有所不同，见表 2。靳贵英[49]等检测了羊栖菜中 As、V、Ni、Cd、Hg、Pb 的含量，其中 As 和 Ni 的占比较高。陈星星[50]等检测了羊栖菜中 As、i-As、Cd、Hg、Pb 的含量，其中 i-As 和 Cd 的含量不符合藻类制品的卫生指标，Hg 和 Pb 的含量符合藻类制品的卫生指标。

Table 2. Comparative analysis of heavy metal concentrations in *Sargassum fusiforme* across studies  
表 2. 不同研究中羊栖菜所含重金属元素均值比较

元素	平均值 1 (源于靳贵英等)	品均值 2 (源于陈星星等)	藻类制品的卫生指标
As	21.7	80.84	
i-As		15.78	≤1.5
V	1.06		
Ni	21.1		
Cd	0.08	1.38	≤1.0
Hg	0.04	0.05	≤1.0
Pb	0.31	0.82	≤1.0

As，总砷；i-As，无机砷。

两项研究均表明羊栖菜中 As 的含量很高。砷具有强烈的毒性和致癌性，广泛存在于自然界中，具有来源广、易富集、难降解等特点，是海洋环境中主要的污染物[51]。羊栖菜中含有大量的砷，尤其是无机砷的含量，大大超出食品中无机砷的限量标准，大量食用会对身体造成一定伤害[52]。

羊栖菜中元素 Cd、Pb、Hg 的含量相对较低，考虑到这些元素具有高生物毒性，羊栖菜对这部分微量元素可能存在选择性吸收[44]。

两项研究中，羊栖菜所含重金属元素的均值存在一定差异的可能原因是：取样羊栖菜的海域不同，不同海域中重金属元素的含量不同；取样羊栖菜的部位不同，吸收重金属元素的能力也不同，其中生殖托和气囊中的含量显著高于主茎和侧茎中的含量[44]；两项研究测量所采用的方法均为微波消解 ICP-MS 法，但实验过程中的溶剂种类、浓度等选择不同，可能导致测量所得的数据不同。

5.3. 有害元素的分离提取

张晓梅[53]等以羊栖菜作为金属离子的吸附剂，用 EDTA-2Na 作为解吸剂，在一定浓度时 EDTA-2Na 与吸附剂表面参与吸附的官能团共同竞争溶液中的金属离子，有效促使羊栖菜上吸附的金属离子重新释放到溶液中去，从而减少金属离子的吸附量，达到解吸的目的，使得羊栖菜中所含的有害金属离子含量减少。

黄善霞[52]等的研究利用超声波清洗法，去除羊栖菜中砷的影响。超声处理可以增加细胞膜的通透性，进而使羊栖菜细胞中的砷离子更易滤出。在超声强度适宜时，超声使细胞膜产生的孔在一定时间内

能完成自我修复,在一定程度上不会对细胞产生损伤。若超声强度过大,细胞膜不能完成自我修复,就会导致细胞凋亡,影响羊栖菜的品质和营养价值。通过他们的研究,认为超声处理的频率为处理的时间为 45 min 时,对羊栖菜中砷的脱除效果最好,脱砷效率可达到 60%。

## 6. 总结与展望

本文综述了关于羊栖菜中多糖、氨基酸、矿物质与微量元素以及有害物质的研究进展。作为一种兼具药用与食用价值的海洋生物资源,羊栖菜富含多种生物活性成分,展现出广阔的应用潜力。

1) 关于羊栖菜多糖的种类及其功能,主要包括褐藻糖胶、硫酸多糖等类型,这些多糖具备抗肿瘤、抗病毒、降血脂等多种生物活性。文中介绍了多种提取方法,如水提法、超声辅助水提法以及微波辅助萃取法等,其中微波辅助萃取法的提取效率最高,可达 18.82%。

2) 羊栖菜富含氨基酸,且包含 18 种人体必需氨基酸,对个体的生长发育及免疫功能等方面发挥着重要作用。通过硅胶柱层析等方法,实现了对羊栖菜中氨基酸的有效分离。

3) 羊栖菜中富含镁、碘、钾等多种矿物质与微量元素,对人体健康具有积极影响。在分离提纯方面,采用了酸提取处理以及电感耦合等离子体发射光谱法等技术手段。

4) 羊栖菜存在重金属污染问题,如砷、镉、铅、汞等有害金属元素。针对此问题,研究了 EDTA-2Na 解吸法以及超声波清洗法等去除羊栖菜中有害金属离子的方法。

羊栖菜产业作为温州市洞头区观音礁村的标志性产业,我们希望能进一步提升羊栖菜中多糖、氨基酸等活性成分的提取技术,增强提取效率,提高活性成分的纯度,并降低成本。同时,深入探索羊栖菜多糖、氨基酸等活性成分的作用机制和生物活性,为开发创新功能性食品和药物提供坚实的科学基础。此外,致力于减少羊栖菜中有害物质的含量,确保产品的安全性。通过这些深入的研究与开发工作,羊栖菜的利用价值将得到显著提升,这不仅将推动洞头区观音礁村羊栖菜产业的发展,还将促进乡村振兴战略的实施,并为人类健康和海洋资源的可持续利用作出积极贡献。

## 基金项目

2024 年国家级大学生创新训练计划项目(项目编号: 202413023044X)。

## 参考文献

- [1] Kyoung, H.E., Chul, C.Y. and Hyun, S.C. (1999) Reuse of Hold Fast in Hizikia Cultivation. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **32**, 112-116.
- [2] 李建秀, 周凤琴, 张照荣, 主编. 山东药用植物志[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2013: 38.
- [3] 杨铭, 郎朗, 季宇彬. 海藻羊栖菜药用功能研究进展[J]. 医学理论与实践, 2013, 26(4): 450-451.
- [4] 张晨. 海藻玉壶汤中加減高剂量甘草及不同品种海藻的药效及机制探讨[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京中医药大学中医临床药专业, 2019.
- [5] 周峙苗. 羊栖菜多糖的提取和纯化研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2004.
- [6] 王文亮, 王守经, 宋康, 等. 海带的功能及其开发利用研究[J]. 中国食物与营养, 2008(8): 26-27.
- [7] 张全斌, 赵婷婷, 蔡慧敏, 等. 紫菜的营养价值研究概况[J]. 海洋科学, 2005, 29(2): 69-72.
- [8] 裴钊. 裙带菜的综合利用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [9] 戚勃, 李来好, 章超桦. 麒麟菜的营养成分分析及评价[J]. 现代食品科技, 2005, 21(1): 115-117, 110.
- [10] 刘卫红, 杨晨, 张贵平, 等. TGF- $\beta$ /Smad 通路在羊栖菜多糖诱导肝癌细胞凋亡过程中的作用[J]. 中西医结合肝病杂志, 2023, 33(11): 996-999.
- [11] 张诗悦, 张亮, 张伟, 等. 羊栖菜多糖抗 A 型塞内卡病毒感染 PK-15 细胞活性和机制探究[J]. 山东农业科学, 2024, 56(4): 151-158.



- [12] 李文青, 祝孙婷, 李圣洁, 等. 羊栖菜多糖及辅助超声降解对高脂斑马鱼的降血脂作用[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(5): 156-163.
- [13] 贾璐铭, 赵菲, 刘怡君, 等. 羊栖菜多糖组成结构药理活性及其应用研究进展[J]. 农产品加工, 2024(14): 75-79, 86.
- [14] 刘温凯, 欧阳丹, 徐仰丽, 等. 组合酶制备羊栖菜多糖的工艺优化及其降血脂活性分析[J/OL]. 食品工业科技: 1-20. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070187>, 2025-03-10.
- [15] 李涛, 张琪, 王妍, 等. 羊栖菜中的褐藻糖胶通过影响 MAPK 信号通路对表皮屏障的修复治疗[J]. 沈阳药科大学学报, 2024, 41(1): 102-111.
- [16] 孙妍华, 王天宇, 何珊, 等. 褐藻糖胶调节肠道菌群改善II型糖尿病[J]. 中国海洋药物, 2023, 42(5): 19-26.
- [17] Han, M., Yi, B., Song, R., et al. (2024) Fucoidan-Derived Carbon Dots as Nanopenetrants of Blood-Brain Barrier for Parkinson's Disease Treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*, **66**, 123-130.
- [18] 茹珂烨, 阳东昊, 张雨哲, 等. 羊栖菜硫酸多糖通过 PI3K/AKT 通路抑制 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 诱导的 MRC-5 细胞氧化损伤[J]. 中国海洋药物, 2023, 42(6): 21-28.
- [19] Raghavendran, H.R.B., Srinivasan, P. and Rekha, S. (2011) Immunomodulatory Activity of Fucoidan against Aspirin-Induced Gastric Mucosal Damage in Rats. *International Immunopharmacology*, **11**, 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2010.11.002>
- [20] 李亚男. 蜈蚣藻寡糖 G19 抑制胰腺癌细胞生长和羊栖菜多糖抑制结肠癌细胞生长的作用机制研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 中国科学院大学, 2022.
- [21] Han, A., Kim, J., Kim, E., Cui, J., Chai, I., Zhang, G., et al. (2020) Hypotriglyceridemic Effects of Brown Seaweed Consumption via Regulation of Bile Acid Excretion and Hepatic Lipogenesis in High Fat Diet-Induced Obese Mice. *Nutrition Research and Practice*, **14**, 580-592. <https://doi.org/10.4162/nrp.2020.14.6.580>
- [22] 马广森, 周炜娜, 伍娟, 等. 羊栖菜多糖的提取工艺综述[J]. 广东化工, 2018, 45(9): 172, 153.
- [23] 汪艳群. 五味子多糖的分离、结构鉴定及免疫活性研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.
- [24] 季德胜. 羊栖菜多糖分离纯化、结构鉴定及拮抗 UVB 辐射造成的皮肤光老化损伤研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [25] 孔秋红, 张瑞芬, 曾新安, 等. 不同方法提取的羊栖菜多糖理化性质及益生活性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(5): 123-129
- [26] 卞俊, 吴越芳, 张吉德, 等. 羊栖菜多糖不同提取工艺的初步比较[J]. 中华航海医学与高气压医学杂志, 2002(3): 59-60.
- [27] 丁浩淼, 李轶亢, 汪财生, 等. 循环超声提取羊栖菜多糖的工艺优化[J]. 药物生物技术, 2015, 22(2): 146-150.
- [28] 吕美云. 微波辅助法提取羊栖菜多糖[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(12): 79-81.
- [29] 欧阳丹, 张超, 杨莹, 等. 6 种组合酶法制备羊栖菜多糖的理化性质及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 248-257.
- [30] 陈绍瑗, 莫卫民. 海洋药物研究(II): 羊栖菜中蛋白质和氨基酸分析[J]. 浙江工业大学学报, 1998(1): 45-48.
- [31] 崔海峰. 不同品系羊栖菜形态和营养成分的初步分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [32] 刘宇璇, 汪芷因, 林振士, 等. 洞头羊栖菜不同部位的营养成分和物化性质分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 216-223, 133.
- [33] 郑淘. 羊栖菜的营养保健价值、安全性及高值化利用研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2013.
- [34] 周婷婷. 认识长寿菜——羊栖菜[J]. 家庭教育, 2024(7): 45.
- [35] Athukorala, Y., Trang, S., Kwok, C. and Yuan, Y. (2016) Antiproliferative and Antioxidant Activities and Mycosporine-Like Amino Acid Profiles of Wild-Harvested and Cultivated Edible Canadian Marine Red Macroalgae. *Molecules*, **21**, Article 119. <https://doi.org/10.3390/molecules21010119>
- [36] Sinha, R.P., Singh, S.P. and Häder, D. (2007) Database on Mycosporines and Mycosporine-Like Amino Acids (MAAs) in Fungi, Cyanobacteria, Macroalgae, Phytoplankton and Animals. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, **89**, 29-35. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2007.07.006>
- [37] 朱文轩, 钱亮亮, 程同杰, 等. 4 种大型褐藻类菌胞素氨基酸的提取工艺优化及鉴定[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(4): 114-121.
- [38] 许秀兰, 卢立用, 陈顺福, 等. 微波消解 ICP-OES 法测定羊栖菜中微量元素含量[J]. 中国调味品, 2013, 38(6): 87-90.

- [39] 曹瑛, 段金傲, 郭建明, 郭盛, 等. 不同产地中药海藻中无机元素的分析与评价[C]//中国科协第八届常委会青年工作专门委员会, 国务院学位委员会办公室, 中国科协组织人事部. 第十一届全国博士生学术年会(生物医药专题)论文集(中册, 墙报 P1-P24). 南京: 南京中医药大学, 2013: 157-171.
- [40] 李琦, 熊宁, 尚艳娥, 等. 酸提取处理 ICP-OES 测定稻谷中镉元素的方法验证试验[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(1): 58-62.
- [41] 徐臻兰, 姚佳人, 上海材料研究所有限公司上海市工程材料应用与评价重点实验室. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定红土镍矿中的镍、铬、钴、铁、锰、钛、铜、镁、铝[J]. 工程机械, 2024, 55(11): 178-183, 15.
- [42] 朱喜锋. 重金属汞、铜和镉对三种大型经济海藻毒性效应的研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 汕头大学, 2010.
- [43] 李晓婷. 羊栖菜干粉对水体中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  的生物吸附特性研究[D]: [硕士学位论文]. 舟山: 浙江海洋学院, 2014.
- [44] 朱姚镓, 刘宇璇, 汪恒玮, 等. 羊栖菜不同部位微量元素含量测定及健康风险评价[J]. 应用海洋学报, 2022, 41(3): 423-431.
- [45] 赵艳芳, 尚德荣, 宁劲松, 等. 羊栖菜中微量金属元素的亚细胞分区分布[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(6): 118-123.
- [46] 林立东. 羊栖菜对重金属铜的吸附及生理响应[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [47] 林金霞, 黄小娜, 夏建荣, 等. 羊栖菜干藻作为生物吸附剂用于去除电镀废水中的重金属[J]. 水产学报, 2018, 42(12): 1988-1996.
- [48] Su, L., Shi, W., Chen, X., Meng, L., Yuan, L., Chen, X., *et al.* (2021) Simultaneously and Quantitatively Analyze the Heavy Metals in *Sargassum Fusiforme* by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Food Chemistry*, **338**, Article ID: 127797. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127797>
- [49] 靳贵英. 微波消解 ICP-MS 法测定海藻羊栖菜中多种有害元素[J]. 中南药学, 2017, 15(8): 1131-1133.
- [50] 陈星星, 吴越, 周朝生, 等. 浙江沿海藻类重金属含量测定及健康风险评价[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(6): 1029-1034.
- [51] 谢庆安, 公维洁, 宋堃瑜, 王春珠, 梁佰靖, 张贝妮, 仇鹤潼. 黎安港水体砷含量分布特征和污染评价[J]. 环境科学导刊, 2024, 43(3): 67-70
- [52] 黄善霞, 朱诚. 超声法对去除羊栖菜中砷的研究[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十一届年会论文摘要集. 杭州: 浙江大学生命科学学院, 中国计量学院生命科学院, 2014: 2.
- [53] 张晓梅, 毕诗杰, 苏红, 郭芮, 刘红英. 羊栖菜对水环境中  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附特性[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(1): 211-221.