

# 浒苔提取物成分分析及其生理功能研究进展

李响<sup>1</sup> 周锡红<sup>2</sup> 赵玉蓉<sup>1\*</sup>

(1.湖南农业大学动物科学技术学院,湖南畜禽安全生产协同创新中心,长沙 410128;

2.中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙 410125)

**摘要:** 浒苔提取物含有多糖、蛋白质、氨基酸、脂肪酸、挥发性物质、矿物质等成分,具有抗氧化、提高机体免疫力、降血脂等多种作用,并在饲料领域有广阔的开发利用前景。本文主要对浒苔提取物的化学成分、生理功能及其在饲料中的应用进行综述,以期对浒苔的开发利用提供参考。

**关键词:** 浒苔提取物;成分分析;生理功能;饲料应用

**中图分类号:** S816

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-267X(2019)12-5468-08

浒苔是一种大型海洋绿藻,又称“苔条”、“青苔海”<sup>[1]</sup>,属绿藻门,绿藻纲,石莼科。浒苔在我国分布广泛、品种繁多,且资源十分丰富,具有悠久的药食两用历史<sup>[2-3]</sup>,但均未引起广泛的开发利用。由于过去人们环境保护意识的缺乏,使工业、生活等污水通过各种渠道流入大海,海水的富营养化程度升高,为浒苔的生长繁殖提供了有利的生存条件<sup>[4]</sup>,导致我国近海生态系统安全受到严重威胁。浒苔提取物作为新开发的一类天然植物资源,具有优良的抗氧化、提高免疫力、降血脂等作用,并在饲料领域中崭露头角<sup>[5]</sup>,这对实现浒苔的“变废为宝”提供了方向。因此,了解浒苔提取物的有效化学成分及其功能、加快浒苔在饲料领域的发展,对浒苔的合理利用与开发具有重要意义。

## 1 浒苔提取物的化学成分

我国虽早将浒苔作以药用和食用,但对浒苔提取物的化学成分以及浒苔的利用价值存在着认知缺陷。近年来,通过不断地分析和挖掘,研究学者发现浒苔提取物的化学成分包括多糖、蛋白质、氨基酸、脂肪酸、挥发性物质、矿物质等,具有巨大

的开发利用潜力。

### 1.1 多糖

浒苔多糖是一种由鼠李糖、葡萄糖、木糖等单糖组成,并含有以糖醛酸和硫酸基为主要结构的水溶性绿藻多糖<sup>[6]</sup>,可经胃和肠道吸收,但在胃中吸收较少,仅能维持机体饱腹感,进入小肠后快速吸收,少部分未被吸收的浒苔多糖还可由大肠内细菌分解以供机体利用,最后经肠道排出<sup>[7]</sup>。另外,浒苔中糖醛酸和硫酸基的含量及单糖的组成相对比较稳定,但不同时间和地区采集的浒苔中单糖的组分含量各不相同<sup>[8]</sup>。石学连等<sup>[9-10]</sup>在不同时间采集的浒苔中发现,6月与11月的浒苔中甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖和木糖的组成比例中以鼠李糖的组成比例较大,而2个采集时间鼠李糖比例差异较小。不同时间采集的浒苔中单糖比例如表1所示。

另外,齐晓辉<sup>[11]</sup>对青岛沿海2种缘管浒苔藻体粉末提取得到的4种多糖进行进一步分离纯化,发现各多糖组分总糖含量差别不大,且多糖组分主要由鼠李糖组成,并含有少量其他单糖。Qi等<sup>[12]</sup>研究发现中国福建浒苔的多糖组成为阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖和葡萄糖醛酸;而Cho等<sup>[13]</sup>研

收稿日期:2019-05-10

基金项目:湖南农业大学“双一流”创新团队建设项目(kxk201801004);国家重点研发计划(2018YFD0500405)

作者简介:李响(1996—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,畜牧专业。E-mail: 823721303@qq.com

\*通信作者:赵玉蓉,教授,博士生导师,E-mail: 1335434506@qq.com

究表明,韩国莞岛郡的浒苔多糖中单糖包括鼠李糖、木糖和葡萄糖。不同地区采集的浒苔中单糖比例如表 2 所示。

表 1 不同时间采集的浒苔中单糖比例

Table 1 Ratio of simple sugar in enteromorpha at different sample time<sup>[9-10]</sup>

| 时间<br>Time | 甘露糖<br>Mannose | 鼠李糖<br>Rhamnose | 葡萄糖<br>Glucose | 半乳糖<br>Galactose | 木糖<br>Xylose | 糖醛酸<br>Uronic acid | 硫酸根<br>Sulfate radical |
|------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|--------------|--------------------|------------------------|
| 6 月 Jun    | 6.74           | 65.56           | 5.54           | 2.83             | 19.33        | 12.10              | 16.70                  |
| 12 月 Dec   | 2.81           | 67.55           | 2.31           | 2.71             | 24.61        | 11.90              | 11.67                  |

表 2 不同地区采集的浒苔中单糖比例

Table 2 Ratio of single sugar in enteromorpha in different sample areas<sup>[12-13]</sup>

| 地区<br>Region | 阿拉伯糖<br>Arabinose | 鼠李糖<br>Rhamnose | 半乳糖<br>Glucose | 葡萄糖醛酸<br>Glucuronic acid | 葡萄糖<br>Glucose | 木糖<br>Xylose |
|--------------|-------------------|-----------------|----------------|--------------------------|----------------|--------------|
| 中国 China     | 80.5              | 10.7            | 4.8            | 4.0                      | —              | —            |
| 韩国 Korea     | —                 | 70.2            | —              | —                        | 26.3           | 3.5          |

综上所述,在浒苔多糖成分中其单糖组成以鼠李糖最稳定,其他单糖则有较大差异。这可能是浒苔多糖的化学组成会因采集时间、采集地区和种类不同而有所差异<sup>[14]</sup>。

### 1.2 蛋白质与氨基酸

蛋白质与氨基酸是浒苔提取物中重要组成成分之一。蛋白质消化率反映了机体对蛋白质的消化利用状况,一般来说,蛋白质消化率越高,其营养价值越高。Aguilera-Morales 等<sup>[15]</sup>采用 6.25 的换算系数计算出浒苔中含有 9%~14% 的蛋白质,蛋白质消化率明显高于红藻和褐藻,达到 98%。因而,浒苔可作为一种低能量食源,满足当代年轻人“吃不胖”的饮食需求。另外,浒苔中还含有大量必需氨基酸,必需氨基酸约占总氨基酸的 40%,其氨基酸组成与大豆蛋白相近<sup>[16]</sup>,并富含天门冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、亮氨酸<sup>[17]</sup>,与龙须菜等红藻类氨基酸组成差异较小;谷氨酸、天门冬氨酸含量差异也较小,达到总氨基酸的 13% 左右<sup>[18-19]</sup>。

### 1.3 脂肪酸

浒苔中脂肪酸组成全面,以 C16 和 C18 为主,不饱和脂肪酸含量较高,超过 60%<sup>[20]</sup>。其中必需脂肪酸亚麻酸含量最高,为 15.98%;其次为单不饱和脂肪酸油酸,含量为 13.07%<sup>[21]</sup>,另外,浒苔中总脂含量较低,其中 n-3 系列的多不饱和脂肪酸含量占总脂的 27.54%,n-6 系列的多不饱和脂肪酸占总脂的 8.79%,n-6 与 n-3 系列多不饱和脂肪酸

均符合联合国卫生组织(WHO)推荐的摄入标准<sup>[22]</sup>。鱼油在不同温度下存储会导致脂肪酸含量发生变化,挥发性风味物质增多,从而产生腥臭异味<sup>[23]</sup>,而浒苔中脂肪酸的挥发则产生特殊风味,且浒苔原料来源广泛。因而,浒苔中脂肪酸具有无鱼腥味、易获取、价格低的特点。

### 1.4 挥发性物质

海藻中挥发性成分组成具有明显的种属差异性,其差异主要表现在酮类、醛类、烃类、醇类以及杂环类化合物上<sup>[24]</sup>。浒苔中挥发性物质以烃类、醇类、醛类、酯类为主,并在冬季可以检测出苦味物质,相对含量为 0.13%<sup>[25]</sup>。而红藻均以烃类成分为主,其含量在 70% 以上<sup>[26]</sup>。浒苔与红藻中特征风味物质分别以顺-3-十七烯和 8-十七碳烯为主<sup>[27-28]</sup>,而特征风味物质的含量对风味产生巨大影响,这可能是浒苔呈藻香味而红藻呈鲜甜味的主要原因。另外,浒苔因纤维过硬或腥味过浓而不宜直接食用,经加热处理后散发特殊香味才具有食用价值,而苦味物质的相对含量会随温度升高而增加,从而影响口感<sup>[29-30]</sup>。因此,对浒苔的处理方式还有待进一步研究。

### 1.5 矿物质

浒苔中矿物质丰富,钾、钠、镁、钙含量较高,同时富含人体所必需的锌、铜等;其中铁含量显著高于褐藻和红藻类海藻<sup>[31-33]</sup>。因而,浒苔对铁富集能力显著高于红藻和褐藻,这对于浒苔作为

食品补充剂以提高人类饮食的营养价值提供了可行方案。浒苔对金属元素的富集与暴露浓度呈正相关<sup>[34]</sup>,以至浒苔中也含有一定比例的重金属元素,但重金属含量有显著差异,这可能与沉积物、浒苔及海水中重金属含量有关<sup>[35]</sup>。而重金属的沉积会导致机体产生疾病,造成死亡。因而,重金属含量是浒苔绿色食品产业的主要限制因子。

## 2 浒苔提取物的生理功能

### 2.1 抗氧化作用

浒苔提取物具有抗氧化性能,主要体现在以下几个方面:1) 自由基的清除能力。宋雪原等<sup>[36]</sup>研究表明,浒苔多糖对羟基自由基和超氧阴离子具有良好的清除能力,当多糖浓度为 0.015 g/L,对超氧阴离子的消除率为 55%左右,而当浓度为 0.06 g/L 时,对羟基自由基的清除率达到 25%左右,且多糖浓度与自由基清除率呈正相关。另外, Yuan 等<sup>[37]</sup>采用微波热液萃取法提取浒苔多糖,发现硫含量对二苯基苦基苯肼(DPPH)自由基清除活性的影响较大。Zhao 等<sup>[38]</sup>也证明了来自日本海带褐藻的低分子质量硫酸多糖具有潜在的阻止自由基链反应的能力。其机制可能是浒苔及其提取物抗氧化活性与硫酸根含量和多糖分子质量的高低直接相关,多糖的分子质量小,易跨越细胞膜障碍,从而进入生物体内发挥生物学活性<sup>[39-41]</sup>。2) 增强抗氧化酶的活性。超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、过氧化氢酶(CAT)等主要抗氧化酶是活性氧(ROS)生成的生物标志物,同时也是机体在氧化应激过程中对 ROS 产生的主要防御系统<sup>[42]</sup>。丙二醛(MDA)为机体脂质过氧化产物<sup>[43]</sup>,反映了机体受自由基损伤的程度。Tang 等<sup>[44]</sup>研究发现,从浒苔中提取的粗多糖组分可显著提高高脂饲料喂养的小鼠内源性抗氧化酶(SOD、GSH-Px、CAT)活性,降低 MDA 含量,防止小鼠的脂质过氧化损伤。3) 金属离子的螯合作用。与其他自由基相比,羟基自由基活性最高,可对机体造成严重损伤<sup>[45]</sup>。有研究表明,浒苔提取物中的糖醛酸和硫酸基多糖具有较强的螯合能力<sup>[46]</sup>,能与铁、铜等金属离子相结合,从而抑制金属离子与过氧化氢的反应,减少羟基自由基的生成<sup>[47-48]</sup>,从而提高机体的抗氧化能力。

### 2.2 提高机体免疫力

浒苔多糖是一种普通的藻类多糖,同时也是一种重要的免疫调节物质,并在特异性免疫和非特异性免疫中发挥重要作用。一方面,促进免疫细胞增殖与分化,增强免疫活性。有研究表明,适宜浓度的浒苔多糖显著促进 T、B 淋巴细胞的增殖并提高 T 淋巴细胞亚群 CD4<sup>+</sup>/CD8<sup>+</sup> 比值<sup>[49-50]</sup>,从而增强机体的免疫能力。Zhang 等<sup>[51]</sup>通过对小鼠脾淋巴细胞体外试验表明,不同方法提取的浒苔多糖对刀豆蛋白 A(ConA)和脂多糖(LPS)诱导的淋巴细胞具有明显的增殖作用。毕梅生<sup>[52]</sup>在浒苔多糖对腹腔脓毒症大鼠的研究中发现,与对照组相比,浒苔多糖处理显著增高腹腔脓毒症大鼠 CD4<sup>+</sup> T 淋巴细胞的数量和 CD4<sup>+</sup>/CD8<sup>+</sup> 比值,从而改善腹腔脓毒症大鼠的免疫功能。其机制可能是浒苔多糖与免疫细胞上的多糖受体结合可激活细胞内的信号转导途径,从而激活免疫细胞,促进免疫细胞增殖与分化,增强免疫活性<sup>[53-54]</sup>。另一方面,促进免疫细胞分泌各种细胞因子,刺激免疫应答。白细胞介素(IL)、干扰素(IFN)、肿瘤坏死因子- $\alpha$ (TNF- $\alpha$ )等细胞因子,通过介导细胞毒活性和局部炎症有关免疫应答,提高机体免疫力。有研究发现,水溶性浒苔多糖通过激活巨噬细胞使其具有强大的免疫刺激活性而阻止潜在的炎症反应,其机制可能是浒苔的水溶性多糖通过上调诱导性一氧化氮合酶(iNOS)和环氧化酶-2(COX-2)mRNA 的表达,刺激巨噬细胞产生大量一氧化氮(NO)和 IL-1、IL-6、TNF- $\alpha$  等促炎症因子,从而刺激免疫活性;同时产生 IL-10 抗炎因子避免因巨噬细胞过度活化所产生有害的炎症反应,从而增强炎症反应的应答<sup>[55]</sup>。

### 2.3 降脂作用

浒苔提取物具有降低血脂水平、调节脂质代谢的作用。有研究表明,血清总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)含量升高,高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量降低是高脂血症的主要特征<sup>[56]</sup>。陈捷等<sup>[57]</sup>研究发现,在清洁级成年 SD 大鼠饲料中添加浒苔多糖,与高脂饲料组相比,显著降低血清中 TC、TG 和 LDL-C 的含量,同时还显著提高了血清中 SOD 和 GSH-Px 的活性。这说明浒苔多糖能通过提高机体抗氧化能力,清除过多氧自由基,缓解脂质过氧化,从而降低血脂。乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)是参与脂肪

酸合成和氧化的酶,可增加脂肪酸的合成,抑制脂肪酸的氧化。Ren 等<sup>[58]</sup>在饲喂高脂饲料的 SD 大鼠中研究表明,添加浒苔多糖可显著抑制甾醇调控元件结合蛋白-1c (*SREBP-1c*) 和 *ACC1* 的基因表达并降低 TG 含量,从而减轻高脂血症。*ACC1* 可催化乙酰辅酶 A 转化为丙二酰辅酶 A,而丙二酰辅酶 A 可抑制脂肪酸氧化<sup>[59-60]</sup>,因此,浒苔多糖通过抑制 *ACC1* 的基因表达,从而降低 TG 含量。另外,*ACC1* 基因表达受 *SREBP* 控制,而腺苷-磷酸激活蛋白激酶 (AMPK) 的激活可抑制 *SREBP-1c* 的表达,减少脂质合成<sup>[61-62]</sup>。因而,浒苔多糖对血脂的调节作用可能与通过激活 AMPK 来抑制 *SREBP-1c* 的表达从而降低 TG 含量有关。此外,在 Ren 等<sup>[63]</sup>研究中发现,浒苔多糖还可通过抑制 *SREBP-2* 的表达,降低 HMG-CoA 还原酶 (*HMGCR*) 的表达,从而改善糖尿病大鼠的糖代谢,降低胆固醇水平。

综上所述,浒苔提取物中的功能性成分以多糖为主,具有抗氧化、提高机体免疫力、降血脂等作用,其他提取物成分包括蛋白质、氨基酸、脂肪酸、挥发性物质、矿物质等主要是作为浒苔营养成分物质,表达浒苔的营养价值水平<sup>[64-65]</sup>。另外,浒苔中蛋白质可通过酶法改性等方法提高浒苔抗氧化水平<sup>[66]</sup>,然而,其研究还相当缺乏。

### 3 浒苔及其提取物在饲料中的应用

#### 3.1 在猪饲料中的应用

浒苔在猪饲料中的应用较少。林英庭等<sup>[67]</sup>以长×大二元杂交生长猪为研究对象发现,与对照组相比,饲料中添加 10% 的浒苔可以改善饲料适口性,提高生长猪的平均日增重,并显著提高饲料中各种养分的消化率,其中粗蛋白质消化率高达 83%~86%。也有研究表明,生长猪饲料中添加 6% 的浒苔能显著提高粗蛋白质消化率,且高达 83%<sup>[68]</sup>。可见,生长猪饲料中浒苔的添加量为 6%~10% 较适宜,其原因可能是饲料中添加的浒苔含有多糖等多种活性物质,可以通过提高猪肠道消化酶的活性及有益微生物数量改善肠道环境,进而提高采食量、促进生长。而生长猪饲料中添加过多的浒苔可能会导致采食量下降,其原因可能是浒苔多糖表现出水溶性纤维性质,从而抑制消化酶的活性。

#### 3.2 在水产动物饲料中的应用

在水产动物饲料中添加浒苔可提高机体免疫力,改善生长性能。有研究表明,饲料中添加约 4% 的浒苔能够有效地提高珍珠龙胆石斑鱼机体非特异性免疫力<sup>[69-70]</sup>。这与 Yang 等<sup>[71]</sup>研究结果基本一致,其研究表明在红罗非鱼饲料中添加浒苔能显著提高红罗非鱼免疫器官指数及肠道消化酶活性和增重率。其机制可能是浒苔提高了酸性磷酸酶 (ACP)、碱性磷酸酶 (AKP) 等非特异性免疫酶活性,增强免疫功能;也可能与浒苔能够维持肠道微生物的平衡,从而促进营养物质的消化吸收有关。另外 Asino 等<sup>[72]</sup>研究表明,饲料中添加 5%~10% 的浒苔才具有显著提高大黄鱼机体免疫力和促进其生长作用。以上结果表明,饲料中添加浒苔能提高水产动物机体内非特异性免疫的能力,从而促进机体生长发育;而不同种类水产动物中浒苔的适宜添加量存在较大差异,这可能是不同种类机体对浒苔的耐受值或饲养方式不同所致,其具体原因还有待进一步深入研究。

#### 3.3 在家禽饲料中的应用

浒苔具有改善家禽生产性能、降低家禽热应激反应的作用。研究表明,在肉鸭饲料中分别添加 2%、3%、4% 的浒苔,能显著提高肉鸭平均日采食量和平均日增重,其中添加 3%~4% 的浒苔效果最佳<sup>[73]</sup>。据宋宏立等<sup>[74]</sup>报道,通过在肉鸡饲料中添加 2%、3%、4% 的浒苔,能提高肉鸡氨基酸表观利用率和粗蛋白质消化率,其中添加 3% 的浒苔效果最佳,并显著提高肉鸡机体内胰蛋白酶活性,因而,浒苔促进家禽生长性能的机制可能是与其通过刺激肠道产生大量的消化酶或增强消化酶活性来提高饲料中营养成分的消化率有关。热应激能引发家禽产生疾病,从而引起生产性能的改变,因此,缓解热应激损伤可能是提高家禽生长性能的重要因素之一。林英庭等<sup>[75]</sup>在蛋鸡的热应激模型中研究发现,饲料中添加 3%~4% 的浒苔能显著提高蛋鸡血清 GSH-Px、SOD 等抗氧化酶的活性,有效地清除体内的自由基,从而缓解热应激反应。此外,Michalak 等<sup>[76]</sup>对蛋鸡进行饲养试验发现,添加浒苔能够增强鸡蛋的重量和蛋壳厚度,并提高蛋黄色泽,从而改善蛋品质。其机制是浒苔中含有丰富的微量元素可供机体吸收利用,从而保障了机体的营养所需。综上所述,家禽饲料中添加 3%~4% 的浒苔有利用缓解家禽的热应激反应,并

提高生产性能。

#### 4 小结

综上所述,浒苔提取物含有丰富的多糖、蛋白质、氨基酸、脂肪酸、挥发性物质、矿物质等,具有优良的抗氧化、增强免疫力、调节血脂等生物学功效。饲料中添加浒苔还能够促进动物机体的正常生长发育,并提高动物生产性能。目前,研究者对浒苔提取物的成分分析及其作用机理的研究较浅,浒苔在饲料中的研究及应用还不够深入。因此需要进一步研究浒苔提取物成分及其作用机理,以及浒苔提取物在畜禽不同生长阶段最适添加量,实现真正意义上的“变废为宝”。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 林文庭.浅论浒苔的开发与利用[J].中国食物与营养,2007(9):23-25.
- [ 2 ] PAIVA L, LIMA E, PATARRA R F, et al. Edible Azorean macroalgae as source of rich nutrients with impact on human health [ J ]. Food Chemistry, 2014, 164: 128-135.
- [ 3 ] TSENG C K. The past, present and future of phycology in China [ J ]. Hydrobiologia, 2004, 512 ( 1/2/3 ): 11-20.
- [ 4 ] LIU D, BAI J, SONG S, et al. The impact of sewage discharge on the macroalgae community in the Yellow Sea coastal area around Qingdao, China [ J ]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2007, 7(6): 683-692.
- [ 5 ] MAEHRE H K, MALDE M K, EILERTSEN K E, et al. Characterization of protein, lipid and mineral contents in common Norwegian seaweeds and evaluation of their potential as food and feed [ J ]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94 ( 15 ): 3281-3290.
- [ 6 ] 于源,王鹏,李银平,等.浒苔多糖提取、结构与活性研究进展[J].中国渔业质量与标准,2013,3(3): 83-87.
- [ 7 ] 林丽凡,林良琴.浒苔多糖在小鼠体内的代谢过程 [ J ]. 数字化用户, 2014(23): 257.
- [ 8 ] 魏鉴腾,裴栋,刘永峰,等.浒苔多糖的研究进展 [ J ]. 海洋科学, 2014, 38(1): 91-95.
- [ 9 ] 石学连,张晶晶,王晶,等.浒苔多糖的分级纯化及体外抗氧化活性研究 [ J ]. 中国海洋药物, 2009, 28 ( 3 ): 44-49.
- [ 10 ] 石学连,张晶晶,宋厚芳,等.浒苔多糖的分级纯化及保湿活性研究 [ J ]. 海洋科学, 2010, 34(7): 81-85, 99.
- [ 11 ] 齐晓辉.浒苔多糖的结构及寡糖研究 [ D ]. 博士学位论文.青岛:中国海洋大学,2012.
- [ 12 ] QI X H, MAO W J, GAO Y, et al. Chemical characteristic of an anticoagulant-active sulfated polysaccharide from *Enteromorpha clathrata* [ J ]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(4): 1804-1810.
- [ 13 ] CHO M L, YANG C, KIM S M, et al. Molecular characterization and biological activities of watersoluble sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* [ J ]. Food science and Biotechnology, 2010, 19(2): 525-533.
- [ 14 ] 齐晓辉,李红燕,郭守东,等.4种不同来源浒苔中多糖的提取分离及理化性质 [ J ]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(5): 15-18.
- [ 15 ] AGUILERA-MORALES M, CASAS-VALDEZ M, CARRILLO-DOMÍNGUEZ S, et al. Chemical composition and microbiological assays of marine algae *Enteromorpha* spp. as a potential food source [ J ]. Journal of Food Composition and Analysis, 2005, 18(1): 79-88.
- [ 16 ] TIWARI B K, TROY D J. Seaweed sustainability-food and nonfood applications [ M ]. Netherlands: Elsevier Inc. 2015: 125-140.
- [ 17 ] 李晓,王颖,吴志宏,等.浒苔对刺参幼参生长影响的初步研究 [ J ]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 1092-1099.
- [ 18 ] 周峙苗,何清,马晓宇,等.东海红藻龙须菜的营养成分分析及评价 [ J ]. 食品科学, 2010, 31(9): 284-287.
- [ 19 ] 杨欢,黎中宝,李元跃,等.厦门海域浒苔种类鉴定及其营养成分分析 [ J ]. 中国渔业质量与标准, 2013, 3(4): 70-75.
- [ 20 ] GALAN A, 张威, 苏秀榕, 等. 浒苔和龙须菜营养成分的研究 [ J ]. 水产学报, 2010, 29(6): 329-333.
- [ 21 ] 徐大伦.浒苔主要化学组分的分析及多糖活性的研究 [ D ]. 硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2004.
- [ 22 ] 张敏,李瑞霞,伊纪峰,等.4种经济海藻脂肪酸组成分析 [ J ]. 海洋科学, 2012, 36(4): 7-12.
- [ 23 ] 宋恭帅,张蒙娜,彭茜,等.不同贮藏温度下鱼油品质的变化 [ J ]. 食品科学, 2018, 39(21): 237-244.
- [ 24 ] 缪芳芳,丁媛,蔺佳良,等.应用电子鼻和气质联用仪研究不同采收季节浒苔的挥发性物质 [ J ]. 现代食品科技, 2014, 30(8): 258-263.
- [ 25 ] 张敏.五种经济海藻代谢成分及代谢机制的初步研究 [ D ]. 硕士学位论文.苏州:苏州大学,2011.
- [ 26 ] 张敏,丁洪流,金琦,等.5种不同种属经济海藻挥发性成分的比较分析 [ J/OL ]. 食品工业科技, 2019

- [2019-06-03].<http://www.cnki.net/KCMS/detail/11.1759.TS.20190530.1524.100.html>.
- [27] 宋绍华,裘迪红.浒苔挥发性风味成分分析[J].食品科学,2012,33(12):177-180.
- [28] 伊纪峰,朱建一,韩晓磊,等.HS-SPME-GC/MS 联用检测红毛菜中的挥发性成分[J].南京师大学报(自然科学版),2009,32(2):103-107.
- [29] 宋绍华.浒苔挥发性风味成分及其在加工过程中的变化分析[D].硕士学位论文.宁波:宁波大学,2013.
- [30] 禹海文,苏秀榕,张丽媛,等.气-质联用和电子鼻对浒苔苦味的研究[J].中国食品学报,2012,12(7):212-215.
- [31] 费岚.浒苔生物质降解优化条件及发酵生产乙醇研究[D].硕士学位论文.上海:上海海洋大学,2014.
- [32] 林建云,陈维芬,贺青,等.福建沿岸海域浒苔藻类的营养成分含量与食用安全[J].台湾海峡,2011,30(4):570-576.
- [33] 贺凤伟.渤海沿海几种速生海藻无机营养元素的分析[J].锦州师范学院学报(自然科学版),2002,23(1):33-36.
- [34] 刘智禹,吴靖娜,李琳,等.浒苔对镉、铅和铝的生物富集动力学研究[J].现代食品科技,2014,30(10):154-158,211.
- [35] 张晨,和庆,张灏祺,等.江苏沿海浒苔中重金属含量及食用风险分析[J].海洋环境科学,2018,37(3):403-408.
- [36] 宋雪原,郭秀春,周文辉,等.浒苔水溶性多糖的组成及其生物活性研究[J].时珍国医国药,2010,21(10):2448-2450.
- [37] YUAN Y, XU X, JING C L, et al. Microwave assisted hydrothermal extraction of polysaccharides from *Ulva prolifera*: functional properties and bioactivities [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 181: 902-910.
- [38] ZHAO X, XUE C H, LI Z J, et al. Antioxidant and hepatoprotective activities of low molecular weight sulfated polysaccharide from *Laminaria japonica* [J]. Journal of Applied Phycology, 2004, 16(2): 111-115.
- [39] ZHOU J, HU N, WU Y L, et al. Preliminary studies on the chemical characterization and antioxidant properties of acidic polysaccharides from *Sargassum fusiforme* [J]. Journal of Zhejiang University: Science B, 2008, 9(9): 721-727.
- [40] RUPÉREZ P, AHRAZEM O, LEAL J A. Potential antioxidant capacity of sulfated polysaccharides from the edible marine brown seaweed *Fucus vesiculosus* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(4): 840-845.
- [41] YAMAMOTO Y, NUNOME T, YAMAUCHI R, et al. Structure of an exocellular polysaccharide of *Lactobacillus helveticus* TN-4, a spontaneous mutant strain of *Lactobacillus helveticus* TY1-2 [J]. Carbohydrate Research, 1995, 275(2): 319-332.
- [42] INAL M E, KANBAK G, SUNAL E. Antioxidant enzyme activities and malondialdehyde levels related to aging [J]. Clinica Chimica Acta, 2001, 305(1/2): 75-80.
- [43] 李锋,蔡振辉,陈金梅,等.浒苔多酚的抗氧化及改善胰岛素抵抗作用[J].现代食品科技,2016,32(8):34-41.
- [44] TANG Z H, GAO H W, WANG S, et al. Hypolipidemic and antioxidant properties of a polysaccharide fraction from *Enteromorpha prolifera* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 58: 186-189.
- [45] 马淑慧.羟基自由基和超氧阴离子自由基测定的荧光分析法研究[D].硕士学位论文.泰安:山东农业大学,2009.
- [46] LI B, LIU S, XING R E, et al. Degradation of sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* and their antioxidant activities [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 92(2): 1991-1996.
- [47] QIAO D L, KE C L, HU B, et al. Antioxidant activities of polysaccharides from *Hyriopsis cumingii* [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(2): 199-204.
- [48] SHI M J, WEI X Y, XU J, et al. Carboxymethylated degraded polysaccharides from *Enteromorpha prolifera*: preparation and *in vitro* antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2017, 215: 76-83.
- [49] 杨青春,王凯,陈绍红,等.浒苔多糖的分离纯化及其对小鼠淋巴细胞活性的影响[J].中国海洋药物,2015,34(6):41-48.
- [50] 杨青春,庞怡,陈绍红,等.浒苔多糖 EP2 对小鼠免疫功能的影响[J].中国海洋药物,2018,37(3):41-47.
- [51] ZHANG Z S, WANG X M, ZHAO M X, et al. The immunological and antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Enteromorpha linza* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 57: 45-49.
- [52] 毕梅生.浒苔多糖对腹腔脓毒症大鼠的免疫调理作用[J].华北煤炭医学院学报,2010,12(6):775-776.
- [53] LE CABEC V, CARRÉNO S, MOISAND A, et al. Complement receptor 3 (CD11b/CD18) mediates

- type I and type II phagocytosis during nonopsonic and opsonic phagocytosis, respectively [J]. *The Journal of Immunology*, 2002, 169(4):2003–2009.
- [54] OPANASOPIT P, HIGUCHI Y, KAWAKAMI S, et al. Involvement of serum mannan binding proteins and mannose receptors in uptake of mannosylated liposomes by macrophages [J]. *Biochimica et Biophysica Acta: Biomembranes*, 2001, 1511(1):134–145.
- [55] KIM J K, CHO M L, KARNJANAPRATUM S, et al. *In vitro* and *in vivo* immunomodulatory activity of sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2011, 49(5):1051–1058.
- [56] JAIN K S, KATHIRAVAN M K, SOMANI R S, et al. The biology and chemistry of hyperlipidemia [J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2007, 15(14):4674–4699.
- [57] 陈婕, 林文庭. 复方浒苔多糖降血脂及抗脂质过氧化作用研究 [J]. *大连医科大学学报*, 2015, 37(1):9–12.
- [58] REN R D, GONG J J, ZHAO Y Y, et al. Sulfated polysaccharide from *Enteromorpha prolifera* suppresses *SREBP-1c* and *ACC* expression to lower serum triglycerides in high-fat diet-induced hyperlipidaemic rats [J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 40:722–728.
- [59] KIM K H. Regulation of mammalian acetyl-coenzyme a carboxylase [J]. *Annual Review of Nutrition*, 1997, 17:77–99.
- [60] BIANCHI A, EVANS J L, IVERSON A J, et al. Identification of an isozymic form of acetyl-CoA carboxylase [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1990, 265(3):1502–1509.
- [61] OH S Y, PARK S K, KIM J W, et al. Acetyl-CoA carboxylase  $\beta$  gene is regulated by sterol regulatory element-binding protein-1 in liver [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2003, 278(31):28410–28417.
- [62] LI Y, XU S Q, MIHAYLOVA M M, et al. AMPK phosphorylates and inhibits SREBP activity to attenuate hepatic steatosis and atherosclerosis in diet-induced insulin-resistant mice [J]. *Cell Metabolism*, 2011, 13(4):376–388.
- [63] REN R D, GONG J J, ZHAO Y Y, et al. Sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* suppress *SREBP-2* and *HMG-CoA* reductase expression and attenuate non-alcoholic fatty liver disease induced by a high-fat diet [J]. *Food & Function*, 2017, 8(5):1899–1904.
- [64] GANESAN K, KUMAR K S, RAO P V S, et al. Studies on chemical composition of three species of *Enteromorpha* [J]. *Biomedicine & Preventive Nutrition*, 2014, 4(3):365–369.
- [65] MAMATHA B S, NAMITHA K K, SENTHIL A, et al. Studies on use of *Enteromorpha* in snack food [J]. *Food Chemistry*, 2007, 101(4):1707–1713.
- [66] 刘晨. 通过蛋白修饰改善浒苔原料品质的研究 [D]. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [67] 林英庭, 宋春阳, 薛强, 等. 浒苔对猪生长性能的影响及养分消化率的测定 [J]. *饲料研究*, 2009(3):47–49.
- [68] 胡静, 朱亚骏, 朱风华, 等. 浒苔对生长育肥猪消化能及养分消化率的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2015, 51(3):29–32.
- [69] 徐安乐, 黎中宝, 上官静波, 等. 发酵浒苔对珍珠龙胆石斑鱼生长、非特异性免疫及消化酶活性的影响 [J]. *海洋学报*, 2018, 40(4):96–105.
- [70] 徐安乐, 胡晓伟, 黎中宝, 等. 饲料中添加超微粉碎浒苔对珍珠龙胆石斑鱼生长、非特异性免疫及消化酶活性的影响 [J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(12):37–45.
- [71] YANG H, LI Z B, CHEN Q, et al. Effect of fermented *Enteromorpha prolifera* on the growth performance, digestive enzyme activities and serum non-specific immunity of red tilapia (*Oreochromis mossambicus*  $\times$  *Oreochromis niloticus*) [J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(12):4024–4031.
- [72] ASINO H, AI Q H, MAI K S. Evaluation of *Enteromorpha prolifera* as a feed component in large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*, Richardson, 1846) diets [J]. *Aquaculture Research*, 2011, 42(4):525–533.
- [73] 朱风华, 王利华, 林英庭. 浒苔粉对肉鸭生长性能、免疫器官指数及血清生化指标的影响 [J]. *中国畜牧杂志*, 2017, 53(5):73–77.
- [74] 孙建凤, 宋宏立, 赵军, 等. 饲料中不同浒苔水平对肉鸡养分利用率和消化酶活性的影响 [J]. *动物营养学报*, 2010, 22(6):1658–1664.
- [75] 赵军, 林英庭, 孙建凤, 等. 饲料中不同水平浒苔对蛋鸡蛋黄品质、抗氧化能力和血清生化指标的影响 [J]. *动物营养学报*, 2011, 23(3):452–458.
- [76] MICHALAK I, CHOJNACKA K, DOBRZA ŃSKI Z, et al. Effect of macroalgae enriched with microelements on egg quality parameters and mineral content of eggs, eggshell, blood, feathers and droppings [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2011, 95(3):374–387.

## Research Progress on Constitutes of *Ulva prolifera* Extract and Their Biological Function

LI Xiang<sup>1</sup> ZHOU Xihong<sup>2</sup> ZHAO Yurong<sup>1\*</sup>

(1. College of Animal Science, Hunan Agricultural University, Hunan Co-Innovation Center of Animal Production Safety, Changsha 410128, China; 2. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

**Abstract:** *Ulva prolifera* extract consisted of polysaccharides, proteins, amino acids, fatty acids, volatile substances, minerals, and so on. They have many functions, such as anti-oxidation, improving immune response and hypolipidemic potential, and consequently have great potential for the application as feed additive. In this paper, the major chemical composition of *Ulva prolifera* extract, as well as their biological function and potential application as feed additive were reviewed in order to provide reference for the utilization of *Ulva prolifera* extract. [ *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(12):5468-5475 ]

**Key words:** *Ulva prolifera*; component analysis; biological function; feed application