

童艳梅, 马华威, 胡庭俊, 等. 长茎葡萄蕨藻的组成成分及功能特性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 400-406. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030070

TONG Yanmei, MA Huawei, HU Tingjun, et al. Research Progress in the Components and Functional Characteristics of *Caulerpa lentillifera*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 400-406. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030070

· 专题综述 ·

长茎葡萄蕨藻的组成成分及功能特性 研究进展

童艳梅¹, 马华威², 胡庭俊¹, 刘青云^{2,3}, 李强勇^{2,3}, 陈秀荔², 杨春玲², 彭敏², 朱威霖², 赵永贞^{2,3,*}

(1. 广西大学动物科学技术学院, 广西南宁 530005;

2. 广西壮族自治区水产科学研究院广西水产遗传育种与健康养殖重点实验室, 广西南宁 530021;

3. 广西虾类繁育工程技术研究中心, 广西南宁 530021)

摘要: 随着科学技术的发展以及陆地资源的日益殆尽, 人们逐渐将目光转向海洋资源, 长茎葡萄蕨藻作为一种高蛋白高膳食纤维的海藻而备受关注。长茎葡萄蕨藻营养丰富, 含有多种活性物质, 具有免疫调节、抗炎、抗微生物以及降血糖血脂等多种生物活性功能, 拥有巨大的潜在药用价值。本文总结了长茎葡萄蕨藻的组成成分及其主要活性功能的最新研究, 发现现有的研究主要集中在营养成分、人工养殖和环境应用上, 对长茎葡萄蕨藻活性成分的了解还不全面。目前, 学者们对长茎葡萄蕨藻中的酚类和黄酮类物质的研究仅处于含量测定阶段, 多糖和藻红素的提取方法和活性功能也有待进一步优化和发掘。后续本文应当对长茎葡萄蕨藻的活性成分进行深入的开发, 明确其结构与活性功能之间的关系, 并探究具体的活性功能机制, 以发掘长茎葡萄蕨藻的药物潜力。

关键词: 长茎葡萄蕨藻, 营养成分, 功能特征, 多糖, 藻红素

中图分类号: S932.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)07-0400-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030070



本文网刊:

Research Progress in the Components and Functional Characteristics of *Caulerpa lentillifera*

TONG Yanmei¹, MA Huawei², HU Tingjun¹, LIU Qingyun^{2,3}, LI Qiangyong^{2,3}, CHEN Xiuli²,
YANG Chunling², PENG Min², ZHU Weilin², ZHAO Yongzhen^{2,3,*}

(1. College of Animal Science and Technology, Guangxi University, Nanning 530005, China;

2. Guangxi Academy of Fishery Sciences, Guangxi Key Laboratory of Aquatic Genetic Breeding and Healthy
Aquaculture, Nanning 530021, China;

3. Guangxi Shrimp Breeding Engineering Technology Research Center, Nanning 530021, China)

Abstract: With the development of science and technology and the depletion of land resources, marine resources have been paid more and more attention gradually. *Caulerpa lentillifera* has been paid attention with high protein and dietary fiber. *Caulerpa lentillifera* is rich in nutrient, contains a variety of active substances, and has a variety of biological functions, such as immune regulation, anti-inflammation, anti-microbial, reducing blood sugar and blood lipids. It has a great potential medicinal value. In this paper, the latest studies on the components and functional characteristics of *Caulerpa lentillifera* are summarized, and it is found that the existing studies are mainly focus on nutrition, artificial culture and environmental application, but the exploration of the active components of *Caulerpa lentillifera* is not comprehensive. At present, scholars' research on phenols and flavonoids in *Caulerpa lentillifera* is only in the preliminary stage of content determination, and the

收稿日期: 2021-03-08

基金项目: 广西科技计划项目“南美白对虾与长茎葡萄蕨藻工厂化生态共养模式研究”(桂科 AB18221113); 国家现代农业产业技术体系广西创新团队建设任务书(nycytxgxttd-14-01)。

作者简介: 童艳梅(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 中药免疫药理学研究, E-mail: tongyanmei1996@163.com。

* 通信作者: 赵永贞(1978-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 遗传育种, E-mail: fisher1152002@126.com。

extraction methods and active functions of polysaccharides and *Caulerpin* need to be further optimized and explored. In the future, in order to explore the drug potential of *Caulerpa lentillifera*, the active components of *Caulerpa lentillifera* should be deeply developed, the relationship between its structure and active function should be clarified, and its specific active function mechanism should be explored.

Key words: *Caulerpa lentillifera*; nutritional composition; functional characteristics; polysaccharides; caulerpin

长茎葡萄蕨藻(*Caulerpa lentillifera*)又名凸镜状蕨藻,是绿藻门中蕨藻属的重要成员,因其直立茎球状体晶莹剔透、圆润饱满似葡萄,也被称为“海葡萄”。此外,作为一种多年生大型可食用海藻,长茎葡萄蕨藻色泽鲜绿,藻体软嫩多汁,口感如鱼子酱般丰富,又得名“绿色鱼子酱”^[1],常被蘸酱料生食或拌做沙拉。长茎葡萄蕨藻以其高蛋白高膳食纤维著称,味道鲜美,含热量极低,富含钙、钾、镁、铁等人体必须的矿物元素和大量的多不饱和脂肪酸,是非常理想的保健食品。

长茎葡萄蕨藻 1837 年首次被人们记录,因其对养殖、储存和运输条件较为苛刻,内陆以及淡水地区对其了解较少^[2]。随着科学技术的进步,近十年来人们对长茎葡萄蕨藻的关注度不断提高。学者们发现,长茎葡萄蕨藻不仅能净化养殖废水^[3-4]、打造生物滤池^[5]、吸附重金属^[6]和染料^[7-8]、制作化妆品^[9]等,还具有免疫调节、抗炎镇痛、抗微生物以及降血糖等多种生物活性功能^[10],是一种可利用价值很高的海藻,具有巨大的药用潜力。本文就长茎葡萄蕨藻的组成成分及其主要活性功能的最新研究做出总结,以期进一步了解长茎葡萄蕨藻,为更好地研发新的生物类新药提供参考。

1 长茎葡萄蕨藻的营养成分

1.1 基本营养成分

长茎葡萄蕨藻中具有丰富的营养成分,是一种高蛋白高膳食纤维的高级料理,也是同属总状蕨藻花序变种(*Caulerpa racemosa* var. *laetevirens*)和总状蕨藻大叶变种(*Caulerpa racemosa* var. *clavifera* f. *macrophyssa*)中营养成分最高最符合人类食用的蕨藻^[11]。就目前的研究来看,长茎葡萄蕨藻的碳水化合物含量占干重 34.00%~64.97%^[11-17],粗纤维含量占干重的 1.91%~12.98%^[11-17],粗脂肪占干重的 0.81%~4.40%^[11-19],蛋白含量占干重的 9.22%~19.38%^[11-18],灰分含量占干重的 24.00%~56.08%^[11-18],维生素 E 含量为 0.22~0.31 mg/kg^[14, 17],维生素 C 含量为 3.47~5.03 mg/kg^[15, 17];共检出约 16 种氨基酸,包括 7 种必需氨基酸和 9 种非必需氨基酸,但色氨酸作为人体所必需的八大氨基酸之一,在各项研究中却均未见检出,学者们猜测这可能是由于色氨酸含量偏低,在使用浓盐酸进行氨基酸分析时色氨酸已被水解。多项研究表明,长茎葡萄蕨藻中的必需氨基酸/非必需氨基酸(EAA/NEAA)为 54.36%~69.75%,必需氨基酸/总氨基酸(EAA/TAA)为 35.22%~48.19%^[13-15, 17-19],这非常接近于 FAO/WHO 推荐的理想蛋白的氨基酸

组成模式(当 EAA/NEAA 接近 60%,EAA/TAA 接近 40% 时,蛋白氨基酸组成最佳);研究还表明,长茎葡萄蕨藻中约含有 30 种脂肪酸,其中饱和脂肪酸含量为 29.13%~63.66%,单不饱和脂肪酸含量为 14.23%~37.05%,多不饱和脂肪酸 16.76%~38.07%^[11, 13-15, 17, 19]。此外,长茎葡萄蕨藻还含有多多种矿物元素(见表 1),包括 4 种常量元素,13 种微量元素和 5 种毒性元素。Na 含量在各项研究中均为最高,Na/K 比值在 1.78~7.80 范围内,远高于红藻和褐藻的 Na/K 比值。但过高的钠钾比会打破机体中的钠钾平衡,从而导致高血压,糖尿病和心脑血管等疾病,因此建议在食用长茎葡萄蕨藻时进行脱盐处理(如进行反复清洗和浸泡等),也可以搭配其他低钠低钾的食物食用。

不同的报道中长茎葡萄蕨藻营养成分的含量有较大差异,个别成分含量甚至相差 200 倍之多,其原因可能是蕨藻属的物种大多表现出多态性和可塑性,生长于各地的长茎葡萄蕨藻所处的水质、盐度、温度以及光照强度均有差异,从而影响了藻体中营养物质及光合产物的积累,最终导致含量差异^[12,20]。长茎葡萄蕨藻的水分含量较高,可占鲜藻质量的 87.05%~95.95%,因此学者们常使用干燥后的藻体进行含量

表 1 长茎葡萄蕨藻中的矿物元素含量
Table 1 Content of mineral elements in *Caulerpa lentillifera*

项目	元素	含量(mg/kg)	参考文献
常量元素	钠(Na)	883.49~240000	[12-15, 17-18]
	钾(K)	97~15430	
	镁(Mg)	63~20600	
	钙(Ca)	78~8960	
	锰(Mn)	0.79~295.5	
	铁(Fe)	0.93~197.30	
	锌(Zn)	2.6~68.29	
	铜(Cu)	0.1~9.35	
	铬(Cr)	0.28~12.76	
	砷(As)	3.7~6.45	
微量元素	镍(Ni)	0.10~7.07	[14]
	锶(Sr)	155.646	
	铷(Rb)	0.22~2.57	
	钒(V)	0.21~0.32	
	硒(Se)	0.10~7.53	
	钼(Mo)	0.29~0.35	
	锡(Sn)	0.46	
	镉(Cd)	0.36~0.79	
	铅(Pb)	0.94~1.23	
	汞(Hg)	0.49	
毒性元素	锂(Li)	1.67~2.15	[14, 17]
	镓(Ga)	0.11~0.15	

测定。有研究发现,经冷冻干燥处理的长茎葡萄蕨藻中没食子酸的含量显著高于热干燥的处理方法,这提示不同的干燥处理方法可能也是影响长茎葡萄蕨藻中活性成分含量的重要因素之一^[16]。

1.2 长茎葡萄蕨藻的活性成分

1.2.1 多糖 人们对长茎葡萄蕨藻的研究起步较晚,多糖作为其主要的活性成分,近十年来成为学者们首要研究的重点。学者们通过红外光谱、高效液相色谱和核磁共振分析等方法确定长茎葡萄蕨藻多糖中存在的单糖组分以及结构,发现其主要由甘露糖、半乳糖和木糖组成,少数还含有葡萄糖和葡萄糖胺(见表2)。Long等^[21]用浓度为25%、40%、55%、70%和85%乙醇分别沉淀得到WCLP-25、WCLP-40、WCLP-55、WCLP-70和WCLP-85,他发现随着乙醇浓度的增加,长茎葡萄蕨藻多糖的相对分子质量和葡萄糖含量逐渐降低,甚至在WCLP-70和WCLP-85中没有检测到葡萄糖单糖的存在(见表2)。Sun等^[22]用不同摩尔浓度的NaCl对长茎葡萄蕨藻粗多糖进行洗脱,得到四种不同的多糖组分,其分子量和多糖组分也不尽相同。这说明长茎葡萄蕨藻多糖中单糖组成、结构以及相对分子质量的差异,不仅取决于长茎葡萄蕨藻的产地,还与多糖的提取方法和提取参数有关^[23]。目前长茎葡萄蕨藻多糖的提取方式较为单一,主要有水提取法、碱提取法和超声波辅助提取法,多糖提取率为3.21%~3.44%^[21-22, 24]。

长茎葡萄蕨藻多糖是硫酸化多糖,大多数研究认为其主要结构是糖醛酸^[21],但Sun等^[22]发现长茎葡萄蕨藻的精制组分CLGP4中的主要结构却是硫酸盐基团,他对这种现象进行了后续的研究,指出这种结构上的差异使CLGP4比其他组分具有更强的

抗炎活性^[25],这说明多糖的生物活性会随着结构的改变而改变。因此,除了天然存在的硫酸化多糖,科学家还会利用物理、化学或者生物的方法对多糖的结构进行修饰,从而增强其生物活性^[26],但海藻多糖硫酸化修饰的研究相对较少。目前,人们对长茎葡萄蕨藻多糖的结构研究处于起步阶段,其精细结构尚不明确,仍有较大的研究空间。

1.2.2 蕨藻红素 蕨藻红素(Caulerpin)是一种红色的双吡啶生物碱,具有促进植物生长、抗糖尿病、镇痛消炎、抗肿瘤、抗疱疹、抗结核、抗微生物以及免疫刺激等活性功能^[30-31]。蕨藻红素于1968年在蕨藻属中首次被发现^[32],其广泛存在于总状蕨藻(*Caulerpa racemosa*)、管状蕨藻(*Caulerpa prolifera*)和棒叶蕨藻(*Caulerpa sertularioides*)等蕨藻中^[33-34]。Nagappan等^[11]在长茎葡萄蕨藻中发现一种红色的活性物质,并证实这种物质就是蕨藻红素(图1)。向红波等^[33]也在长茎葡萄蕨藻中分离到了蕨藻红素,他用料液比1:30(g:mL)以及85%的乙醇浓度,在45℃下用200W的微波功率萃取20min,发现长茎葡萄蕨藻中蕨藻红素的平均提取率为91.9%,这与在同属的其他蕨藻中蕨藻红素的提取率相似。但学者们对蕨藻红素的研究多以总状蕨藻作为原料,从长茎葡萄蕨藻中提取蕨藻红素的报道较少,这可能与长茎葡萄蕨藻苛刻的保存运输条件有关。

1.2.3 酚类 酚类物质具有较强的抗氧化能力,其广泛存在于各种海藻中,是海藻发挥抗氧化作用的重要物质基础之一。Nguyen等^[16]以95%的乙醇为溶剂制备长茎葡萄蕨藻提取物,发现冷冻干燥后提取物中总酚含量为2.04 mg/g,但目前尚未见有关于长茎葡萄蕨藻中酚类物质的种类、结构和氧化机制等研究

表2 长茎葡萄蕨藻多糖的单糖组分以及结构特征

Table 2 Monosaccharide components and structural characteristics of polysaccharides in *Caulerpa lentillifera*

名称	相对分子质量 (kDa)	单糖组成					结构特征	参考文献
		甘露糖Man	半乳糖Gal	木糖Xyl	葡萄糖Glc	N-乙酰葡萄糖胺 GlcNAc		
CLGP1	2589.9	48.26	33.43	18.31	—	—	\	
CLGP2	4068.5	45.93	37.19	16.87	—	—	\	
CLGP3	3798.4	46.01	33.01	20.97	—	—	\	
CLGP4	3877.8	38.73	43.23	18.04	—	—	由 β -(1 $\rightarrow$ 4)-Man _p , $\rightarrow$ 2,4) Man _p (1 $\rightarrow$, β -(1 $\rightarrow$ 2)-Man _p , β -(1 $\rightarrow$ 3)-Gal _p , β -(1 $\rightarrow$ 4)- Xyl _p , 末端 β -Gal _p 和末端 β - Xyl _p 残基组成	[22, 25]
WCLP-25	13531.72	28.38	49.93	—	21.69	—	\	
WCLP-40	10340.46	37.38	39.64	13.32	9.66	—	\	
WCLP-55	9306.15	39.02	41.71	14.09	5.18	—	\	[21]
WCLP-70	8930.17	41.42	42.42	16.15	—	—	\	
WCLP-85	5184.97	52.34	28.47	—	—	19.19	\	
SP1	>100	—	44.2	49.3	2.2	—	\	[27]
CLP-1	115	—	29.8	59.8	2.5	—	主要为 β 构型糖苷键,含有 少量 α 构型的糖苷键	[28]
-(粗水提物)	\	\	\	\	\	\	β -1,3-葡聚糖	[29]

注:—未检测出该成分; \此项未检测。

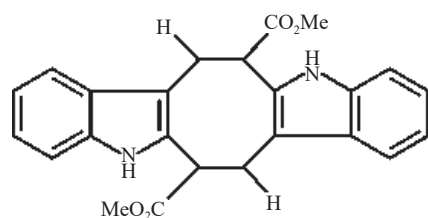


图 1 长茎葡萄蕨藻中蕨藻红素的化学结构

Fig.1 Chemical structure of caulerpin in *Caulerpa lentillifera*

报道。

1.2.4 黄酮类 黄酮类物质是植物及海藻中一类重要的天然有机化合物,其种类多,结构复杂,具有多种重要的药理功能。长茎葡萄蕨藻中也含有黄酮类物质,Yap 等^[35]的研究结果表明,长茎葡萄蕨藻的乙醇提取物中黄酮类化合物的含量为 4.93 mg/g,但远低于相同提取方法下总状蕨藻黄酮的含量(24.52 mg/g)。或许正是由于黄酮含量的差异,学者们对总状蕨藻黄酮类物质的研究远远多于长茎葡萄蕨藻,目前的研究仅测定了长茎葡萄蕨藻黄酮类物质的含量,其种类、结构以及活性机制等尚未探究。

1.2.5 其他活性成分 蕨藻属的物种含有许多化学成分,如生物碱、甾类、苯丙类、脂类以及吡啶类^[36],但除了多糖、蕨藻红素、酚类和黄酮类物质,几乎没有文献资料可查阅到长茎葡萄蕨藻中含有其他化学成分。这表明人们对长茎葡萄蕨藻的研究尚处于起步阶段,还有许多潜在的活性物质未被发现。

2 长茎葡萄蕨藻的主要活性功能

2.1 免疫调节功能

免疫调节是机体的重要防御机制之一,在维持机体健康与平衡方面有着重要的作用。巨噬细胞作为防御外来侵袭的第一道防线,是机体发挥先天免疫调节的关键细胞。长茎葡萄蕨藻不仅能增强巨噬细胞的增殖能力、吞噬活性和酸性磷酸酶活性,还能有效促进白细胞介素 6(interleukin, IL-6)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)、白细胞介素 1 β (interleukin, IL-1 β)和一氧化氮(nitric oxide, NO)的合成和分泌^[22, 37]。Maeda 等^[27]通过蛋白免疫印迹技术和 RT-PCR 分析,发现纯化后的长茎葡萄蕨藻多糖 SP1 能导致小鼠 RAW-264.7 巨噬细胞中的 I κ B- α 降解以及核因子 NF- κ B 亚基 p65 的核转移,还能增加 p38 丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)的磷酸化,这表明 SP1 可能通过 NF- κ B 和 MAPK 两条信号通路途径激活巨噬细胞来介导机体的免疫调节功能。此外,Sun 等^[38]还发现,长茎葡萄蕨藻多糖能通过调节环磷酸腺苷诱导的免疫抑制 BALB/c 小鼠的肠道菌群,引起结肠粘膜反应,继而激活血液、胸腺和脾脏的系统免疫。

2.2 抗炎活性

当组织的完整性被破坏后,受损组织对外界的

刺激会产生炎症反应,受损细胞以及多种免疫细胞将产生各种化学介质,导致机体表现出红、肿、热、痛等症状。Sun 等^[25]发现,长茎葡萄蕨藻多糖对 LPS 诱导的 HT29 细胞具有显著的抗炎作用,包括显著抑制 IL-1 β 、TNA- α 、分泌型免疫球蛋白 A 和粘蛋白 2 的产生,并下调 IL-1 β 和 TNA- α 的表达。长茎葡萄蕨藻中的蕨藻红素也同样具有抗炎活性,Nagappan 等^[11]通过酶联免疫吸附测定,指出蕨藻红素能以剂量依赖性方式抑制脂多糖(lipopolysaccharide, LPS)激活的小鼠 RAW264.7 巨噬细胞中促炎因子的释放,从而刺激机体产生免疫反应。

2.3 抗微生物活性

抗微生物活性是指能抑制或者杀灭致病微生物的能力,包括细菌、真菌、病毒等。Faeczah 等^[39]首先用长茎葡萄蕨藻的水提取物和甲醇提取物进行实验,发现两者对口腔中的金黄色葡萄球菌和变形链球菌都有很好的抑制作用,且当提取物浓度为 50 mg/mL 时,两者对变形链球菌的抑菌活性均明显高于金黄色葡萄球菌。Saito 等^[40]指出长茎葡萄蕨藻的乙醇提取物比水提取物和甲醇提取物有更高的抗真菌活性,能显著抑制嗜热链霉菌、萨巴氏菌和米氏梭菌。还有学者发现长茎葡萄蕨藻多糖对肠道中特定的菌群有促进或抑制的作用,例如能促进乳酸杆菌、结肠杆菌、瘤胃菌、梭状芽孢杆菌 XVIII 和幽门螺杆菌的生长,但抑制拟杆菌、巴恩斯氏菌和毛螺菌的繁殖,并且通过这些菌群的变化激活免疫抑制小鼠的免疫反应^[38]。此外,Yap 等^[35]比较了总状蕨藻和长茎葡萄蕨藻的抗菌活性,他发现两种藻类的氯仿提取物和甲醇提取物对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌和神经致病性大肠杆菌都具有一定的抑制作用,但总状蕨藻的氯仿提取物抑菌效果相对最佳。

2.4 降血糖、血脂活性

糖尿病是一组胰腺内分泌障碍的疾病,当胰腺无法产生足够的胰岛素或人体无法有效使用其产生的胰岛素时,就会发生糖尿病,其常见的症状为血糖升高。Abouzid 等^[41]对埃及植物和藻类进行研究,指出长茎葡萄蕨藻有显著的降血糖活性。Sharma 等^[42]也发现长茎葡萄蕨藻提取物能显著降低 db/db 小鼠的空腹血糖、糖耐量、血浆胰岛素、稳态模型胰岛素抵抗指数、TNA- α 、IL-6、游离脂肪酸、甘油三酯、总胆固醇水平以及肝糖原含量,还能增强胰岛素受体、蛋白激酶 B(protein kinase B, AKT)、磷脂酰肌醇 3 激酶(phosphatidylinositol 3 kinase, PI3K)和葡萄糖转运蛋白 4 等关键效应分子的活性,从而通过 PI3K/AKT 途径分别调节肌细胞和 db/db 小鼠的葡萄糖摄取和体内稳态。虽然长茎葡萄蕨藻不具有促胰岛素分泌的作用^[41],但其提取物能抑制蛋白酪氨酸磷酸酶,保护胰腺 β 细胞,并增强脂肪细胞中的胰岛素的信号传导^[43],可作为后续抗糖尿病药物的开发。

肥胖问题也是近年来科学家们关注的重点之

一。Matanjun 等^[44]用高胆固醇/高脂肪的日粮饲喂大鼠,发现在日粮中添加 5% 长茎葡萄蕨藻后,大鼠体重增长率比不添加的降低了 39.6%,且能显著降低血浆总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇和甘油三酯水平,以及提高高密度脂蛋白水平,表明长茎葡萄蕨藻有良好的降血脂和降低血浆总胆固醇的活性。

2.5 抗癌活性

肿瘤是指人体内某细胞异性生长,在局部形成肿块的一种疾病,可分为良性肿瘤和恶性肿瘤两种类型,其中恶性肿瘤也称为癌症。Maeda 等^[37]以长茎葡萄蕨藻为原料制备 β -1,3-木聚糖寡糖,他发现这种寡糖能呈剂量依赖性地抑制人乳腺癌 MCF-7 细胞活性,并诱导染色质浓缩和聚腺苷二磷酸核糖聚合酶降解,最终诱导 MCF-7 细胞凋亡,这表明长茎葡萄蕨藻具有一定的抗癌活性。目前关于长茎葡萄蕨藻抗癌活性的报道较少,人们发现在同属的其他蕨藻中,蕨藻炔、蕨藻红素、花椰菜素和消旋菌素等物质都对癌细胞都有明显的抑制作用,它们能通过与信号蛋白相互作用,影响微管动力、未折叠蛋白反应、线粒体、细胞周期、代谢和应激等通路途径^[45],从而发挥抗癌活性,这或许可以为研究长茎葡萄蕨藻的抗癌活性提供借鉴。

2.6 其他活性

长茎葡萄蕨藻含有多糖、蕨藻红素、黄酮和多酚等多种活性成分,具有许多潜在的活性功能,近年来成为各领域关注的热点。抗氧化活性是海藻中最常见的功能特性,Nguyen 等^[16]和 Tian 等^[46]分别对长茎葡萄蕨藻的酚类和多糖进行实验,发现两者都有清除 DPPH 自由基和还原三价铁离子等能力,具有良好的抗氧化活性。有学者用狗作为实验动物,发现长茎葡萄蕨藻水提取物具有与阿司匹林相似的抗凝血作用,能延长凝血时间,且这种作用具有剂量依赖性,进而推测长茎葡萄蕨藻具有抗凝血活性可能与其含有丰富的硫酸化多糖有直接关系^[47],但目前没有实验数据支持这一推测。

最新研究发现,蕨藻属的藻类还具有成骨^[48-49]、杀虫^[50]、抗尿石症^[51]、减少酒精导致的胃损伤^[52]以及影响中枢神经肽 Y 表达^[53]等活性功能,但长茎葡萄蕨藻由于开发时间较晚,活性研究尚处于起步阶段,因此是否具有上述活性功能还不得而知,有待学者们进一步探究。

3 结论与展望

长茎葡萄蕨藻具有独特的口感和丰富的营养,自古就被亚洲沿海地区的人们当作饭桌上的佳肴。由于长茎葡萄蕨藻对储存、运输和养殖的要求较为严苛,因此对它的开发和研究较为缓慢。目前人们对长茎葡萄蕨藻的营养成分已有较为全面的了解,但对长茎葡萄蕨藻活性成分及其功能方面的相关研究还较少。多糖是长茎葡萄蕨藻中公认的活性成分,但其提取方法和精细结构还有待优化和探究。此外,部分

研究提及长茎葡萄蕨藻中含有蕨藻红素、酚类和黄酮类物质,但这些物质的研究尚处在初步研究阶段,如提取和含量测定等,各个化合物所含的种类和结构等信息均不清楚。近几年的研究表明,长茎葡萄蕨藻提取物具有免疫、抗氧化、抗炎以及抗癌等活性,但大多只监测部分生理生化因子、免疫调节因子和相关蛋白的调控,其作用机理以及对应的活性成分结构研究几乎为零,对该提取物的临床有效性探究更是少之又少。

总之,相比于同属的总状蕨藻,长茎葡萄蕨藻的研究资料还较少,目前的研究报道主要还集中在营养成分、人工养殖以及环境应用上,后续本研究应当对长茎葡萄蕨藻的活性成分进行深入的开发,明确其结构与活性功能之间的关系并探究具体的活性功能机制,以发掘长茎葡萄蕨藻的药物潜力。

参考文献

- [1] 叶启旺. 长茎葡萄蕨藻室内水泥池与自然海区养殖对比试验[J]. 水产养殖, 2018, 39(3): 11-13. [YE Qiwan. Comparative test of indoor cement pond and natural sea area[J]. Aquaculture, 2018, 39(3): 11-13.]
- [2] TERADA R, NAKAZAKI Y, BORIONGAN I A, et al. Desiccation effect on the PSII photochemical efficiency of cultivated Japanese *Caulerpa lentillifera* under the shipping package environment[J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 30(4): 2533-2538.
- [3] BAMBARANDA B, SASAKI N, CHIRAPART A, et al. optimization of macroalgal density and salinity for nutrient removal by *Caulerpa lentillifera* from aquaculture effluent[J]. Processes, 2019, 7(5): 16.
- [4] BAMBARANDA B, TSUSAKA T W, CHIRAPART A, et al. Capacity of *Caulerpa lentillifera* in the removal of fish culture effluent in a recirculating aquaculture system[J]. Processes, 2019, 7(7): 15.
- [5] LARGO D B, DIOLA A G, MARABABOL M S. Development of an integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) system for tropical marine species in southern cebu, Central Philippines[J]. Aquaculture Reports, 2016, 3: 67-76.
- [6] LI R G, ZHANG T T, ZHONG H F, et al. Bioadsorbents from algae residues for heavy metal ions adsorption: Chemical modification, adsorption behaviour and mechanism[J]. Environmental Technology, 2020: 12.
- [7] MARUNGRUENG K, PAVASANT P. High performance biosorbent (*Caulerpa lentillifera*) for basic dye removal[J]. Biore-source Technology, 2007, 98(8): 1567-1572.
- [8] PUNJONGHARN P, MEEVASANA K, PAVASANT P. Influence of particle size and salinity on adsorption of basic dyes by agricultural waste: Dried seagrass (*Caulerpa lentillifera*)[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(6): 760-768.
- [9] SUSILOWATI A, MULYAWAN A E, PUTRI T W. Antioxidant activity of the sea grape (*Caulerpa racemosa*) used as an antioxidant lotion[J]. Oriental Journal of Chemistry, 2019, 35(4): 1443-1447.
- [10] CHEN X L, SUN Y H, LIU H, et al. Advances in cultivation, wastewater treatment application, bioactive components of *Caulerpa*

- lentillifera* and their biotechnological applications[J]. *Peerj*, 2019, 7: 15.
- [11] NAGAPPAN T, VAIRAPPAN C S. Nutritional and bioactive properties of three edible species of green algae, genus *Caulerpa* (Caulerpaceae)[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26(2): 1019–1027.
- [12] 姜芳燕, 宋文明, 杨宁, 等. 海南长茎葡萄蕨藻的营养成分分析及评价[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(24): 356–359. [JIANG Fangyan, SONG Wenming, YANG Ning, et al. Analysis and evaluation of nutrient content of *Caulerpa lentillifera*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(24): 356–359.]
- [13] 王波, 郑凤荣, 王欣, 等. 长茎葡萄蕨藻和冈村蕨藻的营养成分分析及评价[J]. *营养学报*, 2018, 40(5): 105–107. [WANG Bo, ZHENG Fengrong, WANG Xin, et al. Nutritional analysis and evaluation of *Caulerpa lentillifera* and *Caulerpa okamurae*[J]. *Journal of Nutrition*, 2018, 40(5): 105–107.]
- [14] 张媚健, 马钰荣, 车馨怡, 等. 海南长茎葡萄蕨藻营养成分分析及其免疫刺激活性研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(5): 90–96. [ZHANG Meijian, MA Yurong, CHE Xinyi, et al. Analysis of nutritional components and immunostimulatory activity of *Caulerpa lentillifera* in Hainan Province[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(5): 90–96.]
- [15] MATANJUN P, MOHAMED S, MUSTAPHA N M, et al. Nutrient content of tropical edible seaweeds, *Eucheuma cottonii*, *Caulerpa lentillifera* and *Sargassum polycystum*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2009, 21(1): 75–80.
- [16] NGUYEN V T, UENG J P, TSAI G J. Proximate composition, total phenolic content, and antioxidant activity of seagrass (*Caulerpa lentillifera*)[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(7): C950–C958.
- [17] ZHANG M, MA Y, CHE X, et al. Comparative analysis of nutrient composition of *Caulerpa lentillifera* from different regions [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19: 439–445.
- [18] 唐贤明, 刘小霞, 孟凡同, 等. 海马齿和长茎葡萄蕨藻的营养成分分析及评价[J]. *热带生物学报*, 2018, 9(2): 129–135. [TANG X M, LIU X X, MENG F T, et al. Analysis and evaluation of hippocampus tooth and long-stem vine fern algae[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2018, 9(2): 129–135.]
- [19] SAITO H, XUE C, YAMASHIRO R, et al. High polyunsaturated fatty acid levels in two subtropical macroalgae, *Cladosiphon okamuranus* and *Caulerpa lentillifera*[J]. *Journal of Phycology*, 2010, 46(4): 665–673.
- [20] 周文川, 赵秋龙, 雷美华, 等. 光照等环境因子对长茎葡萄蕨藻生长的影响[J]. *海洋与渔业*, 2017(6): 70–72. [ZHOU Wenchuan, ZHAO Qiulong, LEI Meihua, et al. Effect of light and other environmental factors on the growth of long-stem vine fern algae [J]. *Marine and Fisheries*, 2017(6): 70–72.]
- [21] LONG H R, GU X Y, ZHOU N, et al. Physicochemical characterization and bile acid-binding capacity of water-extract polysaccharides fractionated by stepwise ethanol precipitation from *Caulerpa lentillifera*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 150: 654–661.
- [22] SUN Y J, GONG G P, GUO Y M, et al. Purification, structural features and immunostimulatory activity of novel polysaccharides from *Caulerpa lentillifera*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 108: 314–323.
- [23] 程玥, 丁泽贤, 张越, 等. 茯苓多糖及其衍生物的化学结构与药理作用研究进展[J]. *中国中药杂志*, 2020, 18(45): 4332–4340. [CHENG Yue, DING Zexian, ZHANG Yue, et al. Research progress on chemical structure and pharmacological activities of *Poria* polysaccharide and its derivatives[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2020, 18(45): 4332–4340.]
- [24] ZHANG M J, ZHAO M H, QING Y D, et al. Study on immunostimulatory activity and extraction process optimization of polysaccharides from *Caulerpa lentillifera*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 143: 677–684.
- [25] SUN Y J, LIU Z Q, SONG S, et al. Anti-inflammatory activity and structural identification of a sulfated polysaccharide CLGP4 from *Caulerpa lentillifera*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 146: 931–938.
- [26] XIAO H, FU X, CAO C L, et al. Sulfated modification, characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from *Sargassum pallidum*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 121: 407–414.
- [27] MAEDA R, IDA T, INARA H, et al. Immunostimulatory activity of polysaccharides isolated from *Caulerpa lentillifera* on macrophage cells[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2012, 76(3): 501–505.
- [28] 宋伟康. 叶托马尾藻及海葡萄多糖的提取, 结构, 抗氧化性以及藻渣吸附性能研究[D]. 海口: 海南大学, 2018. [SONG Weikang. Extraction, structure and antioxidant of polysaccharides from *Sargassum carpophyllum* and *Caulerpa lentillifera* and adsorption properties of the seaweed residues to metal ions[D]. Haikou: Hainan University, 2018.]
- [29] FAJRIAH S, SINURAT E, MEGAWATI M, et al. Identification of β -1, 3-glucan and α -glucosidase inhibitory activity from seagrass *Caulerpa lentillifera* extracts[C]// AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC AIP Publishing, 2018.
- [30] ESTEVES P O, DE OLIVEIRA M C, BARROS C D, et al. Antiviral effect of caulerpin against Chikungunya[J]. *Natural Product Communications*, 2019, 14(10): 6.
- [31] LUNAGARIYA J, BHADJA P, ZHONG S H, et al. Marine natural product bis-indole alkaloid caulerpin: Chemistry and biology[J]. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 2019, 19(9): 751–761.
- [32] AGUILAR-SANTOS G. Caulerpin, a new red pigment from green algae of the genus *Caulerpa*[J]. *Journal of the Chemical Society Perkin Transactions*, 1970, 6(6): 842.
- [33] 向江波, 邓建朝, 杨贤庆, 等. 响应面法优化微波辅助提取长茎葡萄蕨藻中藻藻红素[J]. *食品与发酵工业*, 2016(6): 209–214. [XIANG Jiangbo, DENG Jianchao, YANG Xianqing, et al. Microwave assisted extraction of fern pigment from long stem grape fern by response method[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2016(6): 209–214.]
- [34] CAPON R J, GHISALBERTI E L, JEFFERIES P R. Metabolites of the green-algae, *Caulerpa*-species[J]. *Phytochemistry*,

1983, 22(6): 1465–1467.

[35] YAP W F, TAY V, TAN S H, et al. Decoding antioxidant and antibacterial potentials of malaysian green seaweeds: *Caulerpa racemosa* and *Caulerpa lentillifera*[J]. *Antibiotics-Basel*, 2019, 8(3): 18.

[36] KUMAR J G S, UMAMAHESWARI S, KAVIMANI S, et al. Pharmacological potential of green algae *Caulerpa*: A review[J]. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 2019, 10(3): 1014–1024.

[37] MAEDA R, IDA T, IHARA H, et al. Induction of apoptosis in mcf-7 cells by beta-1, 3-xylooligosaccharides prepared from *Caulerpa lentillifera*[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2012, 76(5): 1032–1034.

[38] SUN Y J, LIU Y, AI C Q, et al. *Caulerpa lentillifera* polysaccharides enhance the immunostimulatory activity in immunosuppressed mice in correlation with modulating gut microbiota[J]. *Food & Function*, 2019, 10(7): 4315–4329.

[39] FAEZAH S, KAZI J, IBRAHIM I, et al. Screening of seaweeds potential against oral infections[J]. *Journal of Applied Sciences Research*, 2015, Special,11: 1–6.

[40] SAITO H, LAL T M. Antimycotic activity of seaweed extracts (*Caulerpa lentillifera* and *Eucheuma cottonii*) against two genera of marine oomycetes, *Lagenidium* spp. and *Haliphthoros* spp.[J]. *Biocontrol Science*, 2019, 24(2): 73–80.

[41] ABOUZID S F, AHMED O M, AHMED R R, et al. Anti-hyperglycemic effect of crude extracts of some egyptian plants and algae[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2014, 17(3): 400–406.

[42] SHARMA B R, KIM H J, RHYU D Y. *Caulerpa lentillifera* extract ameliorates insulin resistance and regulates glucose metabolism in C57BL/KsJ-db/db mice via PI3K/AKT signaling pathway in myocytes[J]. *Journal of Translational Medicine*, 2015, 13: 10.

[43] SHARMA B R, KIM H J, RHYU D Y. *Caulerpa lentillifera* inhibits protein-tyrosine phosphatase 1B and protects pancreatic beta cell via its insulin mimetic effect[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(2): 495–499.

[44] MATANJUN P, MOHAMED S, MUHAMMAD K, et al. Comparison of cardiovascular protective effects of tropical seaweeds, *Kappaphycus alvarezii*, *Caulerpa lentillifera*, and *Sargas-*

sum polycystum, on high-cholesterol/high-fat diet in rats[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2010, 13(4): 792–800.

[45] MEHRA R, BHUSHAN S, BAST F, et al. Marine macroalga *Caulerpa*: Role of its metabolites in modulating cancer signaling[J]. *Molecular Biology Reports*, 2019, 46(3): 3545–3555.

[46] TIAN H, LIU H F, SONG W K, et al. Polysaccharide from *Caulerpa lentillifera*: Extraction optimization with response surface methodology, structure and antioxidant activities[J]. *Natural Product Research*, 2019: 1–9.

[47] ARENAJO A R, YBANEZ A P, ABABAN M M P, et al. The potential anticoagulant property of *Caulerpa lentillifera* crude extract[J]. *International Journal of Health Sciences-Ijhs*, 2017, 11(3): 29–32.

[48] CHAVES G P, DE SOUSA A F G, CAMARA R B G, et al. Genotoxicity and osteogenic potential of sulfated polysaccharides from *Caulerpa prolifera* seaweed[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 114: 565–571.

[49] CHAVES G P, DE SOUSA A F G, VIANA R L S, et al. Osteogenic activity of non-genotoxic sulfated polysaccharides from the green seaweed *Caulerpa sertularioides*[J]. *Algal Research-Bio-mass Biofuels and Bioproducts*, 2019, 42: 8.

[50] GONZALEZ-CASTRO A L, MUNOZ-OCHOA M, HERNANDEZ-CARMONA G, et al. Evaluation of seaweed extracts for the control of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2019, 31(6): 3815–3821.

[51] GOMES D L, MELO K R T, QUEIROZ M F, et al. *In vitro* studies reveal antiurolithic effect of antioxidant sulfated polysaccharides from the green seaweed *Caulerpa cupressoides* var *flabellata*[J]. *Marine drugs*, 2019, 17(6): 16.

[52] CARNEIRO J G, HOLANDA T D L, QUINDERE A L G, et al. Gastroprotective effects of sulphated polysaccharides from the alga *Caulerpa mexicana* reducing ethanol-induced gastric damage[J]. *Pharmaceuticals*, 2018, 11(1): 9.

[53] MAGLIOZZI L, MASELLI V, ALMADA F, et al. Effect of the algal alkaloid caulerpin on neuropeptide Y (NPY) expression in the central nervous system (CNS) of *Diplodus sargus*[J]. *Journal of Comparative Physiology a-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology*, 2019, 205(2): 203–210.