

绿藻浒苔多元化应用研究进展

郇丽^{1,2,3}, 顾文辉^{1,2,3}, 王立军^{1,2,3}, 王旭雷^{1,2,3}, 高山^{1,2,3}, 王辉^{1,2,3},
王广策^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所 实验海洋生物学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生物学与生物技术功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国科学院 海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 浒苔营养物质全面且含量丰富, 藻体适应性强、光合效率高、生长速度快, 是一种非常理想的生物材料。本文对近些年来浒苔在食品、饲料、活性物质开发、生物质能源研究、生态修复等方面的应用进行综述, 为浒苔资源的充分利用与进一步开发提供可借鉴的理论和实践方面的科学依据。

关键词: 浒苔; 生理功能; 活性物质; 生物质能源; 生态修复

中图分类号: P745 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2022)11-0139-08

DOI: 10.11759/hyxx20200921002

浒苔(*Ulva prolifera*)隶属绿藻门(Chlorophyta)石莼目(Ulvales)石莼科(Ulvaceae), 是一种广温、广盐的大型海藻。自然分布于亚洲、美洲和大洋洲等区域, 在海洋、河口以及海陆结合处均有发现。定生浒苔多生长在高潮带和中潮带的岩石上或石沼中^[1]。藻体为中空管状结构, 可脱离固着基质进行漂浮生长, 在合适条件下不断增殖, 造成生物量的急剧扩增, 形成绿潮。自 2007 年至今, 绿潮在中国黄海海域连续多年周期性暴发, 严重影响了经济发展和生态平衡, 引起政府的高度重视和社会的广泛关注。目前, 关于浒苔的研究大多聚焦于溯源、生长繁殖以及抗逆等方面^[2-5], 对藻体开发与利用的系统性报道较少。本文对近些年来浒苔在食品和饲料、活性物质开发、生物质能源研究、生态修复等方面的应用进行综述, 为浒苔资源的充分利用与进一步开发提供基础性资料。

1 食物和食品添加剂

浒苔味道鲜美, 营养丰富。藻体蛋白含量高(26.46%~29.01%), 脂肪含量低(0.76%~0.91%), 纤维素含量丰富(4.87%~6.58%); 必需氨基酸含量较多, 与氨基酸总量比值为 30.31%~33.83%, 呈味氨基酸(Asp、Glu、Gly、Ala)含量较高(42.84%~46.89%); 脂肪酸组成丰富, 不饱和脂肪酸占比较高(超过 60%); 矿物质和维生素含量丰富^[6-8]。

浒苔广泛应用于日常饮食和食品加工中。在中

国、日本和韩国等国家的沿海地区, 居民都有食用浒苔的习惯, 例如中国北方沿海居民用鲜嫩浒苔制作包子或煮汤。此外, 浒苔还可以作为海鲜调味品和食品添加剂应用于各种食品, 如面条、饼干、干脆面、麻花和膨化食品等^[9]。

2 动物养殖饲料

在爱尔兰、英国、新西兰等国家, 海藻饲料已进行规模化生产。浒苔藻体营养物质全面且丰富, 还含有大量的生物活性物质(多糖等), 添加在饲料中能改进饲料营养结构并提高利用率, 可促进动物生长、增强免疫力、提高成活率^[9]。

在水产养殖方面, 浒苔不仅是鱼虾贝的诱食剂, 还可有效促进其生长, 提升品质。摄食浒苔后的点篮子鱼味道鲜美, 各种必需氨基酸和重要多不饱和脂肪酸营养均较优, 具有较高的食用价值和保健作用^[10]。李猛等^[11]将鲜浒苔匀浆后与其他饲料原料混合得到鲜浒苔饲料, 幼刺参摄食后获得良好的生长效果, 肠道消化酶活力适当改善。

收稿日期: 2020-09-21; 修回日期: 2020-11-18

基金项目: 国家藻类产业技术体系(CARS-50); 山东省“泰山学者”工程专项经费资助项目(tspd20210316)

[Foundation: Earmarked fund for China Agriculture Research System, No. CARS-50; the Research Fund for the Taishan Scholar Project of Shandong Province, No. tspd20210316]

作者简介: 郇丽(1986—), 女, 山东临沂人, 副研究员, 博士, 主要从事藻类生理学与发育调控, E-mail: huanli@qdio.ac.cn; 王广策(1964—), 通信作者, 研究员, E-mail: gcwang@qdio.ac.cn

在畜牧方面,添加 6%的浒苔至生长育肥猪日粮中可显著提高粗蛋白的表观消化率,浒苔表观消化能为 12.67 MJ/kg,干物质、有机物及粗蛋白质的表观消化率分别为 76.83%、72.31%和 83.32%,表明浒苔具有良好的营养作用,可作为优质饲料资源应用于养猪业^[12]。饲料中添加 3%~4%浒苔干粉可提高肉鸭生长性能、屠宰性能及免疫器官指数,提高血清总蛋白及白蛋白的含量,是一种良好的新型鸭饲料^[13]。在蛋鸡日粮中添加浒苔可增加蛋黄的色泽,对蛋重、蛋壳厚度和蛋鸡体重都有有利的影响,可作为蛋鸡饲料的矿物添加剂^[14]。

3 生物活性物质研究与开发

浒苔具有多种生物活性,其提取物中的功能性成分以多糖为主,其他主要活性成分还包括蛋白质、脂肪酸、挥发性成分等^[15-17]。

浒苔多糖具有免疫调节、抗氧化、抗病毒、降血脂和降血糖等作用^[18]。浒苔多糖经分离后得到 EP1 和 EP2,其中 EP2 显著促进 T、B 细胞的增殖反应,有明显的免疫增强活性^[19]。浒苔水提多糖和酸提多糖均可清除羟自由基,清除率与浓度存在剂量依赖关系^[20]。浒苔多糖可直接杀灭 H9N2 禽流感病毒,抑制病毒复制并阻断吸附,表现出体外抗禽流感病毒活性^[21]。此外,研究还发现浒苔多糖可抑制 SREBP-1c 表达,从而调节乙酰辅酶 A 羧化酶的表达,有益于高血脂的控制,降低心血管疾病发生风险^[22]。江苏地产浒苔多糖能降低糖尿病小鼠的血糖,改善模型小鼠的耐糖力,缓解胰岛病变程度^[23]。在水产养殖中,日饲浒苔多糖能促进凡纳滨对虾生长,增强其对副溶血性弧菌的非特异性免疫和抗病性^[24]。添加浒苔多糖饲养的鲫鱼质量增加率显著升高,培养基中菌落数减少;浒苔饲养组鲫鱼的总蛋白和球蛋白含量均高于普通饲料组,浒苔多糖促进了鲫鱼生长并提高了其抗病能力^[25]。

浒苔为保水缓释材料,藻粉吸湿性为甘油的 98%;研究发现浒苔多糖与透明质酸有相似的保湿性质,环境湿度对其吸湿率影响较小;与此同时,浒苔多糖可减轻紫外线对人皮肤成纤维细胞的损伤,这些特性使浒苔具有开发为化妆品原料的潜能^[26-30]。

4 生物质能源研究

浒苔分布广泛,生长速率快,生物量大,藻体含

有大量的生物质能源,可用于造纸、活性炭制备、生物能源开发等。

4.1 造纸

浒苔与造纸纸浆分别预处理后混合,再经磨浆后可用于生产纸产品,实验发现浒苔可部分或全部代替传统的造纸原料,进而得到新型纸产品,具有防油、防水和抗微生物的效果,而海藻又具有绿色环保、可食用等特殊性能,可作为防油纸、食品包装纸以及其他特种纸。浒苔来源丰富,价格低廉,用于造纸所需处理简单,可有效降低造纸成本,并可有效解决浒苔处理困难的问题,利于环保^[31]。

4.2 制备活性炭

活性炭比表面积大、孔隙结构丰富,具有稳定的物化性质和良好的化学吸附能力,被广泛应用于工业、农业及环境保护等领域。浒苔作为使用广泛的生物材料之一,相关研究人员以其为原料制备了活性炭并进行了性能研究。

Li 等^[32]采用氯化锌活化法制备了活性炭,其为表面积 1 688 m²/g 的多孔结构,对 Pb(II)离子具有较高的吸附能力,吸附数据符合伪二级动力学模型。Gao 等^[33]用化学活化剂焦磷酸制备了活性炭,其对环丙沙星的单层吸附量为 216.55 mg/g,平衡数据可以用 Langmuir 模型很好地描述。Gao 等^[34]采用氢氧化钾(KOH)作为活化剂,以浒苔、硫酸盐木质素、毛发、石油焦等 4 种固体废弃物为原料,制备了 4 种活性炭,以浒苔制备的活性炭具有丰富的中孔结构,表面积最大,孔容最高;制备的活性炭对六价铬的吸附数据均符合 Freundlich 方程。

4.3 生产生物油

浒苔藻体含有糖类、脂质、蛋白质等多种物质,其分解产物与化石能源类似,是生产生物油的好材料。

王广策等^[35]发明了热解大型海藻制取液体和气态燃料的方法。在较低温度(400~500 °C)下,CO₂是主要的气体产物,随着温度的升高,H₂、CH₄和 CO 迅速析出,在 700~800 °C 时,芳烃逐渐成为生物油的主要成分;藻类热解最佳温度为 500~600 °C,可获得更高的碳值和生物油、气产品^[36]。浒苔在蜡油热裂化条件下(300 °C, 30 min),生物油产率达 90.5%,较高的热值和元素分析表明该工艺具有工业化生产浒苔生物油的潜力^[37]。Yan 等^[38]研究发现浒苔在非

催化液化条件下最大生物油产率为 12.0%(重量百分比),在催化反应中,采用 0.1 g 催化剂 KOH 可获得最大生物油产率(26.7%),催化液化生物油的热值较高(33.6 MJ/kg),含碳量较高(64.2%)。

4.4 生产生物乙醇

燃料乙醇作为绿色环保能源,具有非常广阔的应用前景。与以玉米、小麦等为原料生产的燃料乙醇相比,海藻乙醇以原料的碳水化合物含量高、光合效率高、不与农作物争地等特点呈现出独特的优越性。

生物质糖化是生产燃料乙醇的关键工艺,冯大伟等^[39]探索了浒苔糖化工艺条件,为进一步的燃料乙醇发酵研究提供了参考。Li 等^[40]研究了浒苔多糖提取后的残渣作为可再生能源的技术可行性,在最佳预处理条件下(0.2%过氧化氢, 50 °C, pH 4.0, 12 h),还原糖产率达到最大值 0.42 g/g;酿酒酵母发酵液中还原糖转化为生物乙醇的转化率达到 31.4%,与其他报道的传统工艺相比,还原糖和生物乙醇的产量明显提高,过氧化氢预处理有效增强了浒苔生产生物乙醇的过程。Cai 等^[41]优化了浒苔生物乙醇酶解发酵工艺,以枯草芽孢杆菌粗酶为原料 50 °C 酶解 5 d,总还原糖得率为 6.4%;接种酿酒酵母发酵 3 d,总乙醇产量为 15.67 g/L;在初始还原糖溶液中加入磷酸氢二钾,乙醇浓度提高到 18.67 g/L,改进后的工艺为浒苔生产生物乙醇提供了参考。

王淑贤等^[42]在绿潮暴发海域的底泥和腐烂浒苔中筛选出一株可高效降解浒苔纤维素的曲霉属真菌,以浒苔为诱导培养基制备该菌株的粗酶液,其滤纸纤维素酶活为 34.79 U/mL。添加 6%的粗酶液,酶解条件为 38 °C、60 h、pH 6.8,浒苔纤维素降解效果最好,酶解液发酵乙醇产量最高,达到 28.98 g/L。

4.5 制作燃料电池

Liu 等^[43]优化了浒苔糖化的工艺条件,研制了一种不含贵金属催化剂的碱性燃料电池,在最佳条件下(170 °C 和 2%盐酸作用 45 min),每千克干藻可产生 272.25 g 还原糖。在 3 mol/L KOH 和 18.15 g/L 还原糖条件下,水解产物的最大功率密度达到 3.81 W/m²。Yang 等^[44]采用可重复使用的固体酸催化剂硅钨酸处理浒苔,在最佳条件下,还原糖总产量为 237.354 mg/g。在 3 mol/L KOH 和 8.572 mg/mL 还原糖的条件下,燃料电池最大功率密度为 6.616 W/m²,高于之前报道的其他藻类燃料电池。

4.6 制备沼气

研究发现浒苔粉碎粒度为 1.50 mm、总固体质量比为 6%以及 35 °C 的发酵条件,有利于提高浒苔产气量、甲烷体积分数和发酵系统稳定性,为浒苔厌氧发酵产沼气技术和其他大型海藻产沼气技术的研究提供了参考^[45]。张婷婷等^[46]研究了颗粒大小和处理方法对浒苔在高温条件下发酵产沼气的的影响,发现粒度小可提高浒苔沼气发酵的利用率,碱预处理法在提高沼气产量方面效果最佳,为厌氧发酵浒苔生产沼气的工艺研究及生产提供了参考。

5 生态修复

浒苔生长繁殖速度快、生物量大,藻体细胞含有多种功能位点,能降低或消除环境中的有毒、有害物质,恢复或部分恢复受污染的环境。

5.1 吸收氮磷

近年来,随着工业废水、生活污水排放及农业过程中化肥农药流入的增加,许多水域中氮磷等营养物质浓度升高,导致部分水体富营养化。浒苔作为一种生长速度快的大型海藻,其对营养盐的吸收和利用可以起到净化水质的作用。

Li 等^[47]发现氮磷的富集显著提高了浒苔的相对生长速率,在高氮高磷时,浒苔叶绿素荧光参数达到最大值,光合速率是低氮低磷处理组的 1.52 倍,无机碳吸收量是其 1.63 倍,氮磷的富集显著促进了浒苔的光合作用和碳固定。Wu 等^[48]评估了清除藻潮潜在的环境效益,绿潮暴发期间,浒苔在 50 d 内从 1.01×10⁴ t 增长到 4.10×10⁶ t,日平均增长率为 12.80%;绿潮对氮、磷、碳的潜在最大去除量分别为 7.46×10³ t、1.05×10³ t 和 1.73×10⁵ t,适时从黄海清除浒苔可以从这些富营养化水域中去除营养物质,提供宝贵的生态系统服务。

Zhao 等^[49]利用浒苔处理了江蓠藻红蛋白与琼胶综合提取过程中产生的废液,以废液相关指标的清除率和浒苔光合活性为依据,发现最佳处理时间为 48 h,浒苔对废液中生化需氧量、化学需氧量、总氮、无机氮、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、总磷以及无机磷的清除率均较高,减少了废液外排对环境造成的压力,为相关生产企业的废液处理工作提供了新思路。

5.2 吸附金属离子

浒苔细胞壁结构比较特殊,含有氨基、羟基、羧

基、硫酸盐等官能团,可通过静电吸引和络合作用结合金属离子。

Michalak 和 Chojnacka^[50]研究发现浒苔对铬离子具有良好的生物吸附性能,平衡吸附容量随 pH 值和金属离子初始浓度的增加而增大;最佳吸附条件为初始 pH 5、25 °C、初始铬离子质量浓度 400 mg/L、吸附剂质量浓度 1.0 g/L,在此条件下达到平衡时的吸附量为 100 mg/g。Li 等^[51]研究了浒苔对 Pb²⁺的生物吸附,发现吸附作用与 pH 值、吸附剂用量、粒径和离子强度有关,浒苔对 Pb²⁺的吸附速度很快,仅需约 60 min 即可达到平衡,数据等温线分析表明,浒苔吸收 Pb²⁺遵循 Langmuir 模型,在 pH 5.0、25 °C 条件下,浒苔对 Pb²⁺的最大吸附量为 134.8 mg/g。此外,研究还发现浒苔对铜离子和镍离子也有很好的吸附作用^[52-53]。

Huan 等^[54]在不同水体(淡水、半海水、海水、城市内河水样、工业废水水样)中添加 CdCl₂,发现浒苔可以有效去除不同环境背景下水体的 Cd²⁺,对淡水中 Cd²⁺的去除效率高达 94.89%,对其他水体环境中 Cd²⁺的去除效率在 50%左右。添加 1~10 μmol/L Cd²⁺对浒苔光系统的损伤不明显,藻体尚能保持较高的光合活性;当浓度高于 50 μmol/L 时,浒苔光合活性被显著抑制,对光系统 II 的抑制作用尤为明显。此外,浒苔干藻体对淡水中 Cd²⁺也具有较好的去除效果,去除率高达 88.21%。

5.3 吸附工业原料和染料

双酚 A 是世界上较常使用的工业化合物之一,被广泛用于聚碳酸酯和环氧树脂等材料的生产。Zhang 等^[55]研究了绿潮暴发期间浒苔对双酚 A 污染海岸水体的物理修复作用,发现双酚 A 可以快速被浒苔去除,活体浒苔可以去除大于 94.3%的双酚 A,而死掉的藻体对双酚 A 的去除率小于 2.5%;不同条件下的吸附实验表明,浒苔对双酚 A 的去除率与光照、养分和温度呈正相关,而盐度对去除率没有显著影响;野外调查表明,绿潮暴发区域海水中双酚 A 的浓度远远低于相邻的没有绿潮暴发的区域;由于较高的双酚 A 去除效率以及绿潮暴发时浒苔较大的生物量和巨大的覆盖面积,由浒苔引发的藻潮对沿海水域双酚 A 去除的贡献非常显著,效果明显。

DFS-4BS 是一种直接偶氮染料,广泛用于棉、丝、毛、纸、皮革的染色。Sun 等^[56]研究了酸处理后的浒苔(ATEP)对 DFS-4BS 的生物吸附作用,发现 ATEP 的

吸附容量与溶液 pH、ATEP 用量和温度有关;吸附动力学遵循伪二阶速率方程,吸附等温线可以用 Langmuir 模型很好地描述,最大吸附量为 318.87 mg·g⁻¹,表明了 ATEP 作为生物吸附剂去除 DFS-4BS 的优异性能。

5.4 调控浮游植物群落

绿潮暴发时,相关海域营养盐浓度降低,浮游植物群落结构发生变化,绿潮对浮游植物群落结构存在一定的调控作用^[57]。张雪等^[58]研究了浒苔对浮游植物群落的影响,发现硅藻生长明显受到浒苔抑制。浒苔还影响了浮游植物细胞丰度和优势种演替,改变了浮游植物的群落结构。浒苔鲜组织内存在克生物质,适宜密度的浒苔可抑制赤潮藻的过度繁殖,有益于赤潮的生物防治及水域环境的生态修复。

6 结语

浒苔资源丰富,生物学特性独特,被广泛应用于食品、饲料、医疗、能源、生态等方面。目前,浒苔在食品和饲料应用中已实现工业化,但在活性物质和生物质能源研究等方面大多处于实验室阶段,尚未进行规模化生产与应用。深度开发、充分利用浒苔对人类健康保障、新旧动能转换、生态环境改善和保护等方面都具有重要意义,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 丁兰平, 栾日孝. 浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 的分类鉴定、生境习性及分布[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(1): 68-71.
DING Lanping, LUAN Rixiao. The taxonomy, habit and distribution of a green alga *Enteromorpha prolifera* (Ulvales, Chlorophyta)[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(1): 68-71.
- [2] 吴玲娟, 曹丛华, 高松, 等. 我国绿潮发生发展机理研究进展[J]. 海洋科学, 2013, 37(12): 118-121.
WU Lingjuan, CAO Conghua, GAO Song, et al. A review on the development mechanism of Green Tide in China[J]. Marine Sciences, 2013, 37(12): 118-121.
- [3] 王广策, 王辉, 高山, 等. 绿潮生物学机制研究[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(4): 789-808.
WANG Guangce, WANG Hui, GAO Shan, et al. Study on the biological mechanism of green tide[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(4): 789-808.
- [4] 王广策, 唐学玺, 何培民, 等. 浒苔光合作用等关键生理过程对环境因子响应途径的研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 52(11): 1627-1636.
WANG Guangce, TANG Xuexi, HE Peimin, et al. Pro-

- gress of studies on the responses of the key physiological processes including photosynthesis in *Ulva prolifera* O.F.Müller to environmental factors[J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(11): 1627-1636.
- [5] 马莹莹, 赵瑾, 解威峰, 等. 浒苔(*Ulva prolifera*)漂浮生态型的分枝表型及其可塑性[J]. 海洋科学, 2020, 44(8): 98-105.
MA Yingying, ZHAO Jin, XIE Weifeng, et al. Branching phenotype and plasticity in floating ecotype of *Ulva prolifera* (Ulvophyceae, Chlorophyta)[J]. Marine Sciences, 2020, 44(8): 98-105.
- [6] 蔡子豪, 杜晶, 孙彬, 等. 南黄海绿潮藻的分子鉴定及营养价值初探[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(7): 1206-1215.
CAI Zihao, DU Jing, SUN Bin, et al. Molecular identification of green tide algae in the South Yellow Sea and preliminary study on its nutritive value[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(7): 1206-1215.
- [7] 何清, 胡晓波, 周峙苗, 等. 东海绿藻缘管浒苔营养成分分析及评价[J]. 海洋科学, 2006, 30(1): 34-38.
HE Qing, HU Xiaobo, ZHOU Shimiao, et al. Evaluation on nutrition components of *Enteromorpha linza*[J]. Marine Sciences, 2006, 30(1): 34-38.
- [8] 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.
ZHANG Min, LI Ruixia, YI Jifeng, et al. Analysis of the fatty acid composition of four economic seaweeds[J]. Marine Sciences, 2012, 36(4): 7-12.
- [9] 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.
LIN Wenting. Development and utilization of *Enteromorpha*[J]. Food and Nutrition in China, 2007(9): 23-25.
- [10] 宋超, 赵峰, 刘鉴毅, 等. 摄食浒苔和人工饵料的点篮子鱼幼鱼肌肉营养成分比较[J]. 动物营养学报, 2017, 29(6): 2047-2056.
SONG Chao, ZHAO Feng, LIU Jianyi, et al. Comparison of nutritive components in muscle of juvenile *Siganus guttatus* fed with *Enteromorpha prolifera* and artificial feed[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(6): 2047-2056.
- [11] 李猛, 廖梅杰, 常青, 等. 不同浒苔型饲料对幼刺参(*Apostichopus japonicus*)生长、消化及非特异性免疫的影响[J]. 渔业科学进展, 2017, 38(5): 122-129.
LI Meng, LIAO Meijie, CHANG Qing, et al. Effects of different diets containing *Enteromorpha prolifera* on growth, digestion and non-specific immunity of juvenile sea cucumber (*Apostichopus japonicus*)[J]. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(5): 122-129.
- [12] 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.
HU Jing, ZHU Yajun, ZHU Fenghua, et al. Effects of *Enteromorpha prolifera* on digestive energy and nutrient digestibility and in growing-finishing swine[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2015, 51(3): 29-32.
- [13] 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.
ZHU Fenghua, WANG Lihua, LIN Yingting. Effects of *Enteromorpha prolifera* powder on growth performance, immune organs indices and serum biochemical indices of meat duck[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2017, 53(5): 73-77.
- [14] MICHALAK I, CHOJNACKA K, DOBRZAŃSKI 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 Animal Nutrition, 2011, 95(3): 374-387.
- [15] 李响, 周锡红, 赵玉蓉. 浒苔提取物成分分析及其生理功能研究进展[J]. 动物营养学报, 2019, 31(12): 5468-5475.
LI Xiang, ZHOU Xihong, ZHAO Yurong. Research progress on constituents of *Ulva prolifera* extract and their biological function[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(12): 5468-5475.
- [16] 金浩良, 徐年军, 严小军. 浒苔中生物活性物质的研究进展[J]. 海洋科学, 2011, 35(4): 100-106.
JIN Haoliang, XU Nianjun, YAN Xiaojun. Research progress on the bioactive compounds of seaweed *Enteromorpha*[J]. Marine Sciences, 2011, 35(4): 100-106.
- [17] 侯杰, 张朝辉, 严芳芳, 等. 青岛海域浒苔中挥发油成分分析[J]. 海洋科学, 2013, 37(7): 20-23.
HOU Jie, ZHANG Zhaohui, YAN Fangfang, et al. Component analysis of essential oil in *Enteromorpha prolifera* in Qingdao Sea Area[J]. Marine Sciences, 2013, 37(7): 20-23.
- [18] 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.
WEI Jianteng, PEI Dong, LIU Yongfeng, et al. Research progress of polysaccharides from *Enteromorpha*[J]. Marine Sciences, 2014, 38(1): 91-95.
- [19] 徐大伦, 黄晓春, 杨文鸽, 等. 浒苔多糖的分离纯化及其对非特异性免疫功能的体外实验研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(5): 17-21.
XU Dalun, HUANG Xiaochun, YANG Wenge, et al. Studies on separation and purification of polysaccharides in *Enteromorpha* and its effects on non-specific immunity in vitro[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(5): 17-21.
- [20] 薛丁萍, 魏玉西, 刘淇, 等. 浒苔多糖对羟自由基的清除作用研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(1): 44-47.

- XUE Dingping, WEI Yuxi, LIU Qi, et al. Study on the scavenging activity of polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* to hydroxyl radical[J]. Marine Sciences, 2010, 34(1): 44-47.
- [21] 于超, 杜恒裔, 谭子超, 等. 4 种浒苔多糖的体外抗禽流感病毒活性研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020, 113(1): 106-109.
- YU Chao, DU Hengyi, TAN Zichao, et al. Study on anti-avian influenza virus activity of four Brassica polysaccharides in vitro[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2020, 113(1): 106-109.
- [22] 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.
- [23] 刘乾阳, 戈叶婷, 刘睿, 等. 江苏地产浒苔多糖对四氧嘧啶诱导糖尿病小鼠的降糖作用研究[J]. 南京中医药大学学报, 2017, 33(4): 403-407.
- LIU Qianyang, SHU Yeting, LIU Rui, et al. Effect of *Enteromorpha* polysaccharides of Jiangsu province on alloxan-induced diabetic mice[J]. Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2017, 33(4): 403-407.
- [24] GE H X, NI Q, CHEN Z, et al. Effects of short period feeding polysaccharides from marine macroalga, *Ulva prolifera* on growth and resistance of *Litopenaeus vannamei* against *Vibrio parahaemolyticus* infection[J]. Journal of Applied Phycology, 2019, 31(3): 2085-2092.
- [25] 耿中雷, 杨亚云, 蔡春尔, 等. 4 种海藻多糖对鲫鱼生长免疫影响的探究[J]. 水产科学, 2017, 36(6): 753-757.
- GENG Zhonglei, YANG Yayun, CAI Chuner, et al. Effects of dietary supplementation of four alga polysaccharides on growth and disease resistance in crucian carp *Carassius auratus*[J]. Fisheries Science, 36(6): 753-757.
- [26] CAI C E, GUO Z Y, YANG Y Y, et al. Application of green tide algae *Ulva prolifera* from south yellow sea of China[J]. Pakistan Journal of Botany, 2018, 50(2): 727-734.
- [27] 郭子叶, 蔡春尔, 耿中雷, 等. 浒苔粗多糖化妆品开发潜力研究[J]. 中国海洋药物, 2014, 33(2): 57-62.
- GUO Ziyue, CAI Chuner, GENG Zhonglei, et al. Study on potential use of crude polysaccharides from *Ulva prolifera* in cosmetic[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2014, 33(2): 57-62.
- [28] CAI C E, GUO Z Y, YANG Y Y, et al. Inhibition of hydrogen peroxide induced injuring on human skin fibroblast by *Ulva prolifera* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 241-247.
- [29] 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.
- SHI Xuelian, ZHANG Jingjing, SONG Houfang, et al. Polysaccharides from *Enteromorpha linza*: purification and moisture-preserving activity[J]. Marine Sciences, 2010, 34(7): 81-85.
- [30] 薛志欣, 叶乃好, 姜雪琴, 等. 浒苔多糖纺丝性能的探索性研究[J]. 海洋科学, 2012, 36(1): 65-68.
- XUE ZhiXin, YE Naihao, JIANG Xueqin, et al. Feasibility of wet-spinning of fibers from *Enteromorpha* polysaccharides[J]. Marine Sciences, 2012, 36(1): 65-68.
- [31] 王广策, 林阿朋, 裴继诚, 等. 一种利用大型海藻造纸的方法: CN102587191B[P]. 2016-03-16.
- WANG Guangce, LIN Apeng, PEI Jicheng, et al. A method of papermaking with large seaweed: CN102587191B[P]. 2016-03-16.
- [32] LI Y H, DU Q J, WANG X D, et al. Removal of lead from aqueous solution by activated carbon prepared from *Enteromorpha prolifera* by zinc chloride activation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1/3): 583-589.
- [33] GAO Y, YUE Q Y, GAO B Y, et al. Optimization preparation of activated carbon from *Enteromorpha prolifera* using response surface methodology and its adsorption studies of fluoroquinolone antibiotics[J]. Desalination Water Treatment, 2015, 55(3): 624-636.
- [34] GAO Y, YUE Q Y, GAO B Y. Comparison on physical, chemical, and adsorption properties of activated carbon derived from different solid wastes[J]. Desalination Water Treatment, 2016, 57(33): 15503-15514.
- [35] 王广策, 陈明强, 王君, 等. 一种大型海藻热解成液体燃料和气体燃料的方法: CN101033405B[P]. 2010-08-25.
- WANG Guangce, CHEN Mingqiang, WANG Jun, et al. A method for pyrolysis of large algae into liquid fuel and gas fuel: CN101033405B[P]. 2010-08-25.
- [36] CHEN W, YANG H P, CHEN Y Q, et al. Algae pyrolytic poly-generation: influence of component difference and temperature on products characteristics[J]. Energy, 2017, 131: 1-12.
- [37] SONG L H, HU M M, LIU D, et al. Thermal cracking of *Enteromorpha prolifera* with solvents to bio-oil[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 7-12.
- [38] YAN L, WANG Y F, LI J, et al. Hydrothermal liquefaction of *Ulva prolifera* macroalgae and the influence of base catalysts on products[J]. Bioresource Technology, 2019, 292: 121286.
- [39] 冯大伟, 姜鹏, 李富超, 等. 鲜浒苔稀硫酸水解产糖工艺研究[J]. 海洋科学, 2014, 38(12): 29-33.
- FENG Dawei, JIANG Peng, LI Fuchao, et al. The study

- of dilute sulfuric acid hydrolysis process of fresh *Ulva prolifera* for reducing sugars yield[J]. Marine Sciences, 2014, 38(12): 29-33.
- [40] LI Y P, CUI J F, ZHANG G L, et al. Optimization study on the hydrogen peroxide pretreatment and production of bioethanol from seaweed *Ulva prolifera* biomass[J]. Bioresource Technology, 2016, 214: 144-149.
- [41] CAI C E, FEI L, SHAO F, et al. An improved process for bioethanol production from *Ulva prolifera*[J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2018, 12(1): 109-114.
- [42] 王淑贤, 韦章良, 贾睿, 等. 绿潮藻浒苔微生物高效降解及生物乙醇制备[J]. 海洋科学, 2017, 41(1): 76-82. WANG Shuxian, WEI Zhangliang, JIA Rui, et al. Screening and characterization of a newly isolated strain for microbiological degradation of *Ulva prolifera* and bioethanol production[J]. Marine Sciences, 2017, 41(1): 76-82.
- [43] LIU S S, LIU X H, WANG Y, et al. Electricity generation from macroalgae *Enteromorpha prolifera* hydrolysates using an alkaline fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2016, 222: 226-231.
- [44] YANG L, WANG Y, LIU X H, et al. Energy extraction from seaweed under low temperatures by using an alkaline fuel cell[J]. Energy Sources, 2018, 40(17): 2107-2115.
- [45] 李秀辰, 张国琛, 孙文, 等. 不同预处理和发酵条件对浒苔沼气产率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 200-206. LI Xiuchen, ZHANG Guochen, SUN Wen, et al. Biogas yield of *Enteromorpha prolifera* under different pretreatment and anaerobic fermentation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19): 200-206.
- [46] 张婷婷, 刘慧, 叶乃好. 颗粒大小和几种预处理方法对浒苔厌氧发酵产沼气的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(5): 784-789. ZHANG Tingting, LIU Hui, YE Naihao. Effect on biogas production by the anaerobic fermentation of *Enteromorpha prolifera* of different granule sizes and with the methods of several pretreatments[J]. Journal of Shanghai University, 2013, 22(5): 784-789.
- [47] LI S X, YU K F, HUO Y Z, et al. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on growth and photosynthetic assimilation of carbon in a green tide-forming species (*Ulva prolifera*) in the Yellow Sea[J]. Hydrobiologia, 2016, 776(1): 161-171.
- [48] WU H L, ZHANG J H, YARISH C, et al. Bioremediation and nutrient migration during blooms of *Ulva* in the Yellow Sea, China[J]. Phycologia, 2018, 57(2): 223-231.
- [49] ZHAO P, WANG X L, NIU J F, et al. Agar extraction and purification of R-phycoerythrin from *Gracilaria tenuistipitata*, and subsequent wastewater treatment by *Ulva prolifera*[J]. Algal Research, 2020, 47: 101862.
- [50] MICHALAK I, CHOJNACKA K. The new application of biosorption properties of *Enteromorpha prolifera*[J]. Applied Biochemistry & Biotechnology, 2010, 160(5): 1540-1556.
- [51] LI Y H, DU Q J, PENG X J, et al. Physico-chemical characteristics and lead biosorption properties of *Enteromorpha prolifera*[J]. Colloids and Surfaces B Bio-interfaces, 2011, 85(2): 316-322.
- [52] ÖZER A, GÜRBÜZ G, ÇALIMLI A, et al. Biosorption of copper (II) ions on *Enteromorpha prolifera*: application of response surface methodology (RSM)[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 146(3): 377-387.
- [53] ÖZER A, GÜRBÜZ G, ÇALIMLI A, et al. Investigation of nickel (II) biosorption on *Enteromorpha prolifera*: optimization using response surface analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(2): 778-788.
- [54] HUAN L, SU H X, DUAN C X, et al. *Ulva prolifera* (Chlorophyta): a suitable material to remove Cd²⁺ from aquatic environments[J]. Water and Environment Journal, 2018, 32(1): 26-33.
- [55] ZHANG C, LU J, WU J, et al. Phycoremediation of coastal waters contaminated with bisphenol A by green tidal algae *Ulva prolifera*[J]. Science of The Total Environment, 2019, 661: 55-62.
- [56] SUN W J, SUN W S, WANG Y L. Biosorption of Direct Fast Scarlet 4BS from aqueous solution using the green-tide-causing marine algae *Enteromorpha prolifera*[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2019, 223: 117347.
- [57] 朱旭宇, 万晔, 葛跃浩, 等. 南黄海绿潮发生时浮游植物群落现状[J]. 海洋湖沼通报, 2018, 165(6): 100-108. ZHU Xuyu, WAN Ye, GE Yuehao, et al. Community status of phytoplankton during the green tide blooming in Southern Yellow Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2018, 165(6): 100-108.
- [58] 张雪, 栾青杉, 孙坚强, 等. 绿藻浒苔对浮游植物群落结构影响研究[J]. 海洋科学, 2013, 37(6): 24-31. ZHANG Xue, LUAN Qingshan, SUN Jianqiang, et al. Influence of *Enteromorpha prolifera* (Chlorophyta) on the phytoplankton community structure[J]. Marine Sciences, 2013, 37(6): 24-31.

Research progress on the application of *Ulva prolifera* (Chlorophyta)

HUAN Li^{1, 2, 3}, GU Wen-hui^{1, 2, 3}, WANG Li-jun^{1, 2, 3}, WANG Xu-lei^{1, 2, 3},
GAO Shan^{1, 2, 3}, WANG Hui^{1, 2, 3}, WANG Guang-ce^{1, 2, 3}

(1. CAS Key Laboratory of Experimental Marine Biology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Biology and Biotechnology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 3. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Sep. 21, 2020

Key words: *Ulva prolifera*; physiological function; active substance; biomass energy; ecological restoration

Abstract: *Ulva prolifera* is an ideal biomaterial with comprehensive and abundant nutrients, strong adaptability, high photosynthetic efficiency and a rapid growth rate. In this paper, the application of *U. prolifera* in food, feed, active substance development, biomass energy research, and ecological restoration in recent years was reviewed, which provided a scientific basis for the theoretical and practical reasons for using and further developing *U. prolifera*.

(本文编辑: 杨 悦)