

经济海藻繁育、养殖及综合利用的回顾与展望

王秀良^{1,2,3}, 张全斌^{1,2,3}, 段德麟^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院实验海洋生物学重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 实验海洋生物学与生物技术实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 经济海藻繁育、养殖及综合利用是海洋农牧业及工业的重要组成部分。20 世纪经过几代人的努力, 我国在海带、紫菜、裙带菜及龙须菜的繁育、养殖关键技术等方面成功取得突破, 为这些海藻的产业化提供坚实的保障, 为我国成为世界海藻大国奠定了基础。海藻养殖产业为人们提供了食品、藻胶及其它丰富的产品, 这包括保健品、功能食品、化妆品及药物等。海藻养殖产业也对人类经济、社会的发展起到重要作用, 通过吸收环境中的二氧化碳、氮和磷, 为海洋生态环境的改善发挥了重要作用。本文对我国海藻繁育、养殖及综合开发的历程进行简要回顾, 对当前我国、中国科学院海洋研究所海藻研究与应用进行了总结, 对海藻研究发展的未来进行了展望; 适应海藻产业从量向质的方向转变, 同时兼顾生态环境效益, 为我国海藻研发及应用提供参考。

关键词: 海带; 紫菜; 龙须菜; 裙带菜; 繁育; 养殖; 综合利用

中图分类号: P745

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2020)07-0010-06

DOI: 10.17759/hyxx20200310002

大型海藻是指主要自然分布在海边潮间带及潮下带的低等植物类群。人类利用海藻的历史悠久, 在亚太地区的国家如中国、日本、韩国、菲律宾等, 以及欧洲、北美如爱尔兰、加拿大等地也有将海藻作为食品的传统。早在公元前 1600 年的夏、商时期就有记载, 中国利用海藻为药用植物^[1]。在日本, 很早就有从石花菜中提取琼胶的技术^[2], 在欧洲, 人们利用海带、墨角藻、泡叶藻做钾盐和钠盐, 也有用海藻来做肥料和动物饲料^[3]。

据联合国粮农组织统计, 目前, 全世界海藻相关产品总产值约为 50 亿~70 亿美元^[4]。2016 年全世界海藻产量约 3 千万吨, 其中 96.5% 为人工养殖而来^[5]。我国海藻养殖源于建国后我国国防及经济建设的迫切需要而开展的, 最早是以收集天然马尾藻为原料进行制碘, 其后进行褐藻制胶及综合利用, 因海藻自然资源的受限, 才开始开展尝试海带、紫菜等藻类的人工繁育及养殖。目前在全世界, 我国已形成了以海带、紫菜、龙须菜、裙带菜等大型海藻养殖及加工为主的优势产业, 这为国家、社会及经济的发展做出了重要贡献。

本文对我国海藻繁育、养殖及综合开发的历程进行简要回顾, 针对中国科学院海洋研究所在海藻该领域的应用研究进行总结, 对未来海藻研发及产业的发展进行展望; 为适应当前转方式、调结构的需

求, 更好地实现海藻产业从量向质的方向转变, 兼顾海藻增养殖对我国海洋生态环境及绿色发展的效益, 为我国海藻研发及应用提供启发和参考。

1 海藻养殖的价值及意义

海藻养殖可为社会提供食品^[6]、工业用产品^[7]、医用材料及药源等。也可作为饲料、肥料和水产养殖的活鲜饵料。海藻养殖也可对海洋生态环境的改善发挥重要作用^[8]。与陆生植物相比, 海藻具有较高的碳同化能力^[9], 以每 100 g 干海带含碳 31.2 g, 含氮 1.36 g 来计算, 2016 年我国生产的海带可以固碳约 38 万吨, 吸收氮约 1.6 万吨, 这对于我国碳汇经济的发展将发挥重要和积极作用。

2 海藻育苗及养殖的回顾

自 20 世纪 50 年代起, 我国尝试开展海带、紫菜等藻类的人工繁育, 从最初利用野生海带进行人工

收稿日期: 2020-03-10; 修回日期: 2020-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(31772848); 科技部国际合作重点项目(2017YFE0130900)

[Foundation: National nature science foundation of China, No. 31772848; Key International Cooperation Project of MOST, No. 2017YFE0130900]

作者简介: 王秀良(1974-), 男, 山东莒南人, 博士, 研究方向为海藻遗传, E-mail: xlwang@qdio.ac.cn; 段德麟, 通信作者, 研究员, 研究方向: 主要从事海藻遗传与发育, 电话: 0532-82898556, E-mail: dlduan@qdio.ac.cn

增殖,到建立了海带等海藻人工育苗技术体系,为海藻规模化养殖提供了充足的种苗。中国科学院海洋研究所及相关兄弟单位,在以曾呈奎先生等为代表的老一辈海藻学家带领下,从海藻试验生态、生活史、繁殖的研究,到繁育、养殖技术应用和中试,通过不断实践和探索,建立了许多重要关键技术,如海带自然光低温育苗度夏技术,海带浅海筏式养殖技术,海带陶罐施肥技术,紫菜果孢子丝状体贝壳室内培养技术,海带、裙带菜克隆繁育技术,紫菜自由丝状体扩繁及附苗技术等,这不仅引领了我国海水养殖第一次浪潮,也为其他水产经济种类的繁育和养殖提供了借鉴,同时,这也为我国海带、紫菜产业规模位居世界首位提供了技术支撑,并赢得了全世界的认可和尊重。

目前,福建夏苗培育不仅满足南方海带养殖苗种的需求,也为我国北方地区海带养殖提供补充种苗来源。海带筏式养殖技术及自然光全人工夏苗低温培育技术是实现我国海带养殖产量巨增的前提;紫菜生活史的阐明及壳孢子的发现,也为紫菜养殖提供了重要的种苗来源。海带养殖病害研究,也为海带产业的发展提供技术支撑^[10-11]。通过室内培养,可获得单孢子及酶解叶状体细胞苗用于紫菜苗种供应^[12]。我国南方(广东、福建、浙江)主要养殖坛紫菜(*Pyropia haitanensis*),北方养殖(江苏、山东)主要是条斑紫菜(*Pyropia yezonesis*)。近年来,随着全球气候变暖,我国紫菜产业呈现了“南菜北养”的趋势,而且养殖规模在不断增加。现在紫菜育苗,以培育贝壳丝状体育苗为主,以培养自由丝状体育苗为辅^[13-15]。随着细胞工程技术的不断应用,许多人利用海带、裙带菜的丝状体(配子体),进行分离和保存^[16],其后也开发出以配子体克隆繁育技术为主的育苗工艺^[17-19],这可以避免海带、裙带菜因孢子体采苗带来的种质混杂。Zhang 等^[20]报道 36 千克(湿重)海带配子体,可制出 4 亿株海带苗,满足 1 300 公顷的海带养殖。我国从“九五”起,就开始了紫菜自由丝状体的培养和采苗技术的攻关,但至今依然没能在生产中得到推广和应用^[15]。

3 海藻遗传及育种现状

我国目前是世界上人工养殖海藻产量最多的国家^[5],也是最早开展海带、裙带菜品种选育的国家,迄今为止,海带、裙带菜、紫菜及龙须菜均培育出了许多新品种^[6],但这依然满足不了当前各地区、各海

域养殖特别是专一加工的需要。中国科学院海洋研究所最早提出海带新品种对海带养殖产业的发展至关重要,并参与了我国第一个海带新品种“海青一号”的培育工作^[21]。此后培育的“860”和“1170”两个高碘、高胶海带新品系推动了我国海带产业的发展^[22],近期通过不同地理品系的杂交培育的海带“205”也为产业的发展做出了贡献^[23]。中科院海洋所培育出的裙带菜新品种“海宝一号”^[24]及龙须菜“981”,分别为新世纪以来我国裙带菜及龙须菜育种领域完成的首个海藻新品种,其中龙须菜“981”为我国龙须菜的养殖产业做出了重要贡献^[25]。在海藻遗传学分析方面,对海带进行了高密度 SNP 标记遗传连锁图谱的构建,并实现海带叶片长度、宽度的 QTL 定位^[26],从分子水平开展了海带母系遗传的研究^[27];完成海带叶绿体基因组^[28]及核基因组测序。通过建立裙带菜群体,实现了性别关联的遗传连锁定位^[29]。另外,对褐藻胶代谢^[30-31]及甘露醇代谢^[32]相关的基因进行解析,为褐藻质量性状的遗传解析打下基础。此外还开展了孤雌裙带菜育苗的室内研究^[33],中国科学院海洋研究所海藻遗传及育种研究在全世界彰显了其优势和特色。

4 海藻养殖对改善生态环境的作用

由于海水鱼及其他海洋动物的超负荷养殖,带来富营养化及水体污染等许多问题,海藻与水产动物混养模式的建立,将为避免或消除水体的富营养化做出贡献^[34]。早在 20 世纪 80 年代,曾呈奎就提出了水产农牧化的建议和设想^[35],近年来,中国科学院海洋研究所又积极倡导通过海洋牧场的建设,实现海水养殖的工程化、集约化、生态化^[36]。这对我国许多海域和岛屿实施的海洋牧场的建设发挥了重要引领作用。拿山东荣成市桑沟湾为例,海湾面积约为 130 平方公里,筏架设施最远布置在离岸 15 公里处,每年可以生产 100 吨鱼类、13 万吨贝类、2 000 吨鲍鱼、80 万吨海带,平均产出为每年每平方水域 7000 吨水产品^[8]。另外是离岸式养殖技术,主要因为近岸海域可利用面积有限,需要开发出新型深海大流养殖筏架工艺和技术,需要工程装备的技术集成,满足离岸养殖的需要。目前,该技术已在山东荣成、长岛海域进行了推广和应用。

5 海藻活性物质与高值化利用

中国科学院海洋研究所也是我国最早从事海藻化工技术研发的单位,率先开展海藻化学研究、化

工制备研发。1953 年利用马尾藻试制褐藻胶获得成功,经北京医学院试制弹性印模(牙模),证明可以使用^[37],1954 年建立了我国第一个褐藻胶车间,奠定了我国海藻化工行业的基础。随着我国人工养殖海带成功,开展了海带综合利用研究,研究了海带主要化学成分随季节、地区等的变化规律,初步确定了一套较完整的海带综合利用方案,可以同时提取褐藻胶、甘露醇、碘、氯化钾等成分^[38]。20 世纪 60 年代初期对工艺进行进一步优化,确定了海带综合利用工艺路线,在我国率先开发出海带的“三大宝”:碘、褐藻胶、甘露醇,结束了我国碘缺乏的历史^[39]。20 世纪 50 年代开始纪明侯等也对琼胶开始开展研究,1957 年改进了一种琼胶凝胶强度测定器,研究了琼胶的提取与处理条件,确定了琼胶制备工艺^[40]。20 世纪 70 年代史升耀等率先开展琼胶素和珠状琼胶素凝胶的研制,提出了碱-DEAE 纤维素法制备琼胶素^[41]。20 世纪 70 年代起开始开展卡拉胶研究,研究了我国不同红藻中卡拉胶的提取和处理条件,确定了卡拉胶制备工艺。上述研究为我国海藻高值化利用产业的兴起和发展奠定了基础。在海藻化学领域,先后有“水产品综合利用——海带及卤水提碘”获得全国科学大会奖,“海藻的综合利用”,“琼胶素的研制”,“后期紫菜制取细菌培养基用琼胶”,“铸造胶的研制及应用研究”,“甲醛、碱预处理海带低温低碱消化提取褐藻胶工艺”,“卡拉胶、琼胶的研制”,“海藻碘的应用研究——活性碘海藻晶”,“卡拉胶寡糖与甘露醇衍生物的制备与生物活性”等成果分别获得省部级奖励。

海藻也含有许多陆地植物所不具有的活性物质,这是海洋药物的重要来源。中国科学院海洋研究所在 20 世纪 70 年代以海带中的甘露醇为原料,合成了烟酸甘露醇酯,并开展了药理临床试验研究证明烟酸甘露醇酯具有较好的降低血脂和扩张血管作用,作为国内首创新药在 1985 年获批投产上市^[42]。徐祖洪等在国内首先开展褐藻天然硫酸多糖—褐藻多糖硫酸酯的研究,建立了利用海带综合利用副产物制备褐藻多糖硫酸酯的工艺,提升了海带综合利用价值^[43],发现褐藻多糖硫酸酯是海带利水消肿主要活性成分,对慢性肾衰具有显著治疗作用^[44],研制了治疗慢性肾衰的海洋新药褐藻多糖硫酸酯(原料药)和海昆肾喜胶囊,并在 2003 年获得新药证书,临床试验结果表明该药对慢性肾衰患者具有降低血清尿素氮、肌酐,改善肾功能,延缓肾衰进展的

临床疗效,总有效率 85.5%,明显优于对照药物,同时对如恶心、呕吐、纳差、腹胀、身重、困倦、尿少、浮肿等情况有良好的改善作用。胶囊药剂是人们经常服用的药物之一,药剂的外壳就是空心胶囊。韩丽君等利用海藻多糖原料开发了海藻多糖空心胶囊,与传统的明胶胶囊相比,具有低含水量、低水汽透过性、抗脆碎、高温耐受性、化学惰性、快速崩解、室温可溶等优势,是一种优质的明胶胶囊替代产品,于 2005 年获得药辅证书。近年来,张全斌等聚焦肾病、神经退行性疾病、血管疾病等海洋活性糖类化合物的发现与评价,发现了多个具有显著活性的海藻多糖/寡糖^[45]。王斌贵和史大永等对海藻卤代化合物进行了研究,分离到数百个海藻卤代化合物,部分化合物具有显著降糖、抗肿瘤等活性^[46-47]。

6 结论与展望

海藻产业是海洋农业的重要组成部分,相比其它水产行业,其产业链最长,建立的繁育、养殖及加工利用技术最完备。以海带为例,从 20 世纪 50 年代起,我国年产仅几十吨,现在已达 100 万吨(成品),而且我国整个海藻养殖产量以每年 8% 的速度递增。回顾历史,该领域依然面临许多问题。1) 养殖种类有限,迫切需要增加养殖海藻新种类、新品种;2) 海藻苗种培育及海上养殖依然受到病害的侵扰,需要继续加强海藻病害的研究和应用;3) 海藻养殖产业的关键是苗种,如何建立高效、集约化的种苗培育技术工艺,满足规模化海藻养殖的需要是重中之重;4) 采用新技术开发海藻功能食品、保健品、化妆品等新产品,不仅可以促进海藻产业向更高水平的发展,也为百姓健康提供更多、更好的海藻产品。

我们深信,随着科技不断发展和进步,中国海藻产业将从过去的粗放型发展阶段进入绿色、高效发展阶段,这不仅可以缓解当前因全球气候变暖、海洋酸化所带来的许多海洋环境问题,也为促进我国海洋经济向更高质量方向发展做出贡献。

参考文献:

- [1] Fu X, Zhang M, Shao C, et al. Chinese marine material media resources: status and potential[J]. Marine Drugs, 2016, 14: 46.
- [2] McHugh D J. A Guide to the Seaweed Industry[M]. Rome: FAO, 2013.
- [3] Chapman V J. The Algae[M]. New York: ST Martin's

- Press, 1962.
- [4] Mouritsen O G. Seaweeds Edible, Available and Sustainable[M]. The University of Chicago Press, 2013.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of World Fisheries and Aquaculture 2018-Meeting the Sustainable Development Goals[M]. Rome: FAO, 2018.
- [6] Hwang E K, Yotsukura N, Pang S J, et al. Seaweed breeding programs and progress in eastern Asian countries[J]. Phycologia, 2019, 58(5): 484-495.
- [7] Hurtado A Q, Neish L C, Critchley A T, et al. Phyconomy: the extensive cultivation of seaweeds, their sustainability and economic value, with particular reference to important lessons to be learned and transferred from the practice of Eucheumatoid farming[J]. Phycologia, 2019, 58(5): 472-483.
- [8] Buschmann A H, Camus C, Infante J, et al. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity[J]. European Journal of Phycology, 2017, 52(4): 391-406.
- [9] Gao K S, McKinley K. Use of macroalgae for marine biomass production and CO₂ remediation: a review[J]. Journal of Applied Phycology, 1994, 6: 45-60.
- [10] 陈驊, 刘秀云, 刘秀珍, 等. 褐藻酸降解菌的研究 III. 海带育苗系统中脱苗和烂苗原因分析及其预防措施[J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(6): 581-589.
Chen Du, Liu Xiuyun, Liu Xiuzhen, et al. Studies on alginic acid decomposing bacteria III. The cause of the rot disease and detaching of *Laminaria* sporophytes in sporeling culture stations and their preventive measures[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1984, 15(6): 581-589.
- [11] 段德麟, 缪国荣, 王秀良. 海带养殖生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Duan Delin, Miao Guorong, Wang Xiuliang. Aquacultural Biology of *Saccharina japonica*[M]. Beijing: Scientific Press, 2015.
- [12] 曾成奎. 经济海藻种质种苗生物学[M]. 济南: 山东科学技术出版社. 1999.
Zeng Chengkui. Germplasm and Sporeling Biology of Economical Seaweeds[M]. Jinan: Shandong Sci. & Tech. Press, 1999.
- [13] 汤晓荣, 费修纁. 光温与坛紫菜自由丝状体生长发育的关系[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(5): 475-482.
Tang Xiaorong, Fei Xiugeng. Relationship between light, temperature and growth, development of conchocelis of *Porphyra haitanensis*[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(5): 475-482.
- [14] 王素娟, 沈怀舜. 条斑紫菜自由丝状体无性繁殖系快速培养及其养殖[J]. 上海水产大学学报, 1993, 2(1): 1-6.
Wang Sujuan, Shen Huaisun. The rapid culture and breeding of free living filament clone of *Porphyra yezoensis*[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 1993, 2(1): 1-6.
- [15] 朱建一, 严兴洪, 丁兰平, 等. 中国紫菜原色图集[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
Zhu Jianyi, Yan Xinghong, Ding Lanping, et al. Atlas of Cultivation Pictures of Chinese Zicai[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2016.
- [16] 方宗熙, 欧毓麟, 崔竟进, 等. 海带配子体无性繁殖系培育成功[J]. 科学通报, 1978, 23(2): 115-116.
Fang Zongxi, Ou Yulin, Cui Jingjin, et al. The successful culture of gametophyte clones of *Saccharina japonica*[J]. Chinese Science Bulletin, 1978, 23(2): 115-116.
- [17] Pang S J, Wu C Y. Study on gametophyte vegetative growth of *Undaria pinnatifida* and its applications[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1996, 14(3): 205-210.
- [18] Li D P, Zhou Z G, Liu H H, et al. A new method of *Laminaria japonica* strain selection and sporeling raising by the use of gametophyte clones[J]. Hydrobiologia, 1999, 398/399: 473-476.
- [19] 杨迎霞. 海带配子体克隆育苗技术及培育优势杂交苗种的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
Yang Yingxia. Research on seedling raising and superior hybrid strain creating using gametophyte clones of *Saccharina japonica*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [20] Zhang Q S, Qu S C, Cong Y Z, et al. High throughput culture and gametogenesis induction of *Laminaria japonica* gametophyte clones[J]. Journal of Applied Phycology, 2008, 20(2): 205-211.
- [21] 方宗熙, 吴超元, 蒋本禹, 等. 海带“海青一号”的培育及其初步的遗传分析[J]. 植物学报, 1962, 10(3): 197-209.
Fang Zongxi, Wu Chaoyuan, Jiang Benyu, et al. The breeding of a new breed of Haidai (*Laminaria japonica* Aresch.) and its primary genetic analysis[J]. Acta Botanica Sinica, 1962, 10(3): 197-209.
- [22] Wu C Y, Lin G H. Progress in the genetic and breeding of economic seaweeds in China[J]. Hydrobiologia, 1987, 151/152: 57-61.
- [23] 逢少军, 刘峰, 刘启顺, 等. 海带“205”[J]. 中国水产, 2015, (10): 59-60.
Pang Shaojun, Liu Feng, Liu Qishun, et al. The new breed “205” of *Saccharina japonica*[J]. Journal of Chinese Fishery, 2015, (10): 59-60.
- [24] Shan T F, Pang S J, Li J, et al. Breeding of an elite cultivar Haibao No.1 of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae) through gametophyte clone crossing and consecutive selection[J]. Journal of Applied Phycology,

- 2016, 28: 2419-2426.
- [25] 许璞, 张学成, 王素娟, 等. 中国主要经济海藻的繁殖与发育[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- Xu Pu, Zhang Xuecheng, Wang Sujuan, et al. The Reproduction and Development of Several Dominant Economical Seaweeds in China[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2013.
- [26] Wang X L, Chen Z H, Li Q Y, et al. High-density SNP-based QTL mapping and candidate gene screening for yield-related blade length and width in *Saccharina japonica* (Laminariales, Phaeophyta)[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 13591.
- [27] Li Q Y, Wang X L, Zhang J, et al. Maternal inheritance of organellar DNA demonstrated with DNA markers in crosses of *Saccharina japonica* (Laminariales, Phaeophyta)[J]. Journal of Applied Phycology, 2016, 28: 2019-2026.
- [28] Wang X L, Shao Z R, Fu W D, et al. Chloroplast genome of one brown alga, *Saccharina japonica* (Laminariales, Phaeophyta): phylogenomic analysis with other photosynthetic chromists[J]. Marine Genomics, 2013, 10: 1-9.
- [29] Shan T F, Pang S J, Li J, et al. Construction of a high-density genetic map and mapping of a sex-linked locus for the brown alga *Undaria pinnatifida* (Phaeophyta) based on large scale marker development by specific length amplified fragment (SLAF) sequencing[J]. BMC Genomics, 2015, 16: 902.
- [30] Zhang P Y, Shao Z R, Li L, et al. Molecular characterization and biochemical properties analysis of phosphomannomutase/phosphoglucomutase (PMM/PGM) in brown seaweed *Saccharina japonica*[J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 30: 2687-2690.
- [31] Zhang P Y, Shao Z R, Jin W H, et al. Comparative characterization of two GDP-mannose dehydrogenase genes from *Saccharina japonica* (Laminariales, Phaeophyceae)[J]. BMC Plant Biology, 2016, 16: 62-72.
- [32] Shao Z R, Zhang P Y, Li Q Y, et al. Characterization of mannitol-2-dehydrogenase in *Saccharina japonica*: evidence for a new polyol-specific long-chain dehydrogenases/reductase[J]. Plos One, 2014, 9(5): e97935.
- [33] Shan T F, Pang S J, Gao S Q. Novel means for variety breeding and sporeling production in the brown seaweed *Undaria pinnatifida* (Phaeophyta): crossing female gametophytes from parthenosporophytes with male gametophyte clones[J]. Phycological Research, 2013, 61: 154-161.
- [34] Chopin T, Buschmann A H, Halling C, et al. Integrating seaweeds into marine aquaculture systems: a key toward sustainability[J]. Journal of Phycology, 2001, 37: 975-986.
- [35] 曾呈奎. 关于我国专属经济海区水产生农牧化的一些问题[J]. 自然资源, 1979, 1: 58-64.
- Zeng Chengkui. Some problems on marine ranching of aquaculture in the exclusive economic zone in China[J]. Natural Resources, 1979, 1: 58-64.
- [36] 杨红生. 海洋牧场构建原理与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Yang Hongsheng. Principle and Practice of Marine Ranching Construction[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [37] 褐藻胶试制成功[J]. 科学通报, 1953, 7: 93.
- Chinese Science Bulletin. The successful trial-extraction of algin from *Sagassum*[J]. Chinese Science Bulletin, 1953, 7: 93.
- [38] 纪明侯, 海藻的综合利用[J]. 科学通报, 1959, 4: 8-10.
- Ji Minghou. The comprehensive exploitation of seaweeds[J]. Chinese Science Bulletin, 1959, 4: 8-10.
- [39] 纪明侯, 史升耀, 蒲淑珠, 等. 海带综合利用的进一步研究[J]. 海洋科学集刊, 1963, 3: 77-99.
- Ji Minghou, Shi Shengyao, Pu Shuzhu, et al. Further studies of comprehensive exploitation of seaweeds[J]. Studia Marina Sinica, 1963, 3: 77-99.
- [40] 纪明侯, 史升耀, 刘万庆. 江蓠琼胶的研究 I. 琼胶的提取与处理[J]. 水产学报, 1965, 2(2): 1-11.
- Ji Minghou, Shi Shengyao, Liu Wanqing. Study of agar of *Gracilaria* I. the extraction and treatment of agar[J]. Journal of Fisheries, 1965, 2(2): 1-11.
- [41] 史升耀, 刘万庆, 石光汉, 等. 琼胶素与珠状琼胶素凝胶的研制[J]. 海洋科学, 1979, 3(1): 10-15.
- Shi Shengyao, Liu Wanqing, Shi Guanghan, et al. The creation of agarose with ball morphology[J]. Marine Science, 1979, 3(1): 10-15.
- [42] 王兴昌. 国内首创新药一甘露醇烟酸酯投产上市[J]. 齐鲁药事, 1986, 1: 41.
- Wang Xingchang. The new medicine-mannitol nicotinate made to market in China[J]. Qilu Pharmaceutical Affairs, 1986, 1: 41.
- [43] 张全斌, 徐祖洪. 几种褐藻中褐藻多糖硫酸酯的分离及分析, 海洋科学, 1997, 21(3): 55-58.
- Zhang Quanbin, Xu Zuhong. The extraction and analysis of fucodian from several brown seaweeds[J]. Marine Science, 1997, 21(3): 55-58.
- [44] Zhang Q B, Zu Z H, Li Z E, et al. Effects of fucoidan on chronic renal failure in rats[J]. Planta Medica, 2003, 69(6): 637-641.
- [45] Luo D, Zhang Q, Wang H, et al. Fucoidan protects against dopaminergic neuron death in vivo and in vitro[J]. European Journal of Pharmacology, 2009, 617(1-3): 33-40.
- [46] Wang B, Gloer J B, Ji N, et al. Halogenated molecules of rhodomelaceae origin: chemistry and biology[J]. Chemical Reviews, 2013, 113(5): 3632-3685.
- [47] Guo C, Wang L, Li X, et al. Discovery of novel bromo-

phenol-thiosemicarbazone hybrids as potent selective inhibitors of poly(ADP-ribose) polymerase-1 (PARP-1) for

use in cancer[J]. Journal of Medicinal Chemistry, 2019, 62(6): 3051-3067.

Perspective on propagation, cultivation and utilization of economical seaweeds

WANG Xiu-liang^{1, 2, 3}, ZHANG Quan-bin^{1, 2, 3}, DUAN De-lin^{1, 2, 3}

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

Received: Mar. 10, 2020

Key words: *Saccharina*; *Pyropia*; *Gracilaria*; *Undaria*; breeding; cultivation; integrative utilization

Abstract: Seaweed cultivation and utilization constitute an important branch of marine agronomy and refinery industry. Due to the efforts of several generations in the last century, many prominent techniques were successfully implemented for the nursery cultivation of *Saccharina*, *Pyropia*, *Gracilaria*, *Undaria*, and *Sargassum*. These breakthroughs guaranteed the industrialization of these commercial seaweeds in China and provided a solid foundation for China to reach the top in the world's seaweed industry. The seaweed cultivation provides food, phycocolloids, nutraceuticals, functional foods, cosmeceuticals, pharmaceuticals etc., to humans. It also immensely benefits the socio-economic development. By absorbing large amounts of CO₂, N, and P from the environment, it plays an important role in improving the ecological environment, especially in terms of ocean health. The objective of this paper is to concisely review the research progress of seaweed cultivation and utilization in China, including their history, the key techniques that are implemented, and the contributions of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Furthermore, the paper explores the prospective trends and future problems in the development of cultivation and utilization of the economical seaweeds.

(本文编辑: 杨 悦)