海萝属藻类繁殖生物学及增养殖研究进展*

郭永坚[1] 张文文[1,2] 李俊伟[1] 朱长波[1] 颉晓勇[1] 郭奕惠[1] 陈素文[1**]

([1]中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广州 510300; [2]上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘 要 海萝属(*Gloiopeltis*)的经济价值颇高,其藻类提取物在化工、医药和食品等领域有着广泛应用,但近年来的过度开采导致自然海区内海萝属藻类资源量日益下降。目前海萝属藻类仍处于粗放式增殖状态,亟待开展规模化的人工养殖,然而其养殖方面的相关研究与其他经济海藻相比明显滞后。本文概述了海萝属的空间分布情况,并对海萝属藻类的繁殖生物学研究进行回顾,介绍了其生活史、繁殖方式、孢子保存方法及萌发过程。对生理生态学研究进行了重点描述,包括影响孢子释放、附着、萌发与成活的因素,以及影响藻体生长、繁殖及存活的因素。概述了海萝属藻类增养殖领域的研究及应用现状。指出选育耐高温且生长性状良好的新品系是今后海萝属藻类养殖业发展的重点内容。

关键词 海萝; 鹿角海萝; 孢子; 附着基; 盐度; 光照

中图分类号 S917.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)8-2339-05

Breeding, restocking and culture of *Gloiopeltis*: A review. GUO Yong-jian[1], ZHANG Wen-wen[1,2], LI Jun-wei[1], ZHU Chang-bo[1], XIE Xiao-yong[1], GUO Yi-hui[1], CHEN Su-wen[1**]

([1]*Key Lab of South China Sea Fishery Resources Exploitation &Utilization, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou* 510300, *China*; [2]*College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(8): 2339-2343.

Abstract: The extracts of algae, *Gloiopeltis*, have been widely used in chemical, medical and food industries; however, over-exploitation has caused the scarcity of *Gloiopeltis* resources. Large-scale culture of *Gloiopeltis* is important to solve the shortage of natural source of *Gloiopeltis*, while our understanding of *Gloiopeltis* is obviously lagged behind that of other economic algae. The current review evaluates the spatial distribution and presents the reproductive biology of *Gloiopeltis*, including the life cycles, reproductive modes, storage methods and spore germination. We describe several ecological and physiological factors that affect spore release, attachment, germination and survival, as well as algae growth, reproduction and survival. Moreover, we describe the status of research and application of *Gloiopeltis* propagation. We suggest that finding and breeding new varieties of *Gloiopeltis* with high temperature resistance and superior growth traits is of great significance for future *Gloiopeltis* aquaculture.

Key words: *Gloiopeltis furcata*; *Gloiopeltis tenax*; spores; substrates; salinity; light.

海萝属(*Gloiopeltis*)隶属于红藻门(Rhodophyta)、内枝藻科(Endocladiaceae),种类主要包括海萝(*Gloiopeltis furcata*)、鹿角海萝(*Gloiopeltis tenax*)和小海萝(*Gloiopeltis complanata*)(曾呈奎等,1962;夏邦美,2004)。其中,经济价值较高的为海萝和鹿角海萝。该属藻类不仅可供直接食用,其提取物在化工、医药和食品等领域具有广泛应用(余杰等,2004;于广利等,2009):海萝冲泡服用可治疗痢疾和肠炎;海萝胶可用于优质丝织品的浆丝;海萝多糖具有降血糖、抗肿瘤和增强免疫的作用(余杰等,2007;Zheng *et al.*,2012)。

由于人为的过度开采,自然海区内海萝属藻类

*中国水产科学研究院基本科研业务费专项(2014A07XK01)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(中国水产科学研究院南海水产研究所)项目(2013YD05、2010TS02)和农业部东海海水健康养殖重点实验室项目(2013ESHML08)资助。

**通讯作者 E-mail: chensuwen407@163.com

收稿日期: 2014-11-21 接受日期: 2015-02-27

资源量日益下降,亟待开展规模化的人工养殖。本文对海萝属藻类的繁殖生物学、生态及增养殖等方面的研究内容进行归纳总结,以期为海萝属藻类的产业化养殖以及相关的基础研究提供参考。

1 空间分布

海萝属藻类属于暖温带性海藻,仅分布于北太平洋沿岸(中国、日本、朝鲜、越南等),其中鹿角海萝多生于冬季水温不低于12~13 ℃的海区,在中国只分布于浙江以南海区;海萝的分布较广,在中国沿海均有分布(陶平等,2001;李宪璀等,2002;夏邦美,2004;傅财华等,2011)。从垂直分布上,海萝主要分布于小潮平均高潮线至小潮平均低潮线之间的中潮区,鹿角海萝主要分布上于中潮区中部至低潮区上缘(吴进锋等,2007)。刘洪亮(2013)的调查表明,岩礁底质、向海开发度较大、迎浪和适中潮位海萝的生物量较多。吴进锋等(2007)报道,广东沿海的海萝和鹿角海萝主要分布于粤东至珠江口西侧的川山群岛,两种海萝的最高生物量分别出现在大亚湾杨梅坑和珠江口大万山岛;小海萝则仅在大鹏湾至大亚湾海域出现。

2 繁殖生物学

2.1 生活史及繁殖方式

海萝属藻类的孢子体与雌雄配子体的外形在非繁殖期难以区分(须藤俊造,1957),其生活史为:成熟孢子体产生四分孢子,四分孢子释放后发育成雌雄配子体,雄配子体成熟产生精子,雌配子体成熟产生果胞,果胞受精后形成果孢子囊(内含果孢子),果孢子放出后发育为孢子体;另外,在一些四分孢子体上存在着无性繁殖形成的多分孢子(paraspore)块(其外形似雌配子体上的囊果),多分孢子发育成四分孢子体,不存在世代交替(须藤俊造,1948 a)。Sjöstedt(1926)和Kylin(1930)较为详细地对海萝的生殖器官发育进行了报道,但并未看到连络丝的形成和辅助细胞的会合阶段,为弥补这一缺陷,樊恭烜等(1964)对海萝的雌性生殖系统和囊果的完整发育过程展开了细致研究。

海萝属藻类既可进行孢子繁殖(四分孢子和果胞子)也能依靠海萝座(藻体死亡后残留在生长基上的基部)繁殖(猪野俊平,1947;须藤俊造,1957)。借助现代化技术——组织培养法(刘树霞等,2007;初少华等,2011)也能产生海萝新个体:陈菊琦(1995)采用新型混合酶首次成功分离获得了大量的海萝原生质体,海萝原生质体经培养后可形成多细胞团或愈伤组织状细胞团;殷明焱采用切取海萝组织块进行培养,结果显示海萝直立枝和盘状体切块能形成具有色素的单列丝状体,丝状体进一步分裂和融合形成盘状体,并在盘状体上长出直立枝(Yin *et al.*,2007)。

2.2 孢子萌发

海萝属藻类拥有相同的生活史,果孢子(有性生殖)和四分孢子(无性生殖)在孢子形态、附着过程、萌发过程、初期藻体形态等方面均较相似。海萝属的发育均属直接盘状型(吴进锋等,2009):孢子附着后进行第一次、第二次细胞分裂,经多次分裂后成为多细胞的半球状发生体,其底部边缘形成薄壁细胞,薄壁细胞突起不断分裂,最终相互合并形成边缘规整的盘状体,盘状体顶部向上隆起形成颜色较深的生长点,生长点继续分化生长,使盘状体在扩大面积的同时向上生长,最终萌发出芽体。

2.3 孢子保存

从种质保存目的出发,陈国宜等(1989)研究了海萝孢子的超低温保存,结果显示,海萝孢子在液态氮中保存5个月不影响其存活。从进行反季节育苗的目的出发,陈素文(2012)通过保存海萝种藻来保存其孢子,结果表明,对不同风干程度的海萝种藻进行保存,种藻风干至原鲜重25%时孢子存活最好,该风干程度的海萝种藻在-18 ℃冰箱冻存6个月后孢子的释放量为对照组(未经风干和保存的种藻)的77.6%,且孢子附着率与对照组差异不明显;就种藻的长期保存(8个月以上)而言,在较低温度(-36 ℃和-80 ℃冰箱)保存的效果优于-18 ℃冰箱。

2.4 繁殖季节

不同地区海萝属藻类的繁殖季节各不同,新崎盛敏(1947)的调查表明在日本伊势,海萝属藻类的繁殖季节为2—4月,进入5月份藻体逐渐腐烂死亡。吴进锋(2007)报道广东沿海海萝属藻类的繁殖期为2—3月;张泽宇等(2009)报道大连沿海海萝的繁殖期为4月下旬至6月下旬,比广东晚近2个月。

3 生理及生态影响因素

3.1 影响孢子释放、附着、萌发与成活的因素

日本的学者对海萝属藻类孢子放散、附着进行研究,阐明自然海区孢子放散量在涨潮后30 min内

(一次放散情况下,每克藻体约释放孢子 10^5 ~ 10^6 个)最多,2 h 以后几乎不放散;孢子释放后一般在 20~40 s 即可附着,在放散 2 h 后就失去附着力;附着的合适温度范围为海萝 15~20 ℃,鹿角海萝 18~25 ℃(须藤俊造,1948a;1948b)。

室内实验结果表明,温度、光照及盐度对孢子的萌发影响显著。孢子萌发为盘状体的合适温度范围为:海萝 8~12 ℃,鹿角海萝 12~16 ℃。盘状体萌发出直立体的最适温度为:海萝 20 ℃,鹿角海萝 24 ℃。海萝和鹿角海萝盘状体生长及存活的最佳光照强度分别为 80~130 μmol photons · m^{-2} · s^{-1} 与 80~105 μmol photons · m^{-2} · s^{-1}(Chen *et al.*,2014);海萝孢子萌发的适宜盐度范围为 31~36,鹿角海萝的为 26~36(吴进锋等,2011;陈利雄等,2013)。

在合适的培养条件下,海萝属藻类从孢子附着后开始萌发到盘状体长出直立体约需 40~50 d(Chen *et al.*,2014)。在此期间,干露过程会影响孢子的萌发生长,张泽宇等(2009)的室内实验表明,同期采集的孢子在定期干露后形成直立枝所需的时间比对照组提前 10 d 以上。

附着基的类型也可以对海萝孢子的萌发生长产生影响。张泽宇等(2009)的室内实验表明:鹿角海萝孢子附着时对附着基的选择不严格(在尼龙绳、维尼纶绳和贝壳上均能很好附着),但孢子萌发、盘状体生长及直立枝形成需要硬质的附着基条件。Chen 等(2014)的研究显示,海萝孢子在尼龙绳、棕绳和维尼纶绳上未能正常萌发生长;海萝属藻类的合适附着基为 PVC 板及塑料平网。

此外,植物生长调节剂——三十烷醇对海萝孢子萌发有显著影响:较低浓度(0.5~1.0 mg · L^{-1})三十烷醇对盘状体的生长及其萌发出直立体具有促进作用,而在较高浓度(2.0 mg · L^{-1})下盘状体的生长和存活均明显低于对照组(陈素文等,2011b)。

3.2 影响藻体生长、繁殖及存活的因素

影响海萝属藻类藻体生长、繁殖及存活的环境因素主要包括水温、光照及盐度。生态调查结果表明,在广东沿海的秋末冬初(10—11 月),当表层水温下降到 23 ℃以下时开始出现幼体,入夏(4—5 月)后当表层水温升至 23 ℃以上时,藻体开始腐烂(吴进锋等,2007)。室内实验(陈素文等,2014b)结果显示:海萝藻体生长的最适温度为 10~14℃,最适光照强度为 6500~10500 lx,最适盐度为 18~38;营养盐的不同浓度对藻体的生长影响不明显。

两种海萝室内培养实验结果表明:可培养海萝成熟释放孢子的适宜水温为 10~20 ℃,而鹿角海萝为 12~24 ℃;在光照 2500~8500 lx 的范围内,2 种海萝均能成熟放散孢子;培养海水中不添加营养盐对 2 种海萝的成熟没有影响,培养液中过高的 N、P 水平(硝酸钠 80 mg · L^{-1}、磷酸二氢钾 8 mg · L^{-1})反而不利于藻体的成熟及孢子放散附着(陈素文等,2008)。

海萝藻体缺乏用于减缓水分流失的特殊的保水结构(角质层)或化学物质(粘液),其保水能力较弱(Lipkin *et al.*,1993)。干露、光照及其交互作用对海萝光合活性的影响实验(刘洪亮等,2014)表明,在弱光(100 μmol photons · m^{-2} · s^{-1})低温(11 ℃)下,干露 72 h 左右的海萝在重新浸水后可在短期内恢复光合活性;而在强光(1000 μmol photons · m^{-2} · s^{-1})和干露 6 h 叠加时,藻体光合活性降低程度最大,完全恢复所需时间最长。环境因子对海萝藻体存活的研究(陈素文等,2014)表明,海萝藻体在阳光下干晒 3 h(气温达 26~28 ℃),50%以上的藻体变白死亡;阳光下晒 2 h 后再泡淡水 2 h 或泡淡水 2 h 后干晒 2 h,70%以上的藻体变白死亡。

4 增养殖

4.1 自然海区采苗和人工育苗

日本试验过在海萝的繁殖期人工投石于海萝资源丰富的海域,也尝试过先置网帘于海萝生长繁茂的岩石上,数日后再将附有孢子的网帘移至内湾进行养殖的自然海区人工采苗法,还曾试验过在涨潮前喷洒孢子水于海区岩石上或移植海萝种藻于新开辟养殖场地的采苗法(须藤俊造,1948c;九万田一巳,2000)。然而,由于海萝的繁殖期为春夏季,自然海区采苗后,培苗阶段处于夏季,而夏季海萝的敌害生物众多,且较高的水温不宜其幼苗的生长,因此采用上述生产方式,产出较低。

近年来国内学者在海萝属藻类人工育苗方面取得了一系列的进展:张泽宇等(2009)开展鹿角海萝室内人工育苗的研究,在实验室成功培养出鹿角海萝苗种;陈素文等(2010)采用种藻保存育苗方法进行海萝的反季节育苗,成功地培养出海萝苗种,相关的生产试验效果较好(郝向举,2012)。

4.2 增养殖方法及应用

日本多采用去除海萝生长的岩礁上的杂藻的方法来进行海萝属藻类的增殖(清礁法),还在自然海

区采苗(网帘、投石、移植种藻、孢子喷洒法)后进行养殖。这些增养殖手段效果较差,有的已逐渐被放弃(九万田一巳,2000)。日本作为最早研究海萝属藻类的国家,截至目前,仍没有海萝属藻类人工育苗及养殖规模化的报道。

中国也一直采用清礁法进行海萝属藻类的增殖,直到近几年,陈素文等才开始进行海萝属藻类的海区及陆地工厂化养殖研究:针对海萝藻体较小,难以采用夹苗法进行海区养殖的缺点,研制了透明养殖装置使海萝藻殖体的海区养殖成为可能(张汉华等,2014);在室外透明顶棚下吊挂透明薄膜装置,进行海萝藻殖体的立体式工厂化养殖(陈素文等,2014a);用人工育苗培养出的苗种进行海区养殖,试验出海萝培苗和海区养殖的合适附着器(陈素文等,2011a;Chen *et al.*,2014)。

5 展 望

海萝属藻类的藻体较小,海萝株高只有4~10 cm,鹿角海萝5~12 cm(夏邦美,2004),严重制约其养殖产量。另一方面,海萝属藻类合适的生长温度低于23 ℃,中国适合海萝属藻类生长的时期非常短。上述问题的解决有待于通过海萝属藻种选育工作的开展,选择出耐高温及具有长藻体性状的新品系,以开创海萝属藻类养殖的新局面。目前,海萝属藻类的选育领域尚处空白阶段,有待技术突破。

参考文献

陈国宜, 阙求登. 1989. 几种红藻孢子的超低温保存. 热带海洋学报, **8**(1): 67-72.

陈菊琦. 1995. 新型混合酶分离海萝原生质体的研究. 厦门水产学院学报, **17**(2): 1-7.

陈利雄, 吴进锋, 陈素文, 等. 2013. 盐度对海萝孢子附着、萌发和成活的影响. 南方水产科学, **9**(1): 53-57.

陈素文, 陈利雄, 黄 忠, 等. 2014a. 一种海萝属藻类工厂化养殖方法、养殖棚及养殖装置. 中国: 201210124825.5.

陈素文, 陈利雄, 吴进锋, 等. 2011a. 一种用于海萝属藻类人工育苗的采苗器. 中国: 201020281128.7.

陈素文, 陈利雄, 朱长波, 等. 2014b. 环境因子对海萝藻体生长及成活的影响. 南方水产科学, **10**(3): 92-96.

陈素文, 吴进锋, 陈利雄, 等. 2008. 2种海萝室内壤养成熟及孢子放散、附着的初步研究. 南方水产, **4**(2): 1-5.

陈素文, 吴进锋, 陈利雄, 等. 2011b. 三十烷醇对海萝孢子萌发、幼苗及藻体生长的影响. 华南农业大学学报, **32**(1): 78-82.

陈素文, 吴进锋, 陈利雄. 2012. 海萝种藻冷冻保存对其释放孢子量及孢子附着的影响. 热带海洋学报, **31**(1): 67-71.

陈素文, 吴进锋, 张汉华, 等. 2010. 海萝属藻类种藻的保存育苗方法. 中国: 200810030121.5.

初少华, 唐永政, 张树宝, 等. 2011. 海藻组织培养研究进展. 水产科学, **30**(4): 244-248.

樊恭炬, 范允平. 1964. 红藻生殖器官的研究 Ⅳ.海萝. 植物学报, **12**(3): 274-276.

傅财华, 蒋霞敏, 毛欣欣, 等. 2011. 南麂列岛大柴屿潮间带底栖海藻分布特征. 宁波大学学报: 理工版, **24**(2): 25-30.

郝向举. 2012. "海萝属藻类人工育苗技术研究"成果总体达国际先进水平. 中国水产, (1):46-47.

李宪璀, 范 晓, 韩丽君, 等. 2002. 中国黄、渤海常见大型海藻的脂肪酸组成. 海洋与湖沼, **33**(2): 215-224.

刘洪亮, 李雪萌, 南国宁, 等. 2014. 潮间带红藻—海萝光合活性对干露胁迫的响应.应用生态学报, **25**(5): 1483-1490.

刘洪亮, 唐永政, 于永强, 等. 2013. 山东小黑山岛海萝生物量和长度的时空变化及影响因素. 应用生态学报, **24**(11): 3259-3264.

刘树霞, 邹定辉, 徐军田. 2007. 大型海藻的组织培养及其应用. 植物生理学通讯, **43**(3): 605-611.

陶 平, 许庆陵, 姚俊刚, 等. 2001. 大连沿海13种食用海藻的营养组成分析. 辽宁师范大学学报: 自然科学版, **24**(4): 406-410.

吴进锋, 陈素文, 陈利雄, 等. 2007. 广东沿海海萝属藻类生态与分布调查. 南方水产科学, **3**(5): 7-13.

吴进锋, 陈素文, 陈利雄, 等. 2009. 鹿角海萝孢子萌发过程不同发育阶段的形态. 南方水产科学, **5**(5): 15-18.

吴进锋, 陈素文, 陈利雄, 等. 2011. 海水盐度对鹿角海萝孢子生长发育及存活的影响. 上海海洋大学学报, **20**(3): 358-362.

夏邦美. 2004. 中国海藻志: 第2卷, 红藻门, 第3册, 隐丝藻目. 北京:科学出版社: 50-53.

余 杰, 许肇成, 颜璐璐, 等. 2007. 海萝多糖抗突变与抗肿瘤作用的研究. 汕头大学学报: 自然科学版, **22**(2): 59-63.

余 杰, 颜璐璐, 陈美珍, 等. 2004. 海萝的研究进展. 食品研究与开发, **25**(4): 97-100.

于广利, 胡艳南, 杨 波, 等. 2009. 海萝藻(Gloiopeltis furcata)分离及其结构变化. 中国海洋大学学报, **39**(5): 925-929.

曾呈奎, 张德瑞. 1962. 中国经济海藻志. 北京: 科学出版社: 123-178.

张汉华, 陈素文, 朱长波, 等. 2013. 一种海萝属藻类海区养殖装置及使用该装置的养殖方法. 中国: 201210051178.X.

张泽宇, 韩余香, 李献刚, 等. 2009. 鹿角海萝的繁殖生物学及室内培养的研究. 大连水产学院学报, **24**(1): 1-7.

九万田一巳, 小松光男, 新村巖, 等. 2000. 鹿児島県水産技術のあゆみ,第3編 増・養殖部門-1. 日本:鹿児島県水産技術者OB なぎさ会.

新崎盛敏. 1947. 伊勢・三河湾産フクロフノリの生态学的研究. 日本水産学会誌, **13**(4): 164-166.

须藤俊造. 1948 a. フノリのparasporeに就いて(海藻胞子附けの研究 第三报). 日本水産学会誌, **14**(2): 87-89.

须藤俊造. 1948 b. フノリの胞子の放出,浮游及び着生(海藻の胞子附け研究 第四报). 日本水産学会誌, **14**(4): 184-188.

须藤俊造. 1948 c. マフノリのタネマキの研究 (海藻の 胞子付けの 研究 第五報). 日本水産学会誌, **15**(5): 226-228.

猪野俊平. 1947. 海藻の發生. 日本: 笠井出版社: 140-144.

Chen SW, Chen LX, Zhu CB, *et al*. 2014. Spore culture of Red Seaweed, *Gloiopeltis Furcata*. *Journal of the World Aquaculture Society*, **45**: 355-492.

Chen SW, Wu JF, Chen LX, *et al*. 2011. Effects of light and temperature on the attachment and development of *Gloiopeltis tenax* and *Gloiopeltis furcata* tetraspores. *Journal of Applied Phycology*, **23**: 1045-1051.

Lipkin Y, Beer S, Eshel A. 1993. The ability of *Porphyra linearis* (Rhodophyta) to tolerate prolonged periods of desiccation. *Botanica Marina*, **36**: 517-524.

Yin MY, Hu XY, Tseng CK. 2007. Filament formation and differentiation in seven species of red algae. *Botanica Marina*, **50**:113-118.

Zheng JJ, Chen YC, Yao F, *et al*. 2012. Chemical composition and antioxidant/antimicrobial activities in supercritical carbon dioxide fluid extract of *Gloiopeltis tenax*. *Marines Drugs*, **10**: 2634-2647.

作者简介 郭永坚,男,1986 年生,硕士,助理研究员,从事养殖水环境调控及藻类养殖的研究。E-mail: gyjidhx@ hotmail.com

责任编辑 李凤芹