

厦门筲筴湖龙须菜生长的主要影响因素

郑新庆¹, 姚雪芬¹, 黄凌风¹, 郭 丰¹, 林玉美², 徐向伟², 傅迅毅²

(1. 厦门大学 海洋学系, 福建 厦门 361005; 2. 厦门市筲筴湖管理中心, 福建 厦门 361001)

摘要: 通过在高度富营养化的海水泻湖——厦门筲筴湖开展龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)的延绳夹苗挂养与网笼挂养实验和室内端足类啃食海藻实验, 探讨了影响筲筴湖龙须菜生长的主要因素。结果显示, 筲筴湖龙须菜的表现生长率为 0.42%/d, 实际生长率为 4.80%/d, 强壮藻钩虾(*Ampithoe valida*)的摄食量占龙须菜总生长量的 91.4%。而且, 筲筴湖的水流缓慢, 使藻体附着最高可达 2.32 g/g FW 的颗粒物, 明显抑制了龙须菜的生长。以上研究表明, 端足类的啃食作用和不良的水动力条件是导致筲筴湖龙须菜表现生长率低的主要原因。

关键词: 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*); 生长率; 端足类摄食; 水动力条件; 筲筴湖

中图分类号: S941.42

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)12-0047-05

厦门筲筴湖为高度富营养化的人工泻湖, 由于水交换隔阻, 渐成臭湖。20 世纪 80 年代以来, 经过导流渠修建和多次清淤作业, 湖区生态环境有一定的改善^[1]。但由于环湖流域的污染源尚未根本解决, 营养盐, 尤其氨盐浓度很高, 常年远超四类海水水质标准, 再加上湖区水交换差, 水流速度慢, 因此每年赤潮频发, 严重影响水体生态平衡及湖区景观。大型海藻作为有效的海水环境生物过滤器, 能有效的去除水体 N、P 等生源要素, 控制水体富营养化、抑制赤潮的发生^[2~6]。因此, 在湖中栽培大型海藻去除过量的营养盐, 可能是改善筲筴湖水质环境的一条行之有效的途径。

大型海藻对营养盐的吸收能力和其生长速率密切相关, 生长越快, 海藻相应吸收的营养盐就越多, 对水体的净化效率越高。但大型海藻的生长受到各种因子的制约。在自然海区, 除了受温度和光照^[7~9]等理化因子影响外, 啃食者的摄食作用^[10~15]和水动力条件^[16,17]也是影响大型海藻生长的重要因子, 但目前国内研究较少。

龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)是属于红藻门(Rhodophyta)杉藻目(Gigartinales)江蓠科(Gracilariaceae)江蓠属(*Gracilaria*)的大型海藻, 原产于北方温带和冷温带地区, 后经引种, 在南方有大规模的养殖, 并取得较好的经济效率和环境效益。作者在筲筴湖栽培龙须菜, 以期了解啃食者的摄食作用和筲筴湖的水动力条件如何影响龙须菜的生长, 为利用大型海藻开展筲筴湖水体的生态修复提供依据。

1 材料与方 法

1.1 龙须菜来源

实验所用海藻龙须菜取自福建省莆田平海海藻养殖区。原产于山东沿海, 为中国科学院海洋研究所选育的 L 品系。

1.2 笼养和延绳挂养方式的龙须菜生长实验

本实验用网笼挂养和延绳夹苗挂养的方式栽培龙须菜。用于培养龙须菜的网笼, 由 4 部分组成: 浮球、吊绳、网笼(铁制框架, 外包鱼网, 直径为 36 cm, 高 10 cm)和重锤; 挂养所用苗绳为直径约 5 mm 的尼龙绳。

3 月 22 日~ 5 月 26 日在筲筴湖外湖开展龙须菜的延绳夹苗挂养和网笼挂养栽培比较实验。笼养实验中每个网笼放龙须菜的密度为 2 kg/m², 培养深度 50 cm, 实验设置 11 个重复, 定期测定龙须菜的质量。挂养实验中绳长 2 m, 夹苗 5 束, 每束相隔 15 cm, 苗绳两端固定在木桩上, 定期测定龙须菜的长度。龙须菜栽培期水温为 15~ 26℃。

1.3 强壮藻钩虾对龙须菜的摄食作用研究

为评估强壮藻钩虾(*Ampithoe valida*)摄食对笼

收稿日期: 2007-05-20; 修回日期: 2007-10-10

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA091704); 厦门市科技计划项目(3502Z20041060)

作者简介: 郑新庆(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向: 海洋恢复生态学; 黄凌风, 通讯作者, E-mail: huanglf@xmu.edu.cn

养龙须菜表观生长的影响,将5个网笼连成串培养在筲筴湖中,龙须菜初始密度为 2 kg/m^2 (鲜质量,下同),培养水深分别为30,55,90,110,140 cm。一星期后取回计算其中藻钩虾数量和体质量。

实验室内分别取个体大小约为6,8,10,12 mm的藻钩虾各20只,用过滤海水培养在500 mL三角烧瓶并不断充气,每天定量喂养龙须菜,根据喂养量和残饵量之差计算日摄食量。实验周期为6 d。

1.4 筲筴湖水的流速、悬浮颗粒物浓度和龙须菜的附着量

利用RCM9海流计(挪威安德海流计)测定了高平潮和低平潮期筲筴湖外湖龙须菜栽培点的水流速度。悬浮颗粒物的浓度采用重量法测定,分析方法根据《海洋监测规范(GB 17378 1998)》。

称量带回实验室的龙须菜样品($n \geq 4$)。龙须菜的附着量: $W_A(\text{g/g}, \text{FW}) = (W_T - W_S) / W_S$ 。其中 W_T, W_S 分别表示龙须菜洗净前后的质量。

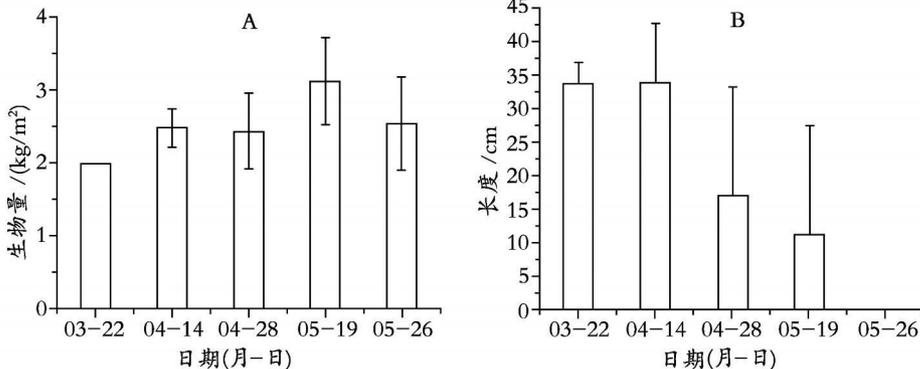


图1 筲筴湖中笼养(A)和延绳挂养(B)龙须菜的生长情况

Fig. 1 The growth of *Gracilaria lemaneiformis* by two different cultivated methods in Yundang Lagoon

2.2 强壮藻钩虾对龙须菜的摄食作用

如图2,藻钩虾数量随着深度的增加显著减少,藻钩虾数量 N 与培养深度 H 的回归关系如下:

$$N = 0.0011H^2 - 0.2714H + 17.805 \quad (r^2 = 0.9892, P < 0.05) \quad (1)$$

藻钩虾体质量 W 与摄食量 E 的关系见图3,它们之间的回归关系如下:

$$E = 0.3289W + 5.7207 \quad (r^2 = 0.8976, P < 0.05) \quad (2)$$

对于培养深度为50 cm,网笼底表面积 S 为 0.1 m^2 ,初始密度 D_0 为 2 kg/m^2 的龙须菜,附着的强壮藻钩虾数量根据公式(1)可得: $N_T = N \times D_0 \times S = 1400$ 个。据公式(2)可计算出平均体质量为 1.7232 mg/个 的强壮藻钩虾摄食率 $E = 6.2875\text{ mg/(个}\cdot\text{d)}$ 。

1.5 龙须菜生长率的计算

表观生长率 $R_{AG} = (W_t - W_0) / W_0 / t$;实际生长率 $R_{RG} = [(W_t - W_0) + W_F] / W_0 / t$ 。其中 W_0, W_t 分别表示实验前后龙须菜的质量, W_F 表示强壮藻钩虾的摄食量。

2 结果

2.1 笼养和延绳挂养方式的龙须菜生长

如图1A所示,在3月22日~5月19日期间,笼养的龙须菜呈增长的趋势,龙须菜的表观生长率为 $0.96\%/d$,但是在培养后期(5月19日~5月27日)出现负增长,整个培养期的平均表观生长率为 $0.42\%/d$ 。而挂养的龙须菜长度除了培养初期(3月22日~4月14日)有微小增加,基本呈负增长的趋势(图1B),至5月26日,苗绳上已基本无悬挂的龙须菜。

由于筲筴湖龙须菜的培养时间(t)为65 d(3月22日~5月26日),则每个网笼强壮藻钩虾所摄食龙须菜的生物量为:

$$W_F = N_T \times E \times t = 1400\text{ 个} \times 6.2875\text{ mg/(个}\cdot\text{d)} \times 65\text{ d} \approx 572.2\text{ g}$$

在5月26日测得网笼的龙须菜生物量 $D_1 = 2.54\text{ kg/m}^2$ (图3),则筲筴湖每笼龙须菜的实际增长率:

$$[(W_t - W_0) + W_F] / t = (D_1S + W - D_0S) / t = (254\text{ g} + 572.2\text{ g} - 200\text{ g}) / 65\text{ d} \approx 9.60\text{ g/d}$$

因此筲筴湖龙须菜的日增长率为 $9.60/200 = 4.80\%$,强壮藻钩虾的摄食量占龙须菜生长量的 91.4% ,可见藻钩虾对龙须菜的表观生长和生物量具有巨大的调控作用。

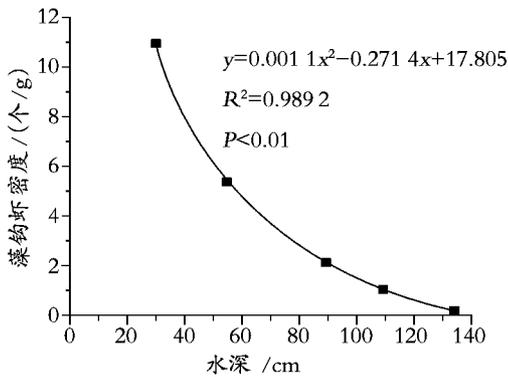


图2 藻丝上强壮藻钩虾的密度与龙须菜培养水深
的关系

Fig. 2 The relationship between the density of *Amphithoe valida* in the thalli and culture depth of *Gracilaria lemaneiformis*

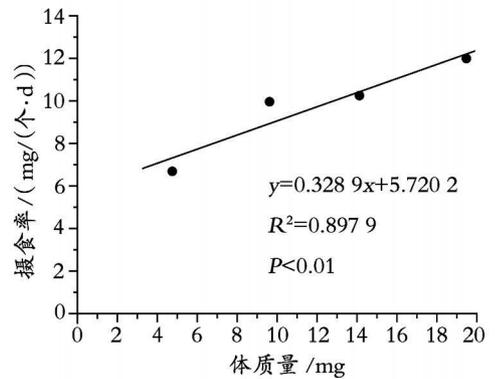


图3 强壮藻钩虾摄食率与体质量的关系

Fig. 3 The relationship between the graing rate and the body weight in *Amphithoe valida*

2.3 筲筴湖的流速、悬浮颗粒物浓度和龙须菜的附着量

表1显示,外湖区的龙须菜栽培点高平潮和低平潮期的流速分别为18 cm/s和16 cm/s。平均的

悬浮颗粒物为 $4.97 \text{ mg/L} \pm 1.06 \text{ mg/L}$ 。3月15日到5月10日,龙须菜的附着量从 $0.51 \text{ g/g} \pm 0.28 \text{ g/g}$ 增加到 $2.32 \text{ g/g} \pm 0.56 \text{ g/g}$ (FW), 增加显著 ($P < 0.001$)。

表1 筲筴湖水的流速、颗粒悬浮物质量浓度和龙须菜的颗粒物附着量

Tab. 1 The water velocity, suspended particles concentration and amount of particles adhered in the thalli of *Gracilaria lemaneiformis* in Yundang Lagoon

潮位	潮时	流速 (cm/s)	悬浮颗粒物 质量浓度 ¹⁾ (mg/L)	龙须菜附着量 (g/g) ²⁾	
				3月15日	5月10日
高平潮	10:00~ 11:00	18	4.97 ± 1.06	0.51 ± 0.28	2.32 ± 0.56
低平潮	17:00~ 18:00	16		(4)	(6)

注: 1. 悬浮颗粒物质量浓度为3~5月平均值; 2. 单位湿质量龙须菜的附着量; 括号内表示样品数

3 讨论

一般认为,在自然海区,盐度、pH随深度和季节变化较小,海藻的生长主要受营养盐、温度与光照的调节^[5-7]。筲筴湖的营养盐丰富,DIN、DIP水平分别都在海水四类水质标准以上,而且实验在温度和光照最适宜龙须菜生长的3~5月进行,各种理化环境条件适宜^[7,8]。但笼养龙须菜的表现生长率仅为0.42%/d,挂养龙须菜甚至呈现出负增长的趋势,其生长率远远低于汤坤贤等^[3,4]在东西埔湾的6~9%/d和在东山八尺门海域养殖区的4.2%/d。这说明,除营养盐、温度和光照因子外,还有其他环境因子影响筲筴湖龙须菜的生长。从实验结果看,强壮藻钩虾的啃食作用(参见本文中的2.2)和水动力条件(表1)是影响筲筴湖龙须菜生长的主要因子。

3.1 强壮藻钩虾的摄食作用对筲筴湖龙须菜生长的影响

很多研究表明,大型海藻密集缠绕的复杂结构为一些中型啃食者(mesograzer)提供了优良的栖所和食物场^[18]。这些啃食者的摄食,能明显抑制大型海藻的生长。尤其是端足类,由于个体小(<2 cm)和大多r选择的繁殖策略,有着快速的种群增长率^[14],它们往往是大型海藻群落最主要的初级消费者^[10,12]。Balducci等^[10]在威尼斯泻湖的调查中发现,在硬石莼(*Ulva rigida*)占优势的海藻群落,栖息在硬石莼上的动物群落(<10 mm)中,平均82.8%由钩虾*Gammarus aequicauda*组成,它的摄食率占海藻实际生长率的15%。Greertz Hansen等^[19]在富营养化的丹麦河口的调查中发现,石莼(*Ulva lactuca*)的存在与否更多的和来自啃食者的摄食压力有关,而不是水体的营养盐浓度。同样,在筲筴湖,高

的强壮藻钩虾密度(图2)和随之而来摄食压力(参见本文中的2.2),加上藻钩虾的啃食造成藻体断裂脱落产生了的大量损失,是挂养龙须菜处于负增长的根本原因。根据实验室内强壮藻钩虾的摄食率和现场龙须菜上强壮藻钩虾的分布密度,作者对笼养龙须菜的生长进行校正。结果显示,水深50 cm的笼养龙须菜的实际生长率为4.80%/d,强壮藻钩虾的摄食占龙须菜总生长的91.4%,这说明,龙须菜的生长基本取决于强壮藻钩虾的摄食压力。一旦摄食压力过高,就可能导导致海藻负增长。Tegner等^[15]曾报道在厄尔尼诺的影响下,加利福尼亚的大型海藻群落恢复并迅速生长,然而随着端足类*Perampithoe humeralis*种群无节制的增长(没有天敌的存在),刚恢复的海藻群落遭到了灾难性的破坏。本研究的数据表明,海藻上强壮藻钩虾的密度随深度快速下降(图2),因此,在筲筴湖栽培龙须菜时,在不影响龙须菜生长的情况下,适当的增加栽培深度,有利于减轻强壮藻钩虾的摄食压力,提高龙须菜的表现生长率。

3.2 水动力条件对筲筴湖龙须菜生长的影响

筲筴湖为基本封闭的人工泻湖,与西海域的水体交换完全通过高潮和低潮时人工控制的纳潮和排水来完成,因此在海区高平潮和低平潮时的水流速度最快。经测定,外湖区的最大流速不到20 cm/s,水流极其缓慢,远低于正常海区^[20]和龙须菜养殖标准(《龙须菜养殖技术规范(DB35/1537-2004)》)。其余时间,筲筴湖的水流更多的是靠有限的风力驱动,和间歇性来自松柏湖水的注入而产生的水体流动,流速不足10 cm/s。筲筴湖悬浮颗粒物浓度虽不是很高,但由于水流速度慢,沉降附着和被龙须菜主动吸附的悬浮颗粒物惊人,实验期间最高可达2.32 g/g(表1),如果考虑一些污损生物(沙筛贝)的附着,可能更高。如此高的附着量使得整个藻体几乎被这些颗粒物所包被,严重影响了龙须菜的生长。而东山八尺门养殖区为开阔的养殖水域,良好的水流条件,能够改变藻体周围的水体,带走龙须菜产生的废物及阻止泥沙颗粒在藻体表面的附着,增加藻体与水柱和光线的接触面积,有利于龙须菜对营养盐的吸收,生长率更快。Wheeler^[17]认为,水流能改变海藻*Macrocystis pyerfera*周围的水体,有利于营养盐通过边界层向藻体扩散。徐永键等^[16]在流水和静水条件下比较了龙须菜对氮的吸收和养殖水体的水质变化,结果表明,流水条件下养殖水体稳定,对氮的吸收也比静止组高18.3%~24.1%。

虽然藻钩虾的摄食作用和不良的水动力条件抑

制了筲筴湖龙须菜的生长,但是在温度适宜的冬春两季,龙须菜的实际生长率仍达4.80%/d,能有效地吸收水体的N、P等生源要素,对缓解筲筴湖营养化状况有重要的现实意义。但是,采用哪种方式栽培龙须菜需要在筲筴湖进行更多尝试和改进,尽管笼养栽培方式有助减少藻钩虾啃食断裂脱落的损失,但是网笼也为沙筛贝^[21]等附着生物提供坚硬的固着基,这些生物大量附着同样不利于筲筴湖龙须菜的生长。此外,筲筴湖过高NH₄⁺浓度也可能对龙须菜的生长产生影响。已有研究表明,过高的营养环境能抑制大型海藻对营养盐的吸收^[22,23]。因此,筲筴湖这种高氨盐的营养环境怎样反馈而影响龙须菜的生长,需要今后研究工作进一步深入。

参考文献:

- [1] 殷寿铭,潘荔卿,魏育,等. 厦门筲筴湖纳潮排污能力研究[J]. 台湾海峡, 2002, 21(1): 102-108.
- [2] 徐永键,钱鲁闽,焦念志,等. 添加大型海藻龙须菜对中肋骨条藻赤潮的影响[J]. 2005, 24(4): 533-539.
- [3] 汤坤贤,游秀萍,林亚森,等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 3044-3051.
- [4] 汤坤贤. 龙须菜在网箱养殖区的生物修复研究[J]. 中国水产科学, 2007, 14(3): 488-492.
- [5] 胡海燕,卢继武,周毅,等. 龙须菜在鱼藻混养系统中的功能[A]. 中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(45)[C]. 2005. 北京: 科学出版社, 169-175.
- [6] 岳维忠,黄小平,黄良民,等. 大型藻类净化养殖水体的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 13-15.
- [7] 许忠能,林小涛,计新丽,等. 环境因子对细基江蓠繁枝变种氮、磷吸收速率的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 417-421.
- [8] 钱鲁闽,徐永键,焦念志. 环境因子对龙须菜和菊花心江蓠N、P吸收速率的影响[J]. 中国水产科学, 2006, 13(2): 259-262.
- [9] 刘静雯,董双林. 光照和温度对细基江蓠繁枝变型的生长和生化组成影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(3): 332-338.
- [10] Balducci C, Sfriso A, Pavoni B. Macrofauna impact on *Ulva rigida* C. Ag. production and relationship with environmental variables in the lagoon of Venice [J]. *Mar Environ Res*, 2001, 52: 27-49.
- [11] Brawley S H, Adey W H. The effect of micrograzers on algal community structure in a coral reef microcosm[J]. *Mar Bio*, 1981, 61: 167-177.
- [12] Brawley S H, Fei X G. Studies of mesoherbivory in aquaria and in an unbarricaded mariculture farm on the Chinese coast[J]. *J Phycol*, 1987, 23: 614-623.
- [13] Duffy J E. Amphipods on seaweeds: partners or

- pests? [J]. **Oecologia**, 1991, 83: 267-276.
- [14] Duffy J E, Hay M E. Strong impacts of grazing amphipods on the organization of a benthic community [J]. **Ecol Monographs**, 2000, 70(2): 237-263.
- [15] Tegner M J, Dayton P K. El Nino effects on southern California kelp forest communities[J]. **Adv Ecol Res**, 1987, 17: 243-279.
- [16] 徐永健, 钱鲁闽. 水动力条件对龙须菜 N 吸收的影响 [J]. **海洋环境科学**, 2004, 23(2): 32-35.
- [17] Wheeler W N. Effect of boundary layer transport on the fixation of carbon by the giant kelp *Macrocystis pyrifera* [J]. **Mar Bio**, 1980, 56: 103-110.
- [18] McBane C D, Croker R A. Animal algal relationships of the amphipod *Hyale nilssoni* (Rathke) in the rocky intertidal [J]. **J Crust Biol**, 1983, 3: 592-601.
- [19] Geertz Hansen O, Sand Jensen K A J, Hansen D F, et al. Growth and grazing control of abundance of the marine macroalga, *Ulva lactuca* L. in a eutrophic Danish estuary [J]. **Aquatic Bot**, 1993, 46: 101-109.
- [20] 姬厚德, 潘伟然, 张国荣, 等. 筴筴湖纳潮量与海水交换时间的计算 [J]. **厦门大学学报**, 2006, 45(5): 660-663.
- [21] 周时强, 柯才换, 谢小青, 等. 厦门筴筴湖大型底栖生物生态调查 [A]. 卢昌义, 谢小青. 从筴筴港到筴筴湖 [C]. 厦门: 厦门大学出版社, 2003. 188-193.
- [22] Naldi M, Viaroli P. Nitrate uptake and storage in the seaweed *Ulva rigida* C. Agardh in relation to nitrate availability and thallus nitrate content in a eutrophic coastal lagoon (Sacca di Goro, Po River Delta, Italy) [J]. **J Exp Mar Bio Eco**, 2002, 269: 65-83.
- [23] Peckol P, DeMeo Anderson B, Rivers J, et al. Growth, nutrient uptake capacities and tissue constituents of the macroalgae *Cladophora vagabunda* and *Gracilaria tikvahiae* related to site specific nitrogen loading rates [J]. **Mar Bio**, 1994, 121: 175-185.

Main factors influencing the growth of *Gracilaria lemaneiformis* in Yundang Lagoon of Xiamen

ZHENG Xin-qing¹, YAO Xue-fen¹, HUANG Ling-feng¹, GUO Feng¹, LIN Yu-mei², XU Xiang-wei², FU Xun-yi²

(1. Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Administrative Office of Yundang Lagoon, Xiamen 361001, China)

Received: May, 20, 2007

Key words: *Gracilaria lemaneiformis*; growth rate; amphipod grazing; hydrographic condition; Yundang Lagoon

Abstract: Experiments have been done to validate the effect of amphipod grazing and hydrographic condition on the growth of *Gracilaria lemaneiformis* cultivated in Yundang Lagoon. The results showed that the apparent growth rate of *G. lemaneiformis* was 0.96 %/d, while the real growth rate was estimated to be 4.8 %/d. On one hand, *Ampithoe valida*, a predominant species of amphipod, may consume 91.4% of the algal growth, and thus control the biomass of *G. lemaneiformis*. On the other hand, slow water velocity in the lagoon caused a mass of particle adhering on the thalli up to 2.32 g/g FW, which deteriorated the growth of the algae. As a conclusion, these are the main reasons for the low apparent growth rate of *G. lemaneiformis* in Yundang Lagoon.

(本文编辑: 张培新)