

龙须菜对富营养化海水的生物修复

汤坤贤^{1,2}, 游秀萍², 林亚森², 陈敏儿², 沈东煜², 林泗彬²

(1. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005; 2. 东山县环境监测站, 福建 东山 363400)

摘要: 于 2002 年至 2004 年期间, 在福建省东山岛的八尺门鱼类网箱养殖区、西埔湾对虾养殖区、乌礁湾鲍鱼养殖区等进行了龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)对动物海水养殖造成的富营养化的生物修复研究。结果表明, 从围隔实验到小面积的海区实验到大面积的海区推广试点, 龙须菜对富营养化的海水均有良好的修复效果。围隔实验中, 龙须菜能使网箱养殖区缺氧的海水达到过饱和状态, 对无机氮(N)、无机磷(P)的去除率达 80% 以上; 实验海区, 修复区的溶解氧(DO)浓度明显高于非修复区, N、P、叶绿素(Chl-a)浓度低于非修复区; 推广海区, 鲍鱼养殖污水流经龙须菜养殖区后, N、P 得到有效的吸收, DO 浓度得到提高。因此, 大面积养殖龙须菜对减轻养殖污水对海区的污染, 防止水体富营养化, 抑制赤潮的发生有积极作用。

关键词: 龙须菜; 溶解氧; 无机氮; 无机磷; 生物修复; 富营养化

文章编号: 1000-0933(2005)11-3044-08 中图分类号: Q 143 文献标识码: A

A study on bioremediation of eutrophication of mariculture waters by *Gracilaria lemaneiformis*

TANG Kun-Xian^{1,2}, YOU Xiu-Ping², LIN Ya-Sen², CHEN Min-Er², SHEN Dong-Yu², LIN Si-Bin² (1.

State Key Laboratory of Marine Environmental Science of Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Environmental Monitoring Station of Dongshan, Dongshan, 363400, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3044~3051

Abstract: Eutrophication caused by mariculture has become a serious environmental problem in Chinese coastal waters. Since macroalgae can absorb nutrients and increase the concentration of dissolved oxygen (DO), and can be ultimately removed from water by being harvested, macroalga-based bioremediation of eutrophication would be the best way to solve such environmental problems. The effects of *Gracilaria lemaneiformis* on remediated eutrophication were studied.

G. lemaneiformis, red seaweed, originated in Shandong Province, was cultivated on ropes in three typical mariculture areas at Dongshan island, Fujian province where mariculture is advanced. The mesocosm experiment was conducted in Bachimen fish-cage area; the bioremediation experiment—in a field about 3 hm² in Xipu bay where the shrimp-farm and urban sewage is discharged; and in the spread application experiment, about 400 hm² were tested in Wujiao bay where abalone sewage is discharged. Water quality parameters were monitored during all the experimental stages. According to different tide and depth of the sea, two floating-rafts, i.e. bamboo raft and string raft, were devised to cultivate *G. lemaneiformis* on ropes in sea.

The results demonstrated that the effects of bioremediation of eutrophication of mariculture waters by *G. lemaneiformis* were obvious regardless to the place of experiment: in mesocosm one, in a small-scale's bioremediation or in large area's spread application. The results of mesocosm experiments showed that *G. lemaneiformis* increased DO from low concentration to supersaturation and increased DO saturation from about 60% to 200%; in meantime, it absorbed the inorganic nitrogen (N) and inorganic phosphorus (P) above 80% during 3~4 days. In bioremediation area in Xipu bay, the specific growth rate of *G.*

基金项目: 福建省重大科技资助项目(2002Y005)

收稿日期: 2004-09-21; 修订日期: 2005-06-10

作者简介: 汤坤贤(1968~), 男, 福建云霄人, 博士生, 高级工程师, 从事海洋环境监测与污染防治。E-mail: kunxiantang@sina.com

致谢: 感谢项目负责人厦门大学环科中心焦念志教授对本文的悉心指导。

Foundation item: The Key Scientific and Technological Program of Fujian Province(No. 2002Y005).

Received date: 2004-09-21; Accepted date: 2005-06-10

Biography: TANG Kun-Xian, Master candidate, senior engineer, mainly engaged in marine monitoring and pollution treatment.

Gracilaria lemaneiformis was 9% during the first month and 6% during the next half month. The DO concentration in bioremediation area was significantly higher than that in non-bioremediation area: the highest DO concentration in bioremediation area was $5.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ higher than that in non-bioremediation area in the same monitoring transect, the highest DO saturation was 198.7%. Furthermore, it increased the DO concentration of downstream seawater. And the N and IP concentrations in bioremediation area were lower than those in non-bioremediation area. Besides, the microalgae were restrained, the concentration of Chlorophyll-a in bioremediation area was lower than that in non-bioremediation area, whereas, the transparency was contrary. In spread application area, when the abalone cultural sewage went through *G. lemaneiformis* cultural areas, the nitrogen and phosphorus were effectively absorbed. Especially, the IP concentration of abalone cultural sewage discharging area was above $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, however, that in *G. lemaneiformis* cultural areas was below $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The DO concentration was increased in *G. lemaneiformis* cultural areas, its saturation was above 120%, the highest one was 166%, but, in non-cultural areas, the DO saturation was about 100% normally.

In conclusion, by large farming of *G. lemaneiformis* in animal maricultural areas, it is possible to alleviate the pollution of marine environment, prevent from eutrophication and control the red tide. At the same time, because *G. lemaneiformis* was the ideal food for abalone and material to produce agar, it could resolve the problems of the local abalone culture. Hence, large farming of *G. lemaneiformis* in the eutrophic mariculture areas could reduce environmental impact and increase economic output, and good environmental and economic advantages would be obtained.

Key words: *Gracilaria lemaneiformis*; bioremediation; dissolved oxygen; inorganic nitrogen; inorganic phosphorus; eutrophication

海水养殖过程中,大量的残饵、粪便及生物残骸进入水体和底质,可引起水体富营养化,造成水质恶化^[1]。有关海水养殖环境的生物修复技术的研究,国内外刚刚起步,研究报道尚少^[2]。杨宇峰等提出用大型海藻对富营养化海域进行生物修复的构想^[3]。江蓼(*Gracilaria*)属大型经济海藻,可以有效地吸收海水中的 N、IP,防止水体富营养化,并通过光合作用产生 DO,改善养殖环境。刘静雯、许忠能等^[4,5]在实验室条件下研究了细基江蓼繁枝变型(*Gracilaria tenuistipitata* var. *liui*)对营养盐的吸收效果及其与环境因子的关系。Nelson 等^[6]在夏威夷的虾池排水沟中养殖江蓼(*Gracilaria parvispora*),减轻养殖污水对环境的污染并使污水中营养物质得到利用; Troell 等^[7]在智利南部海上鲑鱼网箱养殖区吊养江蓼(*Gracilaria chilensis*),吸收网箱养殖区排放的部分 N 和 IP,促进江蓼生长。

本课题的相关研究曾经利用菊花心江蓼(*Gracilaria lichevodes*)和细基江蓼繁枝变型在养虾、养鱼池塘和网箱养殖区进行生物修复研究^[8],并在网箱养殖区发生中肋骨条藻赤潮时研究江蓼对赤潮消亡的影响^[9]。但菊花心江蓼的生长季节主要在夏秋两季,细基江蓼繁枝变型的生长季节主要在春、秋两季,它们在冬季生长缓慢,对水质的修复效果较差。为保持对水质实行全年不间断的修复,本研究选用龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)为冬季的生物修复实验藻种。龙须菜为江蓼属的大型红藻,生长快,耐密植,含胶量高,原产地山东省和辽宁省,原产地的生长季节为每年的春、秋两季,每季生长时间 1 个多月。在福建南部海区引种成功后,生长时间延长到每年的 11 月至第 2 年的 5 月份,可进行 3 次收获,产量和经济效益均有较大提高。龙须菜是鲍的饵料和生产琼脂的原料,具有较好的经济效益,福建沿海的龙须菜养殖以经济生产为目的,未见用于生物修复的研究报道。本研究 2002~2004 年在福建省东山岛分别选择了 3 个典型的海水养殖区,即网箱养殖区、对虾养殖区和鲍鱼养殖区进行围隔生物修复实验,海区生物修复实验和海上大面积推广试点,并根据不同海区的海况设计不同的龙须菜吊养筏架。以期减轻海水养殖污染,防止水体富营养化,大面积推广海上生态养殖提供参考。

1 材料与方法

1.1 藻种: 选用原产青岛的龙须菜,适宜海上吊养,生长适温 $15 \sim 26^\circ\text{C}$ 。

1.2 实验地点 (1) 围隔实验地点: 八尺门海区(见图 1 中的 I), 为半封闭海湾,风浪小,是该县主要的网箱养殖区,有养殖网箱 14000 只。(2) 实验海区: 西埔湾(见图 1 中的 II), 水面面积

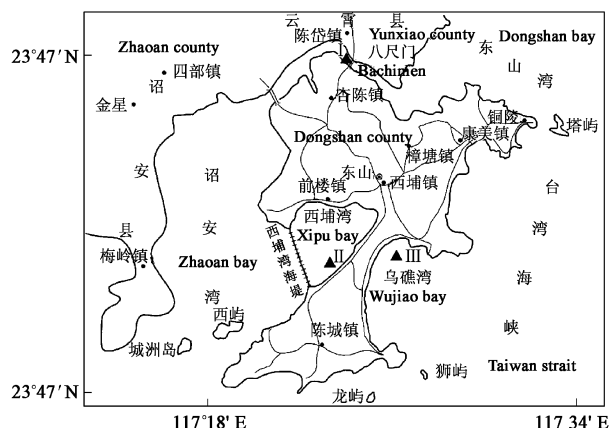


图 1 实验位置示意图

Fig 1 Location of the study area

I: 网箱养殖区 fish-cage area; II: 对虾养殖区 shrimp ponds; III: 鲍鱼养殖区 abalone culture area

1133 hm^2 , 海水通过闸门交换, 水交换量小, 潮差小, 周围有 800 hm^2 的虾池, 养虾污水直接排入湾中, 是该县主要的对虾养殖区, 也是县城西埔镇城市污水的排放海区。(3) 推广试点海区: 乌礁湾(见图 1 中的 III), 位于东山的外部海域, 与台湾海峡直接相连, 水面开阔, 岸线是东山的主要鲍鱼养殖区之一, 近年来, 由于鲍鱼养殖污水的大量排放, 海水富营养化加剧。

1.3 实验方法

1.3.1 围隔实验 将容积 300 L 的方型塑料桶, 用绳子固定在八尺门网箱养殖区的空网箱中。实验期间桶内盛约 230 L 的海水, 桶的上缘露出水面约 15 cm, 桶中吊养龙须菜, 密度约 $600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。每 3~4 d 换 1 次海水。同时进行 2 组平行实验。实验时间 2002 年 1~2 月。

1.3.2 海区修复实验 实验区位于西埔湾南部的虾池的凹角处, 区内布置如图 2 所示。龙须菜采用绳子夹苗, 挂于筏架的方式吊养。吊养筏架主要为竹架, 少量为绳架。根据西埔湾水较浅, 潮差小的特点设计吊养竹架如图 3 所示, 竹架长 20 m, 宽 4.2 m。相邻的 4 个竹架共用 1 根竹桩以节约材料, 同时提高整体的稳定性和抗风浪能力。苗绳上每隔 10~20 cm 夹一簇重约 10 g 的龙须菜, 固定在筏架两端的竹竿上, 苗绳间距一般 30~50 cm。初始养殖密度 $750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。修复区的面积 3 hm^2 。实验时间 2003 年 1~5 月。

1.3.3 海区推广试点 2003 年 11 月~2004 年 4 月, 在乌礁湾顶部推广龙须菜海上养殖, 面积约 40 hm^2 。龙须菜吊养筏架为绳架, 根据乌礁湾水较深, 风浪、潮差较大的特点设计吊养绳架结构如图 4 所示。主绳间距 4 m, 苗绳夹苗后两端系在相邻的两条主绳上, 苗绳间距一般 50~80 cm。初始养殖密度同实验海区。

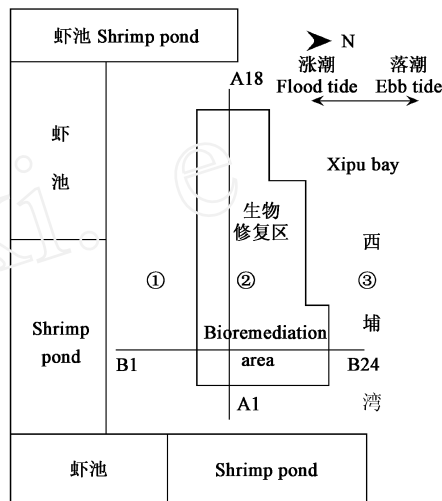


图 2 西埔湾实验区及监测位置示意图(①、②、③为定点监测站位, A1~A18, B1~B24 为监测断面)

Fig. 2 The experimental area in Xipu bay and the monitoring spots and transects (①, ②, ③ were monitoring spots and A1~A18, B1~B24 were monitoring transects)

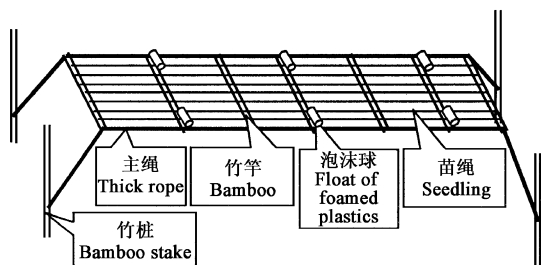


图 3 竹架结构示意图

Fig. 3 Structure of the bamboo rafts

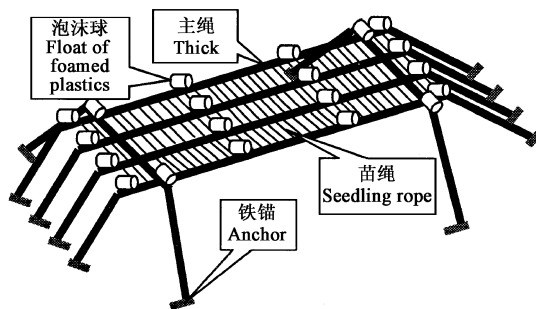


图 4 绳架结构示意图

Fig. 4 Structure of the rope rafts

1.4 环境监测

1.4.1 围隔实验的监测 监测每个换水周期桶中的温度、pH、DO、N (以氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)的和计)、IP 的起始浓度和最终浓度, 共 3 个周期。

1.4.2 海区实验的监测 监测站位: 如图 2 所示, 在西埔湾实验区的同一潮流方向上的内侧非修复区(①)、生物修复区中(②)和外侧非修复区(③)共布 3 个定点监测站位; 在与潮流垂直的方向上布监测断面 A1~A18, 与潮流平行的方向上布监测断面 B1~B24。

监测项目: 温度、透明度、盐度、pH、DO、DO 饱和度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、IP、 Chl-a

监测频率: 定点监测一般每周 1 次, 断面监测在龙须菜生长到一定数量后, 每个断面涨落潮时各测 1 次。

1.4.3 海上推广监测 2004 年 2 月 17 日, 对乌礁湾龙须菜养殖区 2 个互相垂直的 C1~C8 和 D1~D10 断面(位置示于图 5)的水质进行监测, 监测项目同 1.4.2。

1.4.4 监测方法 温度、盐度、pH、DO、DO 饱和度采用德国 WTW 公司制造的 P4 多参数计现场速测, 其余项目的分析按

GB 17378-1998《海洋监测规范》执行。

1.5 生长率

对西埔湾实验区不同位置的 3 条苗绳的龙须菜重量进行定期称量, 每月 2 次。

根据称量结果按以下公式计算龙须菜平均日生长率 (SGR, %):

$$SGR = ((W_2/W_1)^{1/(t_2-t_1)} - 1) \times 100\%$$

其中, t_2 、 t_1 为实验的第 t_2 、 t_1 天, W_2 、 W_1 分别为 t_2 、 t_1 时的龙须菜鲜重 (kg)。

2 结果与讨论

2.1 海区龙须菜生长情况

西埔湾实验区前 65 d 龙须菜的日均生长率如图 6 所示, 1 个月内龙须菜生长较快, 日生长率达 9%, 然后逐渐下降, 1 个半月时日生长率约 6%, 再后继续下降。其实, 1 个半月后的龙须菜平均每天增加的重量基本不变, 生长率下降的主要原因是龙须菜的重量逐渐增大, 使日生长率的计算结果变小。

正常生产情况下, 1 个半月后龙须菜的重量达刚放养时的 30~40 倍, 枝长近 1 m, 一般每隔一个半月收割 1 次, 以保持适宜的养殖密度和较大的生长率。本实验由于需要保持足够数量的龙须菜以观察其对水质的影响效果, 故实验过程中均未进行收割。

2.2 龙须菜对围隔水质的修复

龙须菜对围隔实验桶中的 DO、N、IP 修复结果如图 7 所示, 每个换水周期 DO 起始浓度约为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 饱和度约 60%; 每周期 DO 最终浓度达到 $15 \sim 19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, DO 饱和度在 170%~220% 之间; 每个换水周期 N、IP 起始浓度分别在 $0.3 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.07 \sim 0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 最终浓度分别在 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 3~4 d 中对 N、IP 的去除率分别在 90% 和 83% 以上。可见, 龙须菜可以有效提高水中 DO 浓度, 去除水中的 N、IP, 使 N、IP 浓度维持在很低的水平, 龙须菜对富营养化的海水有显著的修复效果。

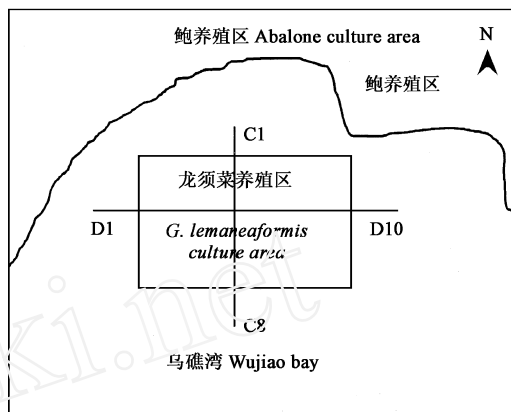


图 5 乌礁湾龙须菜养殖区监测断面示意图

Fig 5 the monitoring transects at *G. lemaneiformis* culture area in Wujiao bay

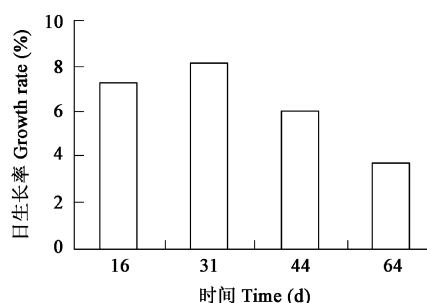


图 6 实验海区龙须菜生长率变化

Fig 6 Variation of the growth rate of *G. lemaneiformis* during the test course in the field

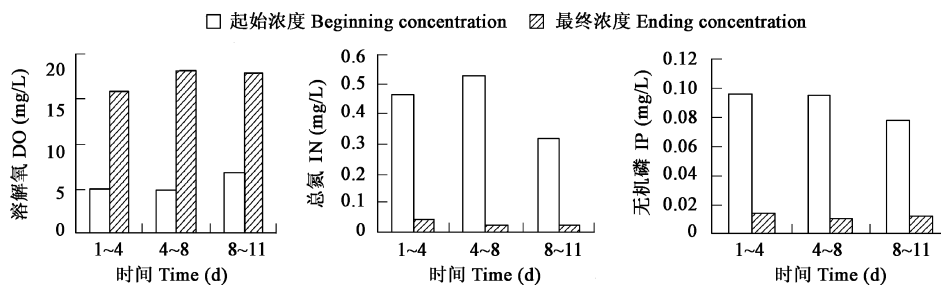


图 7 围隔实验各修复周期前后水质对比

Fig 7 Comparison of water quality parameters before and after the bioremediation in the fish-cage area

2.3 龙须菜对实验海区水质的修复

2.3.1 龙须菜对海区 DO 的修复 图 8 是西埔湾实验区同一潮流方向上的 3 个站位 (图 2 的①、②、③) 的 DO 浓度变化。每次监测结果, 修复区的 DO 浓度均高于外围非修复区, 说明龙须菜光合作用产生的氧提高了修复区海水的 DO 浓度。但不同的天气状况龙须菜对海水的修复效果也不同。晴天天气 (图 8 中的 2 月 19 日和 3 月 26 日), 修复区的 DO 浓度高, 且修复区两侧的 DO 浓度差异较大, 在潮流下方向的 DO 浓度明显高于另一侧的浓度; 阴雨天气 (图 8 的 2 月 27 日~3 月 21 日), 修复区的 DO

浓度较低,潮流上、下方向的DO 浓度差异也较小,说明阴雨天龙须菜对海水DO 浓度贡献较小,但修复区的DO 浓度仍高于非修复区,与菊花心江蓠相似,阴雨天龙须菜也能有效地向水体供氧^[9]。

断面的监测结果可以更加明显地观察到修复区中DO 浓度的提高和对外围水域的影响。图9a是实验区A断面的DO 浓度变化情况,总体上,修复区的DO 浓度明显高于外围非修复区;修复区内的DO 浓度波动较大,这与龙须菜所处的水下深度有关,由于吊养龙须菜的竹架起初未挂泡沫球,龙须菜长大后使筏架整体下沉,断面监测期间正给筏架增挂泡沫球,断面中的前段,竹架刚挂泡沫球,龙须菜被拉升至接近水面,DO 浓度最高;中段尚未挂泡沫球,龙须菜下沉位置最深,DO 浓度最低;后段的吊养筏架是绳架,龙须菜深度介于二者之间,DO 浓度也介于二者之间。可见,龙须菜越接近水面,光合作用越强,DO 浓度越高。图9b是B断面的DO 浓度变化情况,龙须菜的光合作用使水体DO 浓度明显升高,修复区中DO 最大值高于非修复区 $5.6\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,DO 饱和度最高达198.7%。在潮流的下方向,龙须菜对外围水体的影响尤为明显,范围更大,越靠近修复区,DO 浓度越高,越远DO 浓度越低。

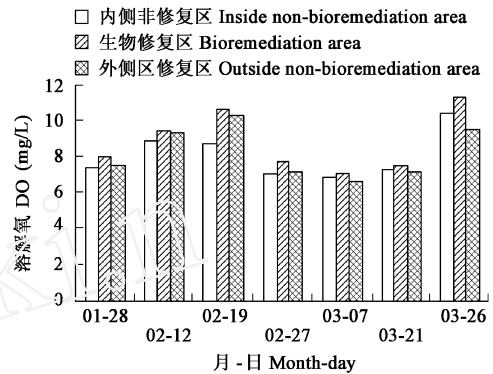


图8 西埔湾实验区定点DO 浓度变化

Fig 8 Variations of DO at fixed spots in the experimental area in Xipu bay

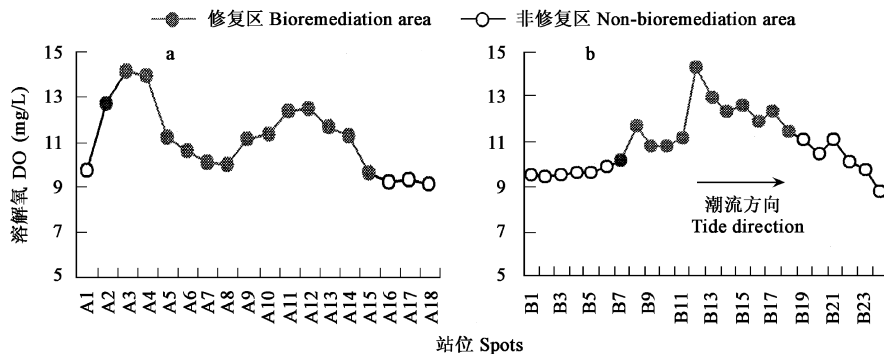


图9 西埔湾实验区断面DO 变化(2003-03-27)

Fig 9 Variations of DO along the monitoring transects in the experimental area in Xipu bay (2003-03-27)

a: A 断面(与潮流垂直) transect A (perpendicular to the tide) b: B 断面(与潮流平行) transect B (parallel to the tide)

2.3.2 龙须菜对海区N、IP的修复 图10是西埔湾实验区同一潮流方向上的3个站位(图2的①、②、③)的N、IP 浓度变化。尽管N、IP 的浓度变化不如DO 明显;受海水流动性大,修复效果不易被观测到等因素的影响。仍然可以观察到修复区的N、IP 浓度略低于外围非修复区,特别是低于潮流的上方向。说明龙须菜对海水中的N、IP 具有一定的吸收效果。实验海区由于海水流动性大,修复区面积较小,龙须菜对N、IP 的修复效果不如围隔实验的效果明显。另外,由于2月底至3月27日的几场降雨,大量的陆源污水排入西埔湾,使实验区后期的营养盐,特别是N 浓度上升。

2.3.3 龙须菜对微藻生长的影响 水生植物对浮游植物的生长有抑制作用^[10,11]。江蓠的大量生长也可以有效地抑制水中微藻的繁殖,这种现象在本研究课题的养殖场和中试实验中已经得到证实。海区实验中,尽管正常海水中的微藻密度较低,海水的流动性大,龙须菜对微藻的抑制作用还是可以观察到。图11是B断面Chl-a、透明度变化情况,修复区的Chl-a 浓度低于外围非修复区,透明度则高于非修复区。说明龙须菜抑制了微藻的大量繁殖,使修复区的微藻密度降低。这除与龙须菜与微藻之间对阳光、营养盐和生长空间的竞争有关外,龙须菜自然垂挂水中的大量须状藻体形成层层过滤网,对微藻也有较好的过滤和吸附作用。同时,由于微藻比大型藻类更容易受到营养不足的限制^[12],江蓠还能加速赤潮的消亡^[9]。因此,大面积养殖龙须菜对海区赤潮将有较好的防治作用。

2.4 海区推广试点的修复效果

图12、13分别是乌礁湾龙须菜养殖区2个互相垂直方向的C1~C18、D1~D10断面的N、IP 和DO 变化图,虽然非养殖区的站位距养殖区边界小于100m,养殖区内、外海水水质的差异仍非常明显。

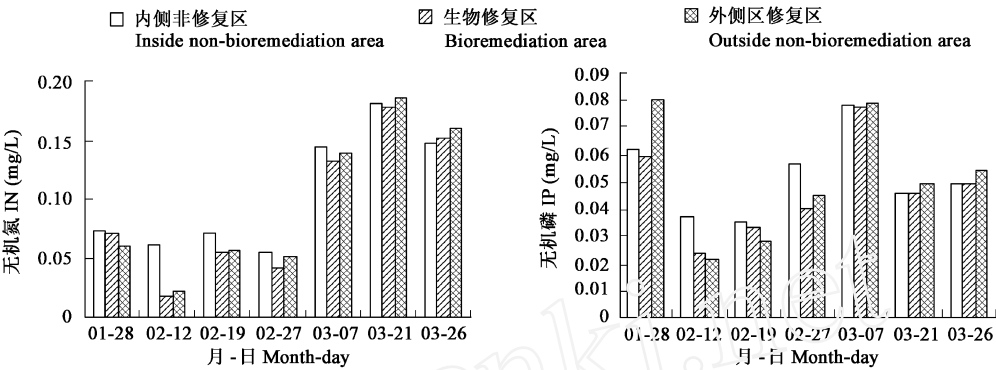


图 10 西埔湾实验区修复区与非修复区 N、IP 浓度对比

Fig. 10 Comparison of N and IP between bioremediation and non-bioremediation areas in Xipu bay

如图 12 所示, 非养殖区 N、IP 浓度较高, 靠近鲍鱼养殖污水排放区的 C1、C2 和 D9、D10 站位的 N、IP 浓度更高, 尤其 IP 浓度超第 3 类甚至第 4 类水质标准 (GB 3097-1997), 但龙须菜养殖区内, N、IP 浓度基本低于第 1 类海水水质标准。说明龙须菜对流入养殖区的氮、磷有较好的吸收效果。Rhyther 等^[13]的研究表明江蓠对氮具有快速吸收并储存能力; 许忠能等^[5]在实验室条件下证实细基江蓠繁枝变型对氮、磷的吸收速率随营养盐含量的升高而升高。因此, 这种在海水中营养盐浓度高时快速吸收和储存营养盐的能力, 能动态调节营养盐水平使其限制在一定范围内, 并支持江蓠在海水中营养盐浓度低时继续生长。

图 13 是 DO 变化情况, 结果表明, 龙须菜养殖区的 DO 浓度也比非养殖区有明显的升高, 非养殖区 DO 除潮流下方向受养殖区的影响外, 区外 DO 饱和度为正常海水的 100% 左右, 养殖区内的 DO 饱和度一般在 120% 以上, 局部高达 166%。

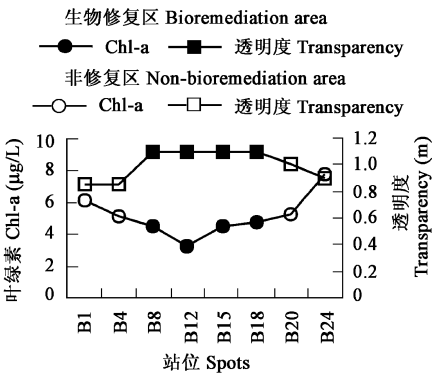


图 11 西埔湾实验区 B 断面 Chl-a、透明度变化 (2003-03-27)

Fig. 11 Variations of Chl-a and transparency at transect B in the experimental area in Xipu bay (2003-03-27)

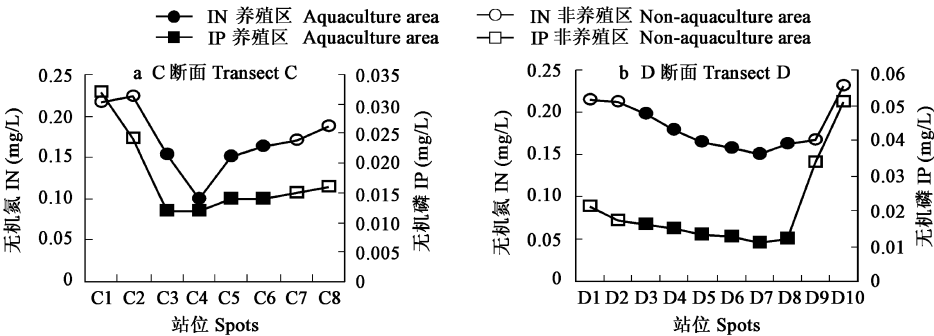


图 12 龙须菜养殖海区监测断面 N、IP 变化 (2004-02-17)

Fig. 12 Variations of N and IP along the monitoring transects in *G. lemaneiformis* bioremediation area (2004-02-17)

可见, 大面积养殖龙须菜对水质有明显的修复效果, 特别是鲍鱼养殖污水流经养殖区后, N、IP 得到有效的吸收, DO 浓度得到提高, 这对减轻养殖污水对海区的污染, 防止水体富营养化有积极作用。

3 结语

(1) 龙须菜生长较快, 在南方的生长期较长, 生长期主要为冬、春季节, 可以和菊花心江蓠、细基江蓠繁枝变型组合对某一特定水体实施全年不间断的生物修复。

(2) 网箱养殖区的围隔实验中, 龙须菜可以提高水中 DO 浓度 3 倍以上, 使缺氧的海水达到过饱和状态; 可以有效地去除

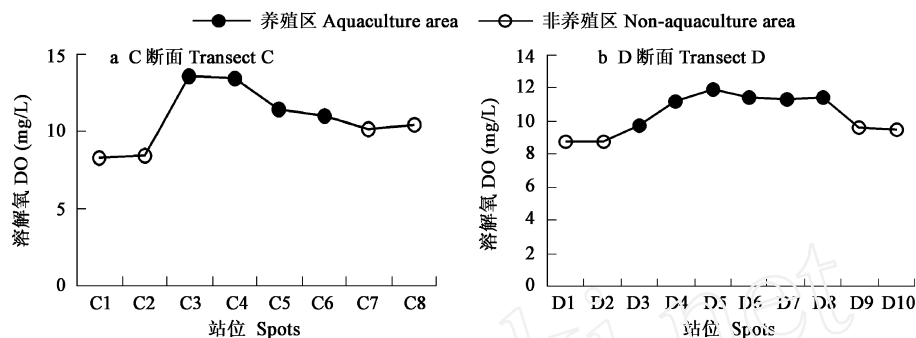


图 13 龙须菜养殖海区监测断面 DO 变化 (2004-02-17)

Fig. 13 Variations of DO along the monitoring transects in *G. lemaneiformis* farming bioremediation area (2004-02-17)

水中的 N、P，去除率达 80 % 以上，使 N、P 浓度由超第 4 类海水水质标准降低到低于第一类标准。

(3) 实验海区受海水流动的影响，修复效果不及围隔实验的效果明显，但定点跟踪监测和断面监测结果仍然可以观察到修复区的 DO 浓度明显高于外围非修复区，N、P 浓度低于非修复区，龙须菜对富营养化的海水有较好的修复效果。一定面积的龙须菜还能降低水中的 Chl-a 的浓度，提高水体透明度，大面积养殖对赤潮的发生将有较好的抑制作用。

(4) 推广海区龙须菜大面积养殖对水质有明显的修复效果，N、P 得到有效的吸收，DO 浓度得到提高，对减轻养殖污水对海区的污染，防止水体富营养化有积极作用。

(5) 龙须菜不仅是富营养化海水的理想的修复生物，还具较好的商业价值。根据不同海况条件设计的吊养筏架操作简单，易于推广。利用龙须菜进行富营养化海区的生物修复，环境、经济效益俱佳，应用前景广阔。

References

- [1] Ji X L, Lin X T, Xu Z N. *et al* Mechanism of mariculture self-pollution and its effects on environment. *Marine Environmental Science*, 2000, **19**(4): 66~71.
- [2] Li Q F, Yuan Y X. Outlook for bioremediation researches on marine aquacultural environment. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2000, **7**(2): 90~92.
- [3] Yang Y F, Fei X G. Prospects for bioremediation of cultivation of large-sized seaweed in eutrophic mariculture areas. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, **33**(1): 53~57.
- [4] Liu J W, Dong S L, Ma S. Effects of temperature and salinity on growth of *G. tenuistipitata* var. *liui*, *U. pertusa*, *G. filicina* and NH_4^+ -N uptake of *G. tenuistipitata* var. *liui*. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, **23**(2): 109~116.
- [5] Xu Z N, Lin X T, Lin J H. *et al* The effects of nutrient availability on the uptake of nitrogen and phosphorus by *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(3): 366~374.
- [6] Nelson S G, Glenn E P, Conn J, *et al* Cultivation of *Gracilaria parvispora* (Rhodophyta) in shrimp-farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system. *Aquaculture*, 2001, **193**: 239~248.
- [7] Troell M, Halling C, Nilsson A, *et al* Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output. *Aquaculture*, 1997, **156**: 45~61.
- [8] Tang K X, Jiao N Z, You X P, *et al* Bioremediation of *Gracilaria lichenoides* in fish cage-farming areas. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, **12**(2): 156~161.
- [9] Tang K X, Yuan D X, Lin S B, *et al* Depression and affect of red tide on main water quality index by *Gracilaria tenuistipitata*. *Marine Environmental Science*, 2003, **22**(2): 24~27.
- [10] Wang G X, Pu P M, Zhang S Z, *et al* The purification of artificial complex ecosystem for local water in Taihu lake. *China Environmental Science*, 1998, **18**(5): 410~414.
- [11] Li W C. Construction and purification efficiency test of an ever-green aquatic vegetation in an eutrophic lake. *China Environmental Science*, 1997, **17**(1): 54~57.
- [12] Roelke D L, Cifuentes L A and Eldridge P M. Nutrient and phytoplankton dynamics in a sewage-impacted gulf coast estuary: A field test of the PEG-model and Equilibrium Resource Competition theory. *Estuaries*, 1997, **20**(4): 725~742.
- [13] Rhyther J A, Corwin N, DeBusk T A, *et al* Nitrogen uptake and storage by the red alga *Gracilaria tikvahiae*. *Aquaculture*, 1991, **26**: 107.

~ 115

参考文献:

- [1] 计新丽, 林小涛, 许忠能, 等 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响 海洋环境科学, 2000, 19(4): 66~71.
- [2] 李秋芬, 袁有宪 海水养殖环境生物修复技术研究展望 中国水产科学, 2000, 7(2): 90~92.
- [3] 杨宇峰, 费修绳 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望 青岛海洋大学学报, 2003, 33(1): 53~57.
- [4] 刘静雯, 董双林, 马生 温度和盐度对几种大型海藻生长率和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸收的影响 海洋学报, 2001, 23(2): 109~116.
- [5] 许忠能, 林小涛, 林继辉, 等 营养盐因子对细基江蓠繁枝变种氮、磷吸收速率的影响 生态学报, 2002, 22(3): 366~374.
- [8] 汤坤贤, 焦念志, 游秀萍, 等 菊花心江蓠在网箱养殖区的生物修复作用 中国水产科学, 2005, 12(2): 156~161.
- [9] 汤坤贤, 袁东星, 林泗彬, 等 江蓠对赤潮消亡及主要水质指标的影响 海洋环境科学, 2003, 22(2): 24~27.
- [10] 王国祥, 濮培民, 张圣照, 等 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用 中国环境科学, 1998, 18(5): 410~414.
- [11] 李文朝 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究 中国环境科学, 1997, 17(1): 54~57.