

菊花心江蓠在网箱养殖区的生物修复作用

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

(1. 厦门大学, 国家教育部海洋环境科学重点实验室, 福建 厦门 361005; 2. 东山县环境监测站, 福建 东山 363400)

摘要:2003年8~12月, 利用菊花心江蓠(*Gracilaria lemaneiformis*)在福建省东山县八尺门网箱养殖区进行生物修复实验。通过定点跟踪监测, 定点连续监测, 断面监测和平面监测, 结果表明, 江蓠对受污染的海水具有较好的修复效果。菊花心江蓠能有效提高水中的DO浓度, 使修复实验区的DO浓度明显高于非养殖区和网箱养殖区的DO浓度; 菊花心江蓠还能降低水中的IN、IP浓度, 特别是3种价态的IN中, 菊花心江蓠优先吸收铵氮, 这对减轻网箱养殖区自身污染的影响更具实际意义。

关键词:菊花心江蓠; 无机氮; 无机磷; 溶解氧; 生物修复; 网箱养殖

中图分类号:X55 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-8737-(2005)02-0156-06

随着海水养殖的蓬勃发展, 养殖过程中, 大量的残饵、粪便及生物残骸进入水体和底质^[1]。亚太地区, 人们普遍在近岸水域用鲜小杂鱼投喂网箱养殖鱼类, 饵料浪费和污染更加严重^[2]。养殖污染物的排放、沉积可引起水体富营养化, 造成水质恶化^[3]。有关海水养殖环境生物修复技术的研究, 国内外刚刚起步, 研究报道尚少^[4]。毕远博等^[5]认为实行生态养殖以缓解养殖业自身污染有一定效果; Nelson等^[6]在夏威夷的虾池排水沟中养殖江蓠(*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蓠(*Gracilaria chilensis*), 与非网箱养殖区相比, 江蓠生长率提高40%, 并吸收网箱养殖区排放的5%的无机氮(IN)和27%的无机磷(IP)。

福建省东山县八尺门网箱养殖区, 曾是我国最大的网箱养殖基地, 现有养鱼网箱约14 000只, 年产量约1 300 t。由于过度养殖和水交换条件差, 近年来该网箱养殖区环境污染严重, 海水中IN、IP浓度超海水水质标准(GB3097-1997)第四类的2倍以上, 溶解氧(DO)质量浓度大部分时间低于3 mg/L, 不利的气候条件下经常发生大面积的网箱养鱼死亡事故, 目前只能养殖一些经济

价值较低的鱼类, 如篮子鱼、美国红鱼、鲈鱼等。大型海藻江蓠能有效提高水中DO浓度和降低IN、IP浓度, 又是鲍的饵料和生产琼脂的原料, 具有较高的经济价值, 通过定期收获藻体将营养物质转移出水体, 可减轻水体污染, 降低海水富营养化程度。国内对江蓠的研究主要集中于细基江蓠繁枝变型(*Gracilaria tenuistipitata* var. *liui*)的池塘环境养殖, 而对环境的生物修复研究报道很少^[8-9]。关于菊花心江蓠(*Gracilaria lemaneiformis*)对污染海水的修复实验国内未见报道。本研究通过菊花心江蓠对网箱养殖区的修复实验, 可为减轻网箱养殖污染, 进行海上生态养殖提供有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 江蓠

选用从台湾引进的菊花心江蓠(以下简称江蓠), 该种具有耐高温、高盐, 生长快等优点, 生长季节主要在每年的5~10月, 无固着器, 通过营养体无性繁殖。

1.2 实验方法

制作长10 m、宽4 m、深1.2 m的网箱13个, 挂于八尺门网箱养殖区中的养鱼网箱架下, 箱底距水面约1 m。网箱中放养菊花心江蓠, 养殖密

收稿日期:2004-06-15; 修订日期:2004-08-31。

基金项目:福建省重大科技项目(2002Y005)。

作者简介:汤坤贤(1968-), 高级工程师, 博士, 主要研究领域海洋环境监测与污染防治。E-mail:kuociantang@sina.com

度约 1.5 kg/m^2 。修复实验区面积约 400 m^2 , 周围网箱养鱼的主要品种为篮子鱼。实验区位置如



图1 修复实验区位置示意图

Fig.1 Sketch map of area of bioremediation test

1.3 环境监测

1.3.1 定点跟踪监测 实验开始后对修复区、网箱养殖区、非养殖区 3 种不同的功能水域进行定点跟踪监测, 一般情况下每周监测水质 1 次, 监测项目主要有: 光强、透明度、温度、pH、DO、DO 饱和度、铵氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸盐氮 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、IN (以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度之和)、IP。

1.3.2 定点连续监测 于 2003 年 11 月 18 日昼间 8:00~18:00 对修复实验区、网箱养殖区、非养殖区 3 种不同的功能点位进行定点连续监测, 光强、水温、pH、DO、DO 饱和度每隔 1 h 监测 1 次; $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、IP 浓度每隔 2 h 监测 1 次。

1.3.3 断面监测 2003 年 11 月 14、17 日, 对与潮流方向垂直和平行的 A—A' 和 B—B' 断面进行布点监测, 监测项目同定点跟踪监测。其中, 水温、pH、DO、DO 饱和度每隔 1~3 m 布 1 个监测点位, 其余项目一般每 9 m 布 1 个点位。

1.3.4 DO 平面监测 在包括修复区、2 个网箱养殖区及其周围非养殖水域的 $48 \text{ m} \times 48 \text{ m}$ 的范围内按 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 一个网格划分为 256 个网格, 监测各个网格的 DO 浓度; 对修复区边界两侧 DO 浓度变化梯度较大的网格加大监测密度, 一般每个网格布 3 个测点; 对部分网箱养殖区 DO 浓度变化梯度较小的网格减小监测密度, 一般每 2 个网格布 1 个测点。

1.3.5 分析方法 温度、pH、DO、DO 饱和度采用 P4

图 1 所示, 放养江蓠的修复区与周围网箱的分布情况示于图 2。

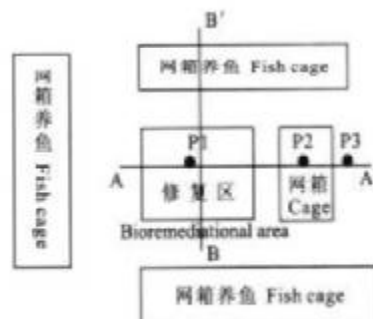


图2 修复区及定点、断面监测位置示意图

(A—A'、B—B'—监测断面, P1、P2、P3—定点测站)

Fig.2 Situation of bioremediation area and monitoring section and monitoring spot

(A—A'、B—B'—monitoring section, P1、P2、P3—monitoring spot)

多参数计(德国 WTW 公司制造)现场速测, 其余项目的分析按 GB17378—1998《海洋监测规范》执行。

定点、断面及不同功能区监测位置见图 2。

2 结果与讨论

2.1 江蓠对海水中 DO 的修复

2.1.1 不同功能区 DO 浓度昼间变化 不同养殖功能区白天的光强、DO 浓度、DO 饱和度、pH 变化情况如图 3 所示, 从图 3a 中光强变化曲线可见, 当天为多云天气, 除 13:00 时段太阳露出光强较大外, 其余时间光强均较小, 但修复区的 DO 变化仍非常明显, 8:00 以后 DO 浓度逐渐上升, 14:00 达到最大值 11.65 mg/L , DO 饱和度达 161.6% (图 3b), 是参照点非养殖区的 2.1 倍, 随着光强的减小和海水一直处于流动状态, 修复区的 DO 浓度也逐渐下降, 17:50 又下降到与参照点相同的浓度; 参照点非养殖区的 DO 浓度曲线则非常平稳, DO 浓度变化很小, DO 饱和度 75% 左右; 白天网箱养殖区的 DO 浓度下降, DO 饱和度 70% 左右, 低于参照点, 但变化幅度较小。图中的 DO 浓度、DO 饱和度、pH 变化曲线还显示, DO 浓度与饱和度的变化是一致的, DO 与 pH 曲线的相关性很好, 修复区的 DO、pH 的相关系数为 0.993, 说明 pH 随 DO 的变化而变化, 江蓠光合作用产生 DO 的同时, 吸收了水中的 CO_2 , 因而提高海水的 pH。对于受污染的海区, pH 一般低于正常海水, pH 的提高, 有利于改善鱼类的生活环境。

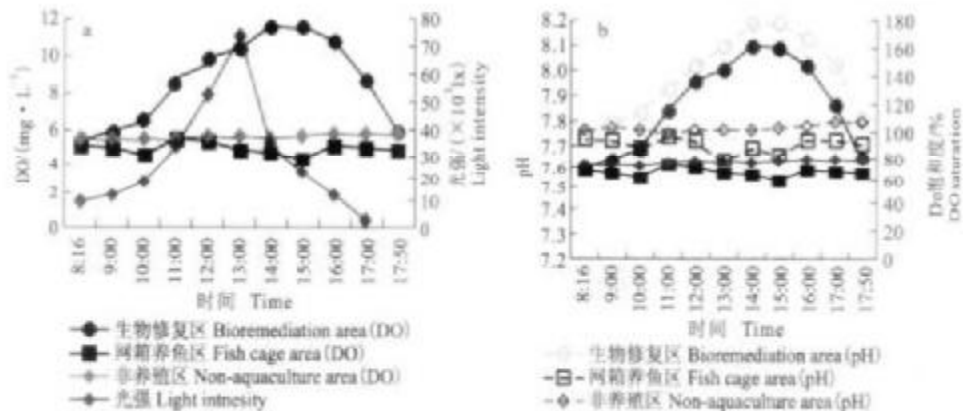


图3 不同功能区昼间 DO 浓度、DO 饱和度、pH 变化(2003-11-18)

Fig.3 The variation of DO and its saturation, pH on different functional area during daytime on Nov. 18, 2003

2.1.2 DO 浓度断面变化 图 4a、b 分别是 A—A' 断面和 B—B' 断面的 DO 变化图,结果显示,修复区的 DO 浓度明显高于周边非养殖区和网箱养殖区的 DO 浓度;修复区外围,特别是潮流的下方向的 DO

浓度明显升高,由近及远浓度递降,说明江篱产生的 DO 不断被海流带走,提高了外围海水的 DO 浓度;而网箱养殖区的 DO 浓度则略低于非养殖区的浓度。

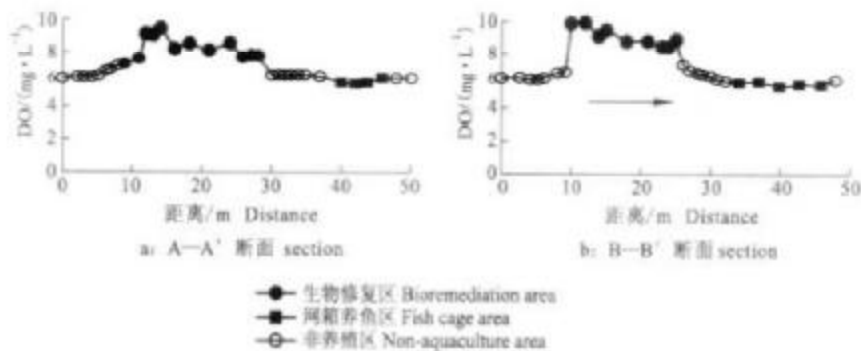


图4 监测断面 DO 浓度变化

Fig.4 The variation of DO on monitoring section

2.1.3 DO 浓度平面变化 图 5 是 DO 浓度的等值线图,可以更加直观地看出不同功能区的 DO 浓度变化。生物修复区的 DO 浓度明显高于外围区域,修复区内中部浓度最高,从中部向边缘逐渐下降;修复区下侧的潮流下方向 DO 浓度较高,说明江篱产生的 DO 还提高周边水域的 DO 浓度;网箱养殖区的 DO 浓度最低,但波动幅度较小。高密度的网箱养殖容易造成水体缺氧,本区的 DO 饱和度正常情况下为 60%—70%,发生大面积死鱼时 DO 质量浓度常小于 1 mg/L。以上实验结果表明,大面积养殖江篱可以有效提高水中的 DO 浓度,防止出现水体缺氧状态。

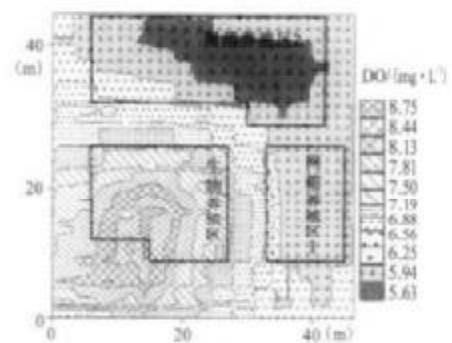


图5 不同功能区 DO 浓度等值线分布

Fig.5 Isoline distribution of DO on different functional area

据室内实验结果,江蕨白天阳光下的净产氧率大于 $2.3 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,是鱼类耗氧率的 $5 \sim 10$ 倍^[10],因此,数量相近的江蕨和鱼类,生物修复区 DO 浓度的提高幅度将远大于网箱养殖区 DO 的下降幅度。这个结论从以上的定点、断面和平面的 DO 浓度的监测结果已经得到很好的证实。该结论同时表明,在封闭的水体中,较多数量的鱼类仅需较少数量的江蕨就能满足水中 DO 的供需平衡。

2.1.4 天气变化对 DO 修复效果的影响 阴雨天的光线弱,江蕨的产氧率也相应变小。图 6 是 A—A' 断面不同的天气状况下的 DO 浓度对比。修复区,晴天的 DO 浓度明显高于阴天的浓度。可见,晴天光强大,江蕨的产氧率也大,DO 浓度高;阴天则相反。但阴天修复区的 DO 浓度仍明显高于外围水域。据室内实验结果,江蕨的光合作用的光补偿点约 1000 lx ,阴雨天野外的光强仍达 $20\,000 \sim 30\,000 \text{ lx}$,江蕨仍能进行较强的光合作用向水体供氧,提高水中的 DO 浓度。

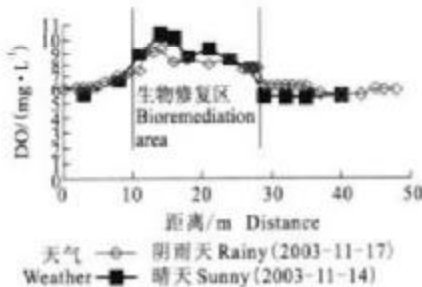


图 6 不同天气状况 A—A' 断面 DO 浓度对比

Fig. 6 Comparison of DO between different weather on A—A' section

2.2 江蕨对海水中 IN、IP 的修复

据室内实验结果,江蕨对 IN、IP 的吸收速率远低于其产氧率,江蕨对海水中营养盐 IN、IP 的影响不及 DO 显著,但通过断面和定点连续监测还是可以观察到不同功能区 IN、IP 浓度的时空变化。

图 7 是 A—A' 断面的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、IN、IP 浓度的变化,可见,修复区的 G 站位的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、IN、IP 的浓度明显低于非养殖区的 W 站位,而网箱养殖区 F 站位的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、IN、IP 的浓度则略高于 W 站位。说明网箱养殖的残饵和排泄物使水中 IN、IP 浓度升高,而修复生物江蕨能吸收水中的 IN、IP,降低修复区海水中的 IN、IP 浓度。

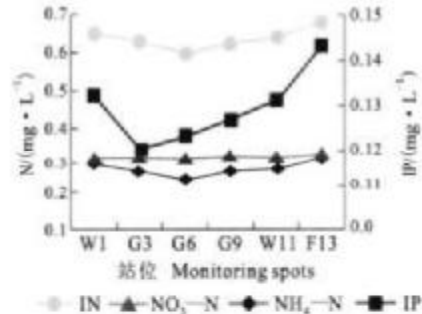


图 7 A—A' 断面 IN、IP 浓度变化

(G3、G6、G9—生物修复区, W1、W11—非养殖区, F13—网箱养殖区)

Fig. 7 Variation of IN and IP on A—A' section (G3, G6, G9—bioremediation, W1, W11—Non-aquaculture, F13—fish cage-farming)

不同功能区的定点监测结果进一步证实了上述结论。虽然当天为多云到阴天气,但浓度的变化仍是明显的。图 8a 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、IN、图 8b 的 IP 的浓度变化曲线均能明显地观察到,非养殖区的变化比较平稳;修复实验区的昼间浓度下降;网箱养殖区的昼间浓度上升。而图 8b 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的曲线变化幅度很小,特别是 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的曲线基本重叠。

综上,无论是断面监测还是定点监测,修复区的 3 种价态的 IN 中, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度很低且变化极小, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度变化曲线也较平稳, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化最大,说明当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 均充足时,江蕨优先吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。Matusiak^[11] 也发现藻类优先吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的吸收仅发生在 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度很低或耗尽时。王朝晖等^[12] 发现水网藻对富营养化的淡水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率较大,对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的去除率较小。对网箱养鱼而言,氨的危害更大,它能抑制血液的携氧能力,严重时引起鱼类窒息、死亡^[13]。利用江蕨修复受污染的水体时,江蕨优先吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的特性对网箱养鱼的保护作用更大。

3 结论

(1)无论是定点连续监测、断面监测,还是平面监测,结果均表明,江蕨能有效提高水中 DO 浓度,修复区的 DO 浓度明显高于外围非养殖区,而网箱养殖区的 DO 浓度则略低于非养殖区。江蕨的产氧率远大于鱼类的耗氧率,较多数量的鱼类仅需较少

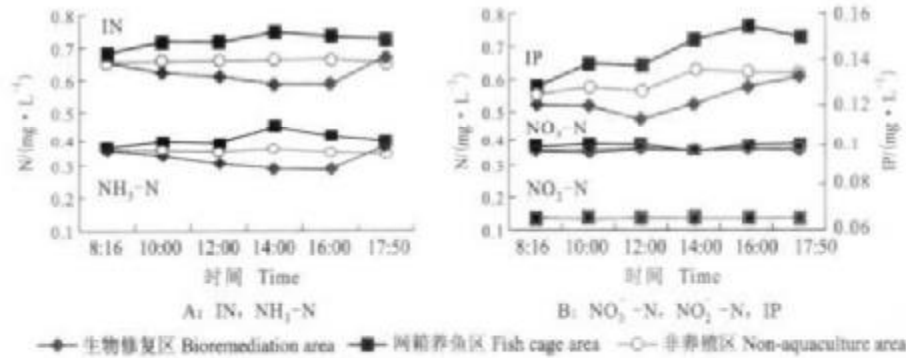


图8 不同功能区日间IN、IP浓度变化(2003-11-18)

Fig.8 Variation of IN,IP on different functional area during daytime on Nov.18 2003

数量的江蕨就能满足水中DO的供需平衡。同时,江蕨还能改善海水的pH。

(2)断面监测和定点连续监测结果也表明,江蕨能降低水中的IN、IP浓度,3种价态的IN中,江蕨优先吸收 $\text{NH}_4\text{-N}$,这对减轻网箱养殖区的污染更具实际意义。

(3)阴雨天,江蕨对海水中的DO、IN、IP修复效果依然明显。

(4)高密度的网箱养殖区中大面积混养或间养江蕨,可降低水中的营养盐浓度,减轻环境污染,防止水体出现缺氧状态,避免不利天气引起的死鱼事故。

参考文献:

- [1] 温志良,温瑞茂.海水养殖对环境的影响[J].环境科学动态,2000(1):29-32.
- [2] Wu R S S. The environmental impact of marine fish culture: Towards a sustainable future[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995(31):159-166.
- [3] 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[J].海洋环境科学,2000,19(4):66-71.
- [4] 李秋芬,袁有光.海水养殖环境生物修复技术研究展望[J].中国水产科学,2000,7(2):90-92.
- [5] 毕远博,李树寅,宋辛,等.赤潮及其防治途径[J].水产科学,2001,20(3):31-32.
- [6] Nelson S G, Glenn E P, Conn J, et al. Cultivation of *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyta) in shrimp farm effluent ditches and floating cages in Hawaii: a two-phase polyculture system[J]. 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[J]. Aquaculture, 1997, 156: 45-61.
- [8] 陈昌生,章景荣.福建省细基江蕨繁殖体类型人工栽培的探讨[J].集美大学学报(自然科学版),1999,4(2):65-71.
- [9] Liu Sijun, Jie Zhenying, Zeng Shufang. The commercial cultivation of *Gracilaria* and its polyculture with prawn in China[J]. Journal of Zhongshan University, 1997, 17(2): 27-30.
- [10] 万松良,黄二春,李慧,等.大口鲶鱼耗氧率和窒息点的观测[J].齐鲁渔业,1997,14(3):22-23.
- [11] Matosiek K, Przytocka J M, Leszczynski G K, et al. Studies on the purification of wastewater from the nitrogen fertilizer industry by intensive algal cultures. II. Removal of nitrogen from wastewater[J]. Acta Microbiol Pol, 1976, 25(3): 361-374.
- [12] 王朝晖,江天久,纪桑,等.水网藻(*Hydrodictyon reticulatum*)对富营养化水样中氮磷去除能力的研究[J].环境科学学报,1999,19(4):448-452.
- [13] 王彦波,许梓荣,邓岳松.水产养殖中氮氮和亚硝酸盐的危害及治理[J].饲料工业,2002,23(12):46-48.

Bioremediation of *Gracilaria lichenoides* in fish cage-farming areas

TANG Kun-xian^{1,2}, JIAO Nian-zhi¹, YOU Xiu-ping², CHEN Min-cr², SHEN Dong-yu², LIN Ya-sen², LIN Si-bin²

(1. Key Laboratory for Marine Environmental Science of Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Environmental Monitoring Station of Dongshan, Dongshan 363400, China)

Abstract: Water self-pollution and eutrophication have becoming the most important environmental problem in mariculture as its fast development. Using macroalgae to remove nutrition elements such as N and P, and produce O₂ is one of the most effective ways to prevent the pollution, enhance dissolved oxygen concentration, and avoid eutrophication. Bioremediation of polluted mariculture water has become the focusing point for the researchers all over the world. *Gracilaria* is a group of macroalgae, can improved the water quality and can be used as the raw material for agar production and the feed for abalone. Dongshan County of Fujian Province is an important base of abalone culture and cage culture in the nation. After about twenty years of mariculture, some sea areas such as Bachimen fish cage-farming in Dongshan County have been seriously polluted. The technique utilizing *Gracilaria* to remediate the mariculture water environment has been studied.

Gracilaria lichenoides, which was introduced from Taiwan province in 1998, was applied as a mediator to rescue the pollution environment in the area of Bachimen fish cage-farming. The experiments were conducted in Dongshan island from August to December 2003. Water quality was monitored at fixed sites or sections or planes of different functional areas including bioremediation fish cage-farming and non-aquaculture during the experimental courses. The results showed that after the data collected from the areas of fish cage-farming and non-aquaculture were compared, *G. lichenoides* was effective in terms of uptakes of inorganic nitrogen and inorganic phosphorus, and improvement of the dissolved oxygen in the area of bioremediation on sunshine. In rainy weather, the effect of bioremediation was still obvious. While in the area of fish cage-farming, concentrations of inorganic nitrogen and inorganic phosphorus were higher and the concentrations of DO were apparently lower than that in the area of non-aquaculture. Especially, it was important to alleviate the self-pollution of fish cage-farming and *G. lichenoides* was prior to uptake ammonia of inorganic nitrogen. So it could avoid causing fish to death in the foul weather. Furthermore, the outputs of the bioremediator *G. lichenoides* could be used as foods for abalones and thus enhance the total economic value of mariculture. This study also demonstrated an ecological approach for sustainable aquaculture.

Key words: *Gracilaria lichenoides*; inorganic nitrogen; inorganic phosphorus; dissolved oxygen; bioremediation; fish cage-farming