

·综述·

江蓠作为富营养化指示生物及修复生物的氮营养特性

徐永健¹, 钱鲁闽^{1,2}, 焦念志¹

(1. 厦门大学 环境科学研究中心, 海洋环境科学教育部重点实验室, 福建 厦门 361005; 2. 国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005)

摘要:近海环境的污染日趋严重, 化学监测方法存在着其固有的缺陷, 采用指示性生物来反映变化的水质已越来越为人们所接受。大型海藻江蓠(*Gracilaria*)为自养生物, 易养殖, 能忍受盐度、温度等环境条件相对较大的波动, 是理想的研究材料; 它能对环境不同形态氮的浓度及来源, 通过氨基酸组成、光合色素及组织氮含量等变化作出迅速而灵敏的响应; 江蓠生长快, 具有大的氮储存能力, 及较高的经济价值等特性, 已成为水体中营养变化的指示性生物及治理富营养化理想的修复植物。

关键词:富营养化; 江蓠; 指示生物; 植物修复; 氨基酸

中图分类号:X171.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-8737-(2004)03-0276-05

近年来, 近海生态环境恶化日益严重, 赤潮频发, 主要原因是水域中生源要素氮、磷的大幅度升高。因此, 监测和预报渔业水域营养状态, 对于及时采取应对措施减少损失至关重要。采用标准的化学分析方法监测水体的营养变化只能提供采样瞬时的存在浓度^[1], 其所得出的溶解态营养盐浓度也不能用来表示为生物可利用的量^[2]。目前, 常用大型海藻作为水体中营养盐浓度的指示生物。因为藻体内的营养含量与环境水体中的生物可利用的营养浓度间存在着密切的相关关系^[2-3]; 国内外也有一些学者提出用养殖大型海藻吸收氮磷、延缓水域的富营养化的观点, 这些方面的研究已取得了一些进展^[4]。其中研究较多的一类海藻就是江蓠(*Gracilaria*), 江蓠属于红藻门(Rhodophyta), 种类多、分布广, 经济价值较高, 还具有多种商业用途, 如提胶、食用、药用、饲料、肥料等。

本文综述了大型海藻江蓠的氮营养代谢特性, 即江蓠对氮的吸收、同化、储存及释放等, 重点涉及江蓠对氮的吸收与储存。在此基础上, 根据江蓠对环境水体中的不同营养类型及浓度有着灵敏的生理生化反应差异的特点, 论述了江蓠可作为准确测量环境中生物可获得营养盐浓度变化的指示生物^[3,5]的可行性; 并探讨了由于其适应广、生长快、营养储存库大等特点, 以促进其作为水域富营养化的理想的修复工具和治理工具的研究。

1 海水中氮的存在形态及生物可利用性

在自然海水中, 氮主要以无机氮(N_2 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、

NH_4^+)、可溶性有机氮(尿素、游离氨基酸、维生素等)和颗粒有机氮(有机碎屑、浮游生物)的形态存在。

1.1 无机形态氮

大型海藻最易吸收的氮形态是铵, 但在自然海水中铵的浓度通常低于硝氮的浓度。正常海水中铵常以 NH_3 与 NH_4^+ 2种形态共存, 其中 NH_4^+ 的成分超过了90%, 细胞转运 NH_4^+ 需要有载体的存在, 大型海藻对 NH_4^+ 吸收的确切机制目前还不太清楚。硝氮是溶解态无机氮(DIN)的最主要组成成分, 存在的量比氨氮及亚硝氮都高。藻类吸收硝氮后, 在细胞内经同化过程还原为胺, 参与机体的新陈代谢, 硝氮不如氨氮易为藻类同化吸收^[6]。

1.2 有机形态氮

有机形态的氮(如尿素等)对大型海藻来说不如无机形态氮重要, 但也是海洋生态系的重要部分, 同样扮演着重要的角色, 特别是在无机氮受限制的情况下, 有机氮是海洋植物的重要氮源; 例如用不同来源的有机氮对养殖的圆扇江蓠(*Gracilaria tikvahiae*)的生长有很好的促进作用^[7]。其他形式的有机氮还有溶解态的自由氨基酸(DFAA)、嘌呤、嘧啶等, 这些也都可以作为一些大型海藻的重要氮源。

2 江蓠作为水质指示生物的氮代谢特性

2.1 江蓠的氮吸收特性

2.1.1 氮吸收动力学 研究发现, 江蓠对氮的吸收表现为饱和吸收动力学特征, 为主动吸收, 可以用酶动力学方程表

收稿日期: 2004-01-05; 修订日期: 2004-02-16。

基金项目: 国家“973”重点科技项目(2001CB409704); 福建省科技攻关计划重大项目(20021003, 2002Y005)。

作者简介: 徐永健(1975-), 男, 博士研究生。主要从事海洋污染环境的植物修复研究。

通讯作者: 焦念志。E-mail: jiao@xmu.edu.cn

示,方程中反映对离子吸收能力的参数有半饱和常数(K_s)及最大吸收速率($V_{\max}$)。 K_s 表示海藻在低浓度下吸收营养的相对能力,其随测定地点及环境氮浓度等的变化而有相应的变化; $V_{\max}$ 表示在相对更高的营养浓度下藻类获得的最大吸收速率。

许多有关海藻的动力学参数研究显示:江蓠的 K_s 较高,一般在 $2 \sim 40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,是浮游藻类的10倍左右;对氨氮与硝氮吸收的 $V_{\max}$ 也相对较大,在 $3 \sim 188 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (以干重计)。但是,江蓠对N的主动吸收并不都遵循上述简单的酶动力学方程,这与介质中营养盐形态以及藻体的生理状态有关。其中有些种类随着介质中氨氮或硝氮浓度的升高其吸收也呈线性增加^[6],这表明可能还存在着另外的吸收机制,但仍未得以确证。此外,在研究圆扁江蓠对氨氮的吸收实验中还发现该过程中包含一个双相系统,一个是 K_s 小于 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高亲和力(低 K_s)运转着的系统,及在高浓度下出现的一个有强扩散特性的低亲和力(高 K_s)系统,这一双相吸收系统与米门方程不相一致。还有研究发现藻类生长与外界介质中的氮浓度间存在一个双曲线关系。如圆扁江蓠,经缺氮预培养后,其硝氮及氨氮的吸收动力学都不遵循饱和吸收动力学模型^[9],吸收速率是独立的且在数值上远远超出与生长相关的吸收值。暗示着这2种藻有着大的氮储存能力。

2.1.2 不同形态氮吸收的比较 氨及硝氮被认为是大型海藻生长最重要的氮源,硝氮和氨氮的相互作用在浮游植物中的研究较多;一般当介质中氨氮浓度超过 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,藻类对硝氮很少或没有吸收^[10]。对江蓠的研究也显示,氨氮比硝氮及亚硝氮更快、更易被吸收,当氨氮存在时抑制硝氮及亚硝氮的吸收;硝氮的存在也可抑制亚硝氮的吸收,抑制的程度与浓度有关;只有当介质中氨氮及硝氮浓度都相对较低时,一些江蓠才能优先吸收利用亚硝氮。江蓠对不同形态氮的吸收取决于环境中各形态氮的浓度,环境中高的硝氮浓度和低的氨氮浓度可以驯化江蓠,从而使藻类调整为吸收硝氮,但对某些海藻来说,当环境中有可利用的氨氮出现时,还会迅速转为吸收氨氮^[5]。另外,也有发现存在着一些海藻,即使在氨存在时也可吸收硝氮而不受到抑制,有些甚至氨氮和硝氮同时吸收的现象^[11]。

2.1.3 环境因子对氮吸收的影响 这里论及的环境因子包括光、温度、盐度及水运动状况等。

光 光照是海洋环境中海藻生长的主要限制因子之一。光(光强、光质、光周期)的差异影响到藻类对不同形态无机氮的吸收,如初始时暗处的圆扁江蓠对氨氮的吸收与在光亮处相同,但随着时间延长而下降^[12];藻类吸收硝氮及亚硝氮比氨氮更依赖于光的存在^[13],这暗示着在低光的地方藻类将会更多地、更有效地利用氨而不是硝氮或亚硝氮。尽管藻类的生长需要光但江蓠吸收氮的饱和光强却是相当低的,例如圆江蓠(*G. chouae*)的饱和光强仅为 $7 \sim 22 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[14]。

温度 温度是控制大型海藻氮吸收的重要因子,温度对藻类的呼吸作用及光合作用暗反应中的酶活性都有显著的影响。在光照一定的情况下,藻类的营养吸收随温度的升高而增加。不同藻种的临界温度是不一样的,对于大多数海藻来说,大于 30°C 及低于 6°C 时,氮的吸收都会降低^[14]。圆扁江蓠能经受住更宽温度范围^[15],同时这种能力也展示了对改变的温度能作出迅速的响应,如当温度在由 10°C 升到 20°C 时,圆扁江蓠的生长速度增加了20倍^[15]。

盐度 一般大型海藻的种类和数量随盐度的下降而减少,但江蓠属的一些种类在较大盐度的变化下,仍有较高的生长率,如圆扁江蓠是广耐受性种之一,在盐度 $17 \sim 40$ 时都有相对较高的生长率^[15]。另外,环境因子间存在着的交互作用也很重要,如海藻对盐度的反应是通过温度来进行调节的,在同一温度下生长与存活与盐度的高低密切相关^[16]。

水运动状况 水流速度对藻类营养吸收和生长是重要的,因为水流能改变藻体周围的水体,带走藻体产生的废物及阻止泥沙在藻体表面的沉积等。水流的存在更有利于营养盐通过边界层向藻体扩散,对一种巨藻(*Macrocystis pyrifera*)研究揭示,在 $2.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水流下该藻有最大的营养吸收^[17];当作用于该藻叶片上的水流速度从0增加到 $4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其光合产量预计可能增加了300%,水流超过 $4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,C的吸收是造成生长限制的主要原因^[17]。

2.2 江蓠的氮储存变化特性

大型海藻对近海生态系统中的氮循环和转化起着重要的作用,首先是它能吸收和储存大量的氮,同时其以无机物或代谢产物形式储存氮是对氮限制环境的一种生态适应。

大型海藻中有3种类型的有机氮储存库:结构性氮库、生理性氮库和储藏性氮库。其中较重要的是储藏性氮库,过度吸收的氮都储存在这库中。该库存在有3种形态的含氮有机物质——氨基酸(AA)、藻体色素及组织氮,各自含量随外源因子改变而变化。

2.2.1 氨基酸(AA) 藻体中除了蛋白质氨基酸外,还含有大量的非蛋白氨基酸。瓜氨酸就是其中的一种,它是江蓠和其它大型海藻氮“奢侈”储存物质^[3]。最近的研究发现,瓜氨酸是所有AA中对环境氮浓度变化最响应的^[18],如对可食江蓠(*G. edulis*)及圆扁江蓠的研究发现,添加铵可增加藻体中瓜氨酸、苯丙氨酸、丝氨酸及自由铵的含量,其中瓜氨酸增加的量与所加铵的量之间存在着线性增长的关系 $R^2 = 0.84$ ^[18];对另一种江蓠(*G. verrucosa*)加氮也可以观察到组织自由氨基酸的百分含量增加;其中瓜氨酸的响应最为显著,占到了自由氨基酸总量的70%~90%^[3]。

藻类的AA组成对于不同形态的氮源响应也是不一样的,AA组成是环境中可利用氮源的最好指标^[18]。如,用硝氮处理可增加可食江蓠中谷氨酸、瓜氨酸及丙氨酸的量,而尿素处理只增加藻体自由铵的含量,苯丙氨酸和丝氨酸的含量反而有所减少^[18]。所观察到的AA组成及某一些AA含量的变化,对于采用AA的相对浓度变化来分析环境中氮增

加的何种氮源提供了依据,而2者间存在的线性关系又可对输入的氮源进行量化分析,AA指标为鉴别氮污染源提供了有价值的证据。这就提供了一个敏感的监测氮的来源及氮的可利用性状况的生物指标。

2.2.2 色素 江蓠对可利用营养的响应可部分归功于其细胞内的光合辅助色素——藻胆蛋白。其中藻红蛋白对外界的营养变化最为敏感^[19]。江蓠的色素含量与水体中可利用氮源的浓度间有密切的关系,经研究发现:当藻体内部储备的氮缺乏时,藻类所显的深红色慢慢消失,代之呈现浅黄色,生长也随之停止^[12]。藻体颜色的消失可能是藻红蛋白作为氮源代谢的结果,即色素作为一种功能性储存氮,被用来合成其他蛋白质^[20-21]。Bird^[20]指出,藻红蛋白先于总蛋白库被吸收利用。这也说明,它是一个重要的氮储存的蛋白质^[20-21]。藻体内的氮百分含量与藻红蛋白和叶绿素a的浓度间也存在着正相关,与碳/氮比值负相关,例如江蓠属海藻在增加氮供应的情况下,它的颜色从自然的浅绿褐色变为深红色^[13],对圆扁江蓠添加氨氮或硝氮,并不总能增加它的生长率,但一定可以使它的颜色变红^[22]。这意味着在使用其他可获得的氮源用于生长前,藻体中已经储存了相当多的氮。因此,在观察添加氮源的作用时,通过测定藻体的色素氮储存量增加比观察其生长增加更为有效。这点是在把江蓠作为指示性生物时要考虑到的。

2.2.3 组织氮含量 大型海藻组织氮含量是最多地用来反映水体中无机氮含量的指标^[2,20],曾被认为是最准确的测定植物处于何种营养盐状态(限制的、充足的或过剩的)的方法^[23]。红藻门海藻的总组织氮含量已被证实与水体氮浓度有很好地相关性^[6,20,24-26],而其中江蓠属的海藻更是表现了对水体氮浓度变化的强烈响应^[13,20],如圆扁江蓠的氮含量临界值大约为干重的2%,其生长的最小氮含量为干重的0.8%^[7,23],因此在0.8%到2%之间,藻类的生长与藻体内氮含量成正比;高于2%,就为“奢侈”储存营养盐提供了可能。

此外,还可根据组织中其他组成成分与氮的比值变化来推断海藻的氮营养状况。如研究发现,江蓠的临界碳氮比在10~15^[16],当碳氮比大于15,藻类生长可能受氮限制;低于10,预示着藻类开始储存氮^[21]。蛋白质与碳水化合物的比值也被用来检测藻体的氮限制情况。一般地,江蓠叶状体内的氮含量和碳水化合物含量间存在着一个负相关关系^[20]。现在一般认为测定藻体内的氮含量、碳氮比及蛋白质碳水化合物比是有效地了解藻体氮储存状态的较好的方法^[23]。

江蓠能综合较长时间内水体中的营养盐浓度变化,并从色素、AA及组织氮的变化上反映出生活水体的营养变动状况。如在澳大利亚的贫营养海域,采用可食江蓠作为指示生物,脉冲添加营养3d后,收集放养的可食江蓠并分析现场水样,在一次性添加10倍环境浓度营养的海区能监测到藻体内的AA浓度及组成变化,其中主要是瓜氨酸含量的升高;一次性添加100倍的海区,能检测到藻体中氮百分含量

的升高及AA的变化;一次性添加1000倍的海区,可看到叶绿素a、组织氮及AA的增加;而用于对比的标准化学分析方法看不出曾有添加过营养的痕迹^[26]。江蓠的这种对外界因子变化能作出灵敏响应的能力,被认为是理想的水质指示生物特性。

3 江蓠作为富营养化修复工具的氮营养特性

由于人为的原因,世界上近海水体的营养状况在不断地增加,业已造成了严重的生态问题。江蓠的独特的氮营养特性,已被用作营养污染水域的修复和治理工具。

江蓠能主动地吸收大量的营养盐。如处于氮饥饿状态下的圆扁江蓠,在8h内就能快速吸收2倍于其总组织氮含量的氮;而在6h内吸收的氮可供它在氮限制的环境中生活两周^[12]。

江蓠拥有1个大的氮储存库。有1种江蓠(*Gracilaria* spp.)能够吸收使组织内的氮含量达到外界环境的氮含量的28000倍,占到其总干重的2.1%,所吸收的如此大量的氮,可以使它在外界环境中的氮缺乏后,仍能维持2个月不受氮限制的生长状态^[27]。研究指出,圆扁江蓠较其他种类有更好的氮储存能力^[9],如当每14d供应1次外源营养盐时,江蓠生长良好,而和其共同生长的其他藻类都死了,这是因为它们不具有圆扁江蓠那样的储存氮的能力,故在这段缺N时期不能正常地生活^[12]。圆扁江蓠藻体内的大的氮储存库,无论外界可获得的氮或硝氮的高低都不影响它的生存^[12]。这也反过来说明了在有丰富营养的环境中,藻体吸收大量的营养,这种吸收远远地超过了生长所需,这些氮就得以额外储存。

江蓠还具有生长快、分布广等特点。江蓠在全世界的热带至温带沿岸区域都有广泛地分布,是许多水生生物得以存活的生存环境和食物。江蓠是典型的机会种,在条件合适时,可以大量的繁殖。曾有报道,在适宜条件下,细基江蓠繁枝变型(*G. tenuistipitata* V. Liu Zhang et Xia)5周内的鲜重增加16.9倍,日平均生长率达到3.9%以上^[28];费修绶在广州南澳富营养海域中养殖龙须菜(*G. lemaneiformis*)155d藻体增重282倍,日平均生长率达3.6%(个人交流)。

因此,在富营养污染的海区中养殖江蓠,通过江蓠提取水体中过量的营养盐,再收获海藻从而将水体中的营养物质转移出污染系统,达到缓解和消除富营养化的目的。这个植物修复(phyto-remediation)的方法是切实可行的。

植物修复已经成为国际上推崇的解决环境问题的优选方案,目前已成为环境科学研究的热点之一。本文作者在闽南的东山岛开展了网箱养殖区富营养化的植物修复研究,分别在东山的西埔湾和八尺门2个网箱养殖海区进行龙须菜修复试验,实施面积分别为3.5hm²和2hm²。养殖2个月,结果表明,龙须菜对富营养化的修复效果明显,能使修复海域海水中无机氮、无机磷的含量大大减少,海水的溶解氧含量上升。所养殖的龙须菜藻体长达70~80cm,平均亩产达

3.5 t, 纯产值1万多元。生态效益和经济效益明显。但龙须菜是常温种, 其适宜生长温度为11~23℃(待发表), 适合于我国南方冬春季节海区养殖。因此还要选择搭配一种能在夏季高温下营养修复的海藻, 以实现全年不间断修复。

参考文献:

- [1] Wheeler P A, Bjornstater B R. Seasonal fluctuations in tissue nitrogen, phosphorus and N:P for five macroalgal species common to the Pacific northwest coast[J]. J Phycol, 1992, 28: 1-6.
- [2] Lyngby J E. Monitoring of nutrient availability and limitation using the marine macroalgae, *Ceramium rubrum* (Huds.) [J]. C Ag Aquat Bo, 1990, 38: 153-161.
- [3] Ryther J H, Corwin N, DeBusk T A, et al. Nitrogen uptake by the red algae *Gracilaria tikvahiae* [J]. Aquaculture, 1981, 26: 107-115.
- [4] Horrocks J L, Stewart G R, Denison W C. Tissue nutrient content of *Gracilaria* spp. (Rhodophyta) and water quality along and estuarine gradient[J]. Mar Fresh Res, 1995, 46: 975-983.
- [5] Gao K, McKinley K R. Use of macroalgae for marine biomass production and CO₂ remediation: a review[J]. J Appl Phycol, 1994, 1: 45-60.
- [6] Hanisak M D. The nitrogen relationships of marine macroalgae [A]. Nitrogen in the Marine Environment[M]. New York: Academic Press Inc., 1983.
- [7] Vona V, rigano DM, Esposito S, et al. Growth, photosynthesis, respiration, and intracellular free amino acid profiles in the unicellular alga *Cyanidium caldarium*. Effect of nutrient limitation and resupply[J]. Physiol Plant, 1992, 85: 652-658.
- [8] DeElia C F, DeBoer J A. Nutritional studies of two red algae II kinetics of ammonium and nitrate uptake[J]. J Phycol, 1978, 14: 266-272.
- [9] Lavery P S, McComb A J. The nutritional ecophysiology of *Chaetomorpha linum* and *Ulva rigida* in peer inlet Western Aust [J]. Bot Mar, 1991, 34: 251-260.
- [10] Hanisak M D. Nitrogen limitation of *Codium fragile* ssp. *Tomentosoides* as determined by tissue analysis[J]. Mar Biol (Berlin), 1979, 50: 330-337.
- [11] Fujita R M. The role of nitrogen status in regulating transient ammonium uptake and nitrogen storage by macroalgae[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1985, 92: 283-301.
- [12] Lomas M W, Glibert P M. Interactions between NH₄ and NO₃ uptake and assimilation: Comparison of diatoms and dinoflagellates at several growth temperature[J]. Mar Biol, 1999, 133: 541-551.
- [13] Hanisak M D, Harlin M M. Uptake of inorganic N by *Londium fragile*[J]. J Phycol, 1978, 14: 450-454.
- [14] Okhyun A, Royann J P, Paul J H. Ammonium and nitrate uptake by *Laminaria saccharina* and *Nereocystis luetkeana* originating from a salmon sea cage farm[J]. J Appl Phycol, 1998, 10: 333-340.
- [15] Bird K T, Habig C, DeBusk T. Nitrogen allocation and storage patterns in *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyta) [J]. J Phycol, 1982, 18: 344-348.
- [16] Falkowski P G. Enzymology of nitrogen assimilation[A]. Nitrogen in the Marine Environment[M]. New York: Academic Press Inc, 1983.
- [17] Jones A B, Dennison W C, Stewart G R. Influence of nitrogen source and availability on amino acids pigments and tissue nitrogen of *Gracilaria edulis* (Rhodophyta) [J]. J Phycol, 1996, 32: 757-766.
- [18] Lapointe B E, Tenore K R. Experimental outdoor studies with *Ulva fasciata* Delile. I. Interaction of light and nitrogen on nutrient uptake, growth, and biochemical composition[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1981, 53: 135-152.
- [19] Kursar T A, Alberte R S. Photosynthetic unit organization in a red alga: relationships between light-harvesting pigments and reaction centres[J]. Plant Physiol, 1983, 72: 409-414.
- [20] Harlin M M, Thorne-Miller B. Nutrient enrichment of seagrass beds in a Rhode Island coastal lagoon[J]. Mar Biol (Berlin), 1981, 65: 221-229.
- [21] Bjornstater B R, Wheeler A. Effect of nitrogen and phosphorous supply on growth and tissue composition of *Ulva fenestrata* and *Enteromorpha intestinalis* (Ulvales, Chlorophyta) [J]. J Phycol, 1990, 26: 603-611.
- [22] Friedlander M, Krom M D, Ben-Amotz A. The effects of light and ammonium on growth, epiphytes and chemical constituents of *Gracilaria conferta* in outdoor cultures[J]. Bot Mar, 1991, 34: 161-166.
- [23] Lohman K, Prisco J C. physiological indicators of nutrient deficiency in *Cladophora* (Chlorophyta) in the Clark Fork of the Columbia River, Montana[J]. J Phycol, 1992, 28: 443-448.
- [24] Bird N L, Chen C M, McLachlan J. Effects of temperature, light and salinity on growth in culture of *Chondrus crispus*, *Furcellaria lumbricalis*, *Gracilaria tikvahiae* (Gigartinales, Rhodophyta), and *Fucus serratus* (Fuciales, Phaeophyta) [J]. Bot Mar, 1979, 22: 521-527.
- [25] Gerard V A. In situ water motion and nutrient uptake by the giant kelp *Macrocystis pyrofera*[J]. Mar Biol (Berlin), 1982, 69: 51-54.
- [26] Simon D C, Mark J O, William C D. *Gracilaria edulis* (Rhodophyta) as a biological indicator of pulsed nutrients in oligotrophic waters[J]. J Phycol, 2000, 36: 680-685.
- [27] Chapman A R O, Craigie J S. Seasonal growth in *Laminaria longicruris*: Relations with dissolved inorganic nutrients and internal reserves of nitrogen[J]. Mar Biol (Berlin), 1977, 40: 197-205.
- [28] 任国忠, 陈美琴. 温度对细基江蓠繁枝变型生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 329-335.

Nitrogen nutritional character of *Gracilaria* as bioindicators and restoral plants of eutrophication

XU Yong-jian¹, QIAN Lu-min^{1,2}, JIAO Nian-zhi¹

(1. Environmental Science Research Center, Marine Environment Laboratory of the Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

Abstract: Increasing eutrophication (particular the levels of N and P) of coastal marine environments has led to the development of nutrient monitoring methods. Various shortcomings of chemical analyses have identified the need to develop biological indicators (bioindicators) that can be used to detect available nutrient concentrations. *Gracilaria*, a kind of red macroalgae, appears to be responsive to the nutrient forms and bioavailable concentrations in water columns through variations in their tissue nutrient content, photosynthetic pigments and amino acids composition. The observed variations facilitated the development of an index for each N source, and the N source index was used to predict the dominant source of N being assimilated by the macroalgae, thus providing a sensitive bioindicator of nitrogen. Furthermore, *Gracilaria* has characters of rapid growth, larger capacity of nitrogen storage and favorable value. So they appear to be some very good remediation plants of eutrophication.

Key words: eutrophication, *Gracilaria*, bioindicators, phytoremediation, amino acids

Corresponding author: JIAO Nian-zhi. E-mail: jiao@xmu.edu.com

欢迎订阅《中国水产科学》

《中国水产科学》是中国水产科学研究院主办的国家级学术期刊,主要报道水产生物学基础研究、水产生物病害及其防治、水产生物营养及饲料、渔业生态保护及渔业水域环境保护、水产品保鲜与加工综合利用、水产资源、海淡水捕捞、水产养殖与增殖以及渔船、渔业机械与仪器等方面的最新进展、最新成果、最新技术和方法。主要服务对象是科研、教学、科技管理人员以及大专院校师生。是反映水产科研创新成果的窗口和培养人才的园地。它面向水产业,为水产业的持续发展和水产经济建设服务。

本刊为双月刊, A4开本, 每期104页, 双月出版, 国内外公开发行。国内定价14元/期, 全年84元(含邮费)。邮发代号: 18-250, 国内统一刊号: CN11-3446/S, 国际标准刊号: ISSN1005-8737, 国外代号4639Q。全国各地邮电局(所)办理订阅手续(可破季订阅)。漏订或补订当年和过期期刊, 请直接向编辑部订阅。另备有少量合订本, 欢迎购买。

《中国水产科学》1994~2003年光盘(ISBN 7-89995-232-8/S·004)已经出版发行, 每套定价150元。需要购买光盘的读者, 请将款通过邮局直接寄到编辑部, 款到寄盘, 同时开正式报销发票。欢迎广大读者与编辑部直接联系购买事宜。

编辑部地址: 北京市丰台区青塔村150号, 邮政编码: 100039, 联系电话: 010-68673921, 传真: 010-68673931; E-mail: jfishok@publica.bj.cninfo.net